

РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТА И ОЛЕДЕНЕНИЯ ЭЛЬБРУСА В XV–XXI ВВ. НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ СМIP6

© 2026 г. И. А. Корнева^{1,2,*}, О. О. Рыбак^{2,3,4}, Е. А. Долгова¹, Н. Э. Елагина¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Филиал Института природно-технических систем, Сочи, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

⁴Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

*e-mail: comissa@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2025 г.

После доработки 06.10.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Цель работы — создание долговременных рядов температуры воздуха и атмосферных осадков за XV–XXI вв. для дальнейшей оценки динамики оледенения Эльбруса с помощью гляциологической модели. В качестве исходной информации применялись ряды глобальных климатических моделей проекта СМIP6 за период 1466–2100 гг. Проведены статистические оценки соответствия модельных рядов различным видам данных наблюдений и палеореконструкций: метеорологическим измерениям на сетевых метеостанциях, результатам дендрохронологических реконструкций температуры воздуха и осадков, восстановленному ряду аккумуляции снега на Западном плато Эльбруса по данным ледяного керна. Сравнение показало, что модельные данные за XV–XIX вв. могут быть сопоставимы с данными реконструкций на временных масштабах не менее десятилетий. По совокупности критериев за разные периоды сравнения наилучшее соответствие с данными наблюдений и реконструкций получено для моделей INM-CM4-8 и ACCESS-ESM1-5. Систематические погрешности устранены методом линейной коррекции на основе среднемесячных поправок с учетом данных наблюдений на метеостанции Терскол. Показано, что амплитуда колебаний температуры воздуха и атмосферных осадков, а также баланса массы ледников по модельным данным СМIP6 значительно ниже, чем по данным реконструкций. Получено, что баланс массы Эльбруса, рассчитанный с помощью простых регрессионных соотношений на основе только данных о температуре воздуха и атмосферных осадках в некоторые периоды XIX–XX вв. не согласуется с данными реконструкций колебаний ледников.

Ключевые слова: климатические проекции, реконструкция климата, климатические модели, проект СМIP6, Эльбрус, баланс массы ледников

DOI: 10.7868/S2412376526010024

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение ледников по всему миру продолжается и в последние десятилетия становится всё более интенсивным вслед за повышением температуры воздуха (Zemp et al., 2019; Hugonnet et al., 2021). Согласно последним оценкам, общая потеря массы ледниками Кавказа за период 2000–2019 гг. эквивалентна 11.04 ± 0.78 Гт воды (Tielidze et al., 2022). Ледники Эльбруса потеряли 29% своей площади с 1960 г. (Ледники и климат..., 2020). Согласно датировкам морен на Кав-

казе (Solomina et al., 2024), в течение малого ледникового периода было несколько эпизодов наступания ледников: в 1200–1300 гг., в 1500, 1750 и 1840–1860-х годах, после чего за последние полтора столетия длина подавляющего большинства ледников Кавказа сократилась более чем на 1 км (Solomina et al., 2016). Отступанию ледников предшествовал период значительно-го снижения сумм летних осадков (Mikhaleiko et al., 2024). Периодам наступания ледников соответствовали минимумы летней температуры воздуха (Solomina et al., 2016). В целом дина-

мики летних температур и состояния ледников в Альпах и на Кавказе за последние 500 лет согласуются между собой (Solomina et al., 2016), что свидетельствует об определяющем влиянии крупномасштабных климатических изменений на состояние горного оледенения.

Математическое моделирование — универсальный инструмент для исследования эволюции гляциологических параметров на разных временных масштабах. Для проведения соответствующих численных экспериментов по реконструкции и прогнозу оледенения Эльбруса необходимы климатические данные. Температура и осадки — ключевые “драйверы” любой динамической модели горного оледенения с упрощённым масс-балансовым блоком. Поэтому в рамках работы получены синтетические ряды приземной температуры воздуха и количества осадков в исследуемом регионе за XV–XXI вв. Поскольку рассматриваемый здесь временной промежуток значительно выходит за рамки инструментальных наблюдений, необходимый для реконструкций и прогностического моделирования оледенения Эльбруса объём климатической информации обеспечивается косвенными данными и результатами численных экспериментов. В связи с тем, что пространственное разрешение глобальных климатических моделей составляет 1–2°, естественно, что мезомасштабные и региональные процессы моделями такого класса не воспроизводятся, и это критически важно для горных условий, где влияние орографических факторов в масштабе нескольких километров имеет решающее влияние на формирование метеорологических условий. Естественная стратегия в применении данных глобального моделирования будет заключаться в использовании аномалий генерируемых значений температуры воздуха и количества осадков по отношению к историческим рядам, откалиброванным и/или исправленным по данным наблюдений на метеостанциях (Maraun, 2016; Luo et al., 2018; Корнева и др., 2023, 2024).

Существует достаточно работ, в которых оценивается степень реалистичности того, насколько климатические модели, в частности модели проекта CMIP6 (Eyring et al., 2016), воспроизводят реальные поля приземной температуры воздуха и осадков в различных регионах земного шара за исторический период 1850–2014 гг., в том числе и в горных районах (Zhang et al., 2022). Корректность модельных результатов определяется путём их сопоставления с ин-

струментальными данными, объём которых постоянно растёт. Анализ некоторых результатов подобного прямого сопоставления в целом едва ли можно назвать удовлетворительным. Например, в работе (Zhu et al., 2020) показано, что по территории Китая ансамбль из 20 моделей CMIP6 в целом хорошо воспроизводит пространственное распределение температуры воздуха, занижает значения среднегодовой и зимней температуры воздуха (до 4–6 °C), и завышает осадки в Тибете — среднегодовую сумму до 200%, а в зимний период даже до 500% (Yang et al., 2021). Те же тенденции отмечались в этом регионе и по результатам анализа данных более ранних проектов CMIP3 и CMIP5 (Zhu et al., 2020). В высокогорной Азии занижение температуры по моделям CMIP6 в среднем составило –1.9 °C (от –8.2 до +2.9 °C), а суточная сумма осадков оказалась в среднем больше на 143% (от 31 до 281%) (Lalande et al., 2021). Отмечено, что и результаты региональных климатических моделей (эксперимент CORDEX) с характерным разрешением 25 км также демонстрируют систематическое завышение количества осадков и занижение температуры воздуха в горных районах Кавказа (Корнева и др., 2023, 2024), в Гималаях (Dimri et al., 2022) и в Центральной Азии (Tor et al., 2021).

Несмотря на несогласованность в результатах моделирования региональных особенностей климата, прогностические эксперименты на глобальных и мезомасштабных климатических моделях пока можно рассматривать как единственный инструмент физически обоснованной оценки климатических сценариев будущего. Тем не менее общепринятым прагматическим подходом к устранению или, по крайней мере, минимизации отклонения моделей является применение разнообразных процедур коррекции и регионализации. Цель работы — формирование единых долговременных рядов основных климатических величин, необходимых для моделирования эволюции и прогноза состояния ледников Эльбруса — температуры воздуха и осадков — за период 1466–2100 гг. Для этого применены результаты численных экспериментов четырёх глобальных моделей проекта CMIP6, данные которых охватывают полностью весь период исследования: исторический период, последнюю тысячу лет, а также прогностический период до 2100 г. Проведено сравнение исторических модельных данных с измерениями на метеорологических станциях в исследуемом районе, а также палеоклиматических модельных

данных с результатами различных палеореко-
струкций за XV–XXI вв. Для выбранной модели
проведена процедура коррекции систематиче-
ской ошибки, выявленной на основе сравнения
с данными наблюдений за последние десятиле-
тия. В качестве примера применялись итоговые
ряды температуры и осадков за XVI–XXI вв.
В работе также приведены простейшие оценки
баланса массы ледниковой системы Эльбруса
по формуле Кренке–Ходакова.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ. ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Температура воздуха. В работе была примене-
на летняя (июнь–сентябрь) температура возду-
ха, восстановленная по дендрохронологическим
данным, полученным по образцам деревьев, ото-
бранных в двух точках: в Тебердинском нацио-
нальном заповеднике и в Приэльбрусье на высо-
те 2300 м над ур. моря (Dolgova, Solomina, 2010;
Dolgova, 2016). Итоговая хронология охватывает
период 1466–2011 гг., имеет высокие коэффи-
циенты корреляции с данными о температуре
воздуха по метеостанции Клухорский перевал
($r = 0.65$) и большой радиус пространственной
корреляции, поэтому этот температурный ряд
может быть использован для реконструкции кли-
мата не только Кавказского региона, но и Сред-
него Востока (Dolgova, 2016). Методика получе-
ния данной реконструкции подробно описана в
(Dolgova, 2016).

Атмосферные осадки. Единственной длинной
реконструкцией атмосферных осадков в кав-
казском регионе служит реконструкция летних
сумм осадков (май–июль), полученная по дан-
ным о ширине годичных колец сосны (*Pinus
sylvestris* L.), растущей на южном макросклоне
Кавказа. Дендрохронологическая площадка за-
ложена в ходе экспедиционных работ в 2016 г.
сотрудниками Института географии РАН
(41.75925 N, 42.80785 E, $H = 2000$ м). Керны ото-
браны буром Пресслера на высоте 1.3 м от по-
верхности. Ширина годичных колец измерена
в программе Coorecorder (Larsson, 2013), проце-
дура перекрёстного датирования осуществлялась
в программе COFESHA (Holmes, 1983). Воз-
растной тренд из индивидуальных серий удалён
в программе ARSTAN (Cook, 1985), аппрокси-
мирующей отрицательной экспонентой или ли-
нейной функцией путём деления. В работе при-
менены “остаточные” хронологии (residuals),
которые получены путём удаления автокорреля-

ции. В итоговую хронологию вошло 28 древес-
но-кольцевых серий сосны, и она охватывает пе-
риод 1747–2015 гг. В 1798 г. начинается период,
когда в ней присутствует пять и более образцов.

Поскольку инструментальные ряды наблю-
дений на ближайшей метеостанции Абастумани
(41.77 N, 42.83 E, $H = 1265$ м над ур. моря) имеют
пропуски и оканчиваются в 1990-х гг., для ана-
лиза учтены ряды из сеточного архива GPCC для
ближайшей точки (N41.75, E42.75) (Schneider
et al., 2011). Результаты проведённого дендрокли-
матического анализа свидетельствуют о наличии
положительной статистически значимой связи
между приростом сосны и количеством осад-
ков, выпавших в мае–июле ($r = 0.56$, $p < 0.001$;
рис. 1, а). Реконструкция в целом хорошо отра-
жает тренд изменчивости осадков за инструмен-
тальный период, хотя в отдельные годы модель
может давать завышенные или заниженные зна-
чения (см. рис. 1, б). Для перехода от значений
индексированных хронологий ШГК к значени-
ям реконструированных осадков в данном ис-
следовании применялся scaling-метод, который
помогает сохранить изменчивость реконструи-
руемых значений (см. рис. 1, в). Правомерность
использования данной модели подтверждается
полученными статистиками: положительные RE
(ошибка восстановления — reduction of errors)
и SE (коэффициент эффективности построен-
ной модели — coefficient of efficiency) статистики
(Committee, 2006), критерий Дарбина–Уотсона
(табл. 1).

Адекватность полученной реконструкции мож-
но оценить путём сравнения с другими имею-
щимися данными для этого региона. В частно-
сти, засушливые периоды 1850, 1870 и 1910-х гг.,
выявленные в реконструкции, синхронны с за-
сушливыми периодами, зафиксированными
в других исследованиях. Наличие кратковре-
менного эпизода переувлажнения в 1850-х гг.
находит подтверждение в результатах других ис-
следований, проведённых для данного региона
(Akkemik Aras, 2005; Martin-Benito et al., 2016).

**Реконструкция аккумуляции на Западном пла-
то Эльбруса.** Для сравнения динамики зимних
атмосферных осадков по данным моделирова-
ния применены данные зимней аккумуляции
(октябрь–март) на Западном плато Эльбруса
за период 1750–2009 гг., полученные в результа-
те анализа ледникового керна глубиной 181.8 м
(Mikhaleiko et al., 2024). Сравнение с метеоро-
логическими данными показало, что процесс

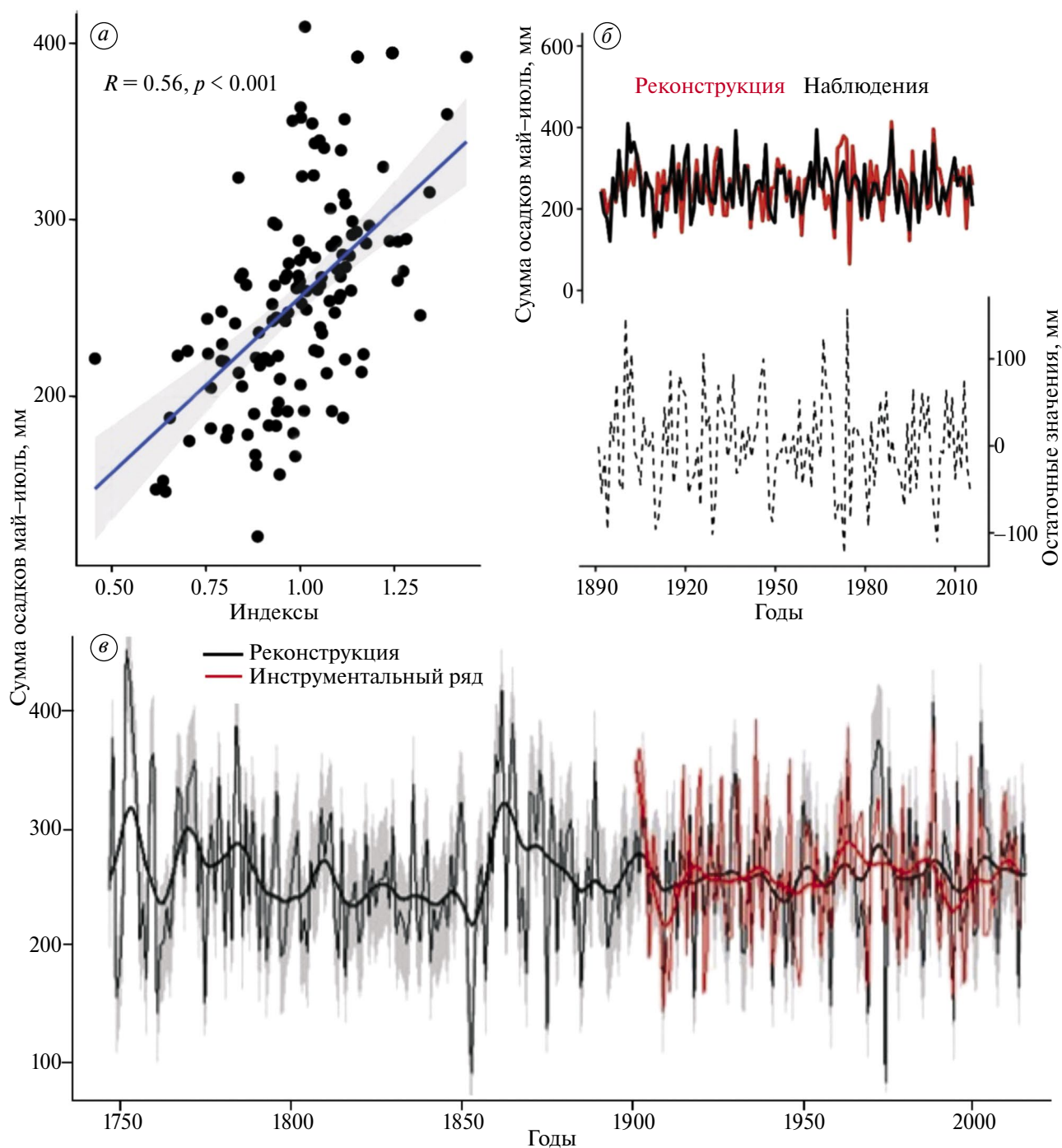


Рис. 1. Зависимость суммы осадков за период май–июль и индексов прироста хронологии сосны (а). Сравнение инструментальных и реконструированных значений суммы осадков за период май–июль (вверху) и разности между ними (внизу) (б). Реконструкция суммы осадков мая–июля, полученная по данным о ширине годичных колец сосны (чёрная линия), где серым обозначена область ± 1 среднеквадратическая ошибка (в). Красная линия — инструментальный ряд. Показаны также значения, сглаженные 30-летним кубическим сплайном

Fig. 1. Dependence of the precipitation sums for the period May–July and growth indices of pine chronology (a). Comparison between instrumental and reconstructed May–July precipitation series (above) and differences between them (below) (б). Reconstruction of the May–July precipitation amount obtained from data on the width of pine tree rings (black line), where the area ± 1 root mean square error is indicated in gray. (в). The red line is the instrumental line. Values smoothed with a 30-year cubic spline are also shown

Таблица 1. Калибровочные и верификационные статистики реконструкции летних осадков в Абастумани**Table 1.** Calibration and verification statistics for the reconstruction of summer precipitation in Abastumani

Период калибровки	Дендрохронологическая реконструкция		
	1891–1951	1952–2015	1891–2015
r^*	0.59	0.61	0.56
Количество лет	62	63	125
DW**	1.59	1.88	1.65
Период верификации	1952–2015	1891–1951	
r	0.61	0.59	
RE***	0.29	0.259	
CE****	0.29	0.256	

* r — коэффициент корреляции, ** DW (Durbin-Watson) — критерий Дарбина–Уотсона, *** RE (Reduction of Error), **** CE (Coefficient of Efficiency) — статистики.

аккумуляции на Эльбрусе в значительной степени определяется атмосферными осадками, что подтверждается как высокой степенью связи статистических характеристик годовой аккумуляции по керну на Западном плато Эльбруса и годовых сумм осадков по данным наблюдений, так и высокой корреляцией зимней аккумуляции и индекса Северо-Атлантического колебания (Mikhailenko et al., 2024). Показано, что реконструкция — репрезентативная для большого региона от Северного Кавказа до Юго-Восточной Европы.

Данные климатических моделей CMIP6. В работе применены расчётные ряды 850–1850 гг., полученные в рамках палеоклиматического эксперимента Past1000 (Jungclaus et al., 2017) проекта PMIP4 (The Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (Joussaume and Taylor, 1995) на четырёх моделях (данные только этих моделей находятся в открытом доступе на (esgf-node.ipsl.upmc.fr..., 2025, табл. 2), а также расчётные ряды исторического эксперимента CMIP6 (HISTORICAL за 1850–2014 гг.). В качестве начальных условий для численных экспериментов были учтены результаты расчёта климатических характеристик, соответствующих условиям доиндустриального климата (контрольный эксперимент pi-control). В эксперименте Past1000 задаются внешние форсинги (изменение солнечной постоянной, параметров орбиты Земли, концентрации парниковых газов, вулканические извержения, содержание озона, характеристики зем-

лепользования) и оценивается отклик модели при отсутствии антропогенного воздействия (Jungclaus et al., 2017; Ohgaito et al., 2020). В качестве прогностического форсинга — прогностические ряды проекта CMIP6 для периода времени 2015–2100 гг., рассчитанные теми же четырьмя климатическими моделями, что применялись и в палеоэксперименте (см. табл. 2), в соответствии с четырьмя сценариями изменения климата: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (IPCC, 2021).

Сравнение с данными метеорологических станций. Для оценки качества воспроизведения климатическими моделями проекта CMIP6 климата района Эльбруса использованы среднесуточные данные о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков на метеорологической станции Терскол (43.26 с.ш., 42.51 в.д., высота 2150 м над ур. моря) за период 1983–2014 гг., а для оценки качества воспроизведения моделями CMIP6 летних атмосферных осадков в районе дендрорекострукции в Абастумани (Грузия), — среднемесячные данные о количестве атмосферных осадков на ближайшей доступной к точке отбора образцов метеорологической станции Бахмаро (Грузия, 41.85 с.ш., 42.34 в.д., 1926 м над ур. моря) за периоды 1936–1964 и 1977–1990 гг. (данные об осадках по метеостанции Абастумани недоступны). Отмечено, что данная метеостанция учитывалась только для сравнения данных моделирования и единственной длинной реконструкции осадков в данном районе, чтобы подтвердить репрезентативность моделей.

Таблица 2. Климатические модели, используемые для моделирования климата за период 850–1850 гг. в эксперименте PMIP Past 1000**Table 2.** Climate models used to simulate the climate for the period 850–1850 in the PMIP Past 1000 experiment

Название модели	Название организации	Пространственное разрешение	Ссылка
MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) (Япония)	$1 \times (0.5-1^\circ)$	Ohgaito et al., 2021
INM-CM4-8	ИВМ РАН (Россия)	$2^\circ \times (1.5^\circ)$	Володин и др., 2013
ACCESS-ESM1-5	The CSIRO Climate Science Centre (Австралия)	$1.875^\circ \times 1.25^\circ$	Ziehn et al., 2020
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Tsukuba (Япония)	120 км	Yukimoto et al., 2019

Для температуры воздуха при сравнении с данными метеостанции Терскол бралась ближайшая к ней точка по модельным данным, после чего температура приводилась к высоте метеостанции с учётом разности высот по вертикальному градиенту температуры $0.6^\circ\text{C}/100\text{ м}$. Заметим, что высота метеостанции Терскол и высота склонов, на которых отбирались деревья для реконструкции температуры воздуха, близки (около 2000 м). Для осадков модельные данные CMIP6 линейно интерполировались в точки станций Терскол (для зимнего периода) и Бахмаро (для летнего периода). Как отмечено выше, глобальные климатические модели с разрешением около 100 км не воспроизводят региональные климатические особенности, особенно распределение осадков в районе со сложной орографией. Поэтому осреднённое значение количества осадков по ячейке глобальной климатической модели отличается от полученного на конкретной метеостанции, находящейся в определённых микроклиматических условиях. Однако в рамках данной работы: (а) ставилась задача прежде всего оценить динамику осадков на длительных временных масштабах нескольких веков и (б) для получения итогового ряда — выполнена коррекция систематической ошибки данных моделирования, которая как раз в том числе и вызвана грубым пространственным разрешением глобальной климатической модели и недоучётом мезомасштабных эффектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка качества воспроизведения температуры воздуха и атмосферных осадков моделями CMIP6 за период наблюдений. Статистические характеристики сравнения данных моделей

CMIP6, реконструкций и данных метеостанций за общие периоды пересечения всех данных для каждого показателя представлены на рис. 2 и в табл. 3. Для средней летней (июнь–сентябрь) температуры воздуха за период наблюдений самый высокий коэффициент корреляции получен для модели MRI-ESM2.0 (0.4) (см. табл. 3), но средние значения по ней занижены (см. рис. 2, а), наилучшее соответствие средних значений показывает модель ACCESS-ESM-1-5, коэффициент корреляции по которой составляет 0.3, как и по модели INM-CM-4-8, но она завышает средние значения (см. рис. 2, а, в). Модель MIROC-ES2L исключена из дальнейшего анализа, так как данные по температуре воздуха значительно завышены за исторический период. Отмечено, что коэффициент корреляции дендрорекострукции по летней температуре воздуха (Dolgorova, 2016) с данными метеостанции Терскол составляет 0.8 (см. табл. 3), что подтверждает вывод о том, что данная реконструкция может быть использована для восстановления климата района Эльбруса.

Сравнение суммы осадков за холодный период (см. рис. 2, б, г; табл. 3) показывает, что модель MRI-ESM2.0 завышает сезонную сумму в 1.4 раза, а модели ACCESS-ESM-1-5 и INM имеют сходные значения, более близкие к данным по Терсколу. Единственная модель, по данным которой обнаружена ненулевая, но тоже крайне низкая корреляция, — модель ACCESS-ESM-1-5 (см. табл. 3). Функции распределения модельных суточных сумм осадков (см. рис. 2, б) показывают, что по модельным данным осадки малой интенсивности (менее 1 мм) случаются в 5–7 раз чаще, чем наблюдаемые на ГМС Терскол. Это известный для

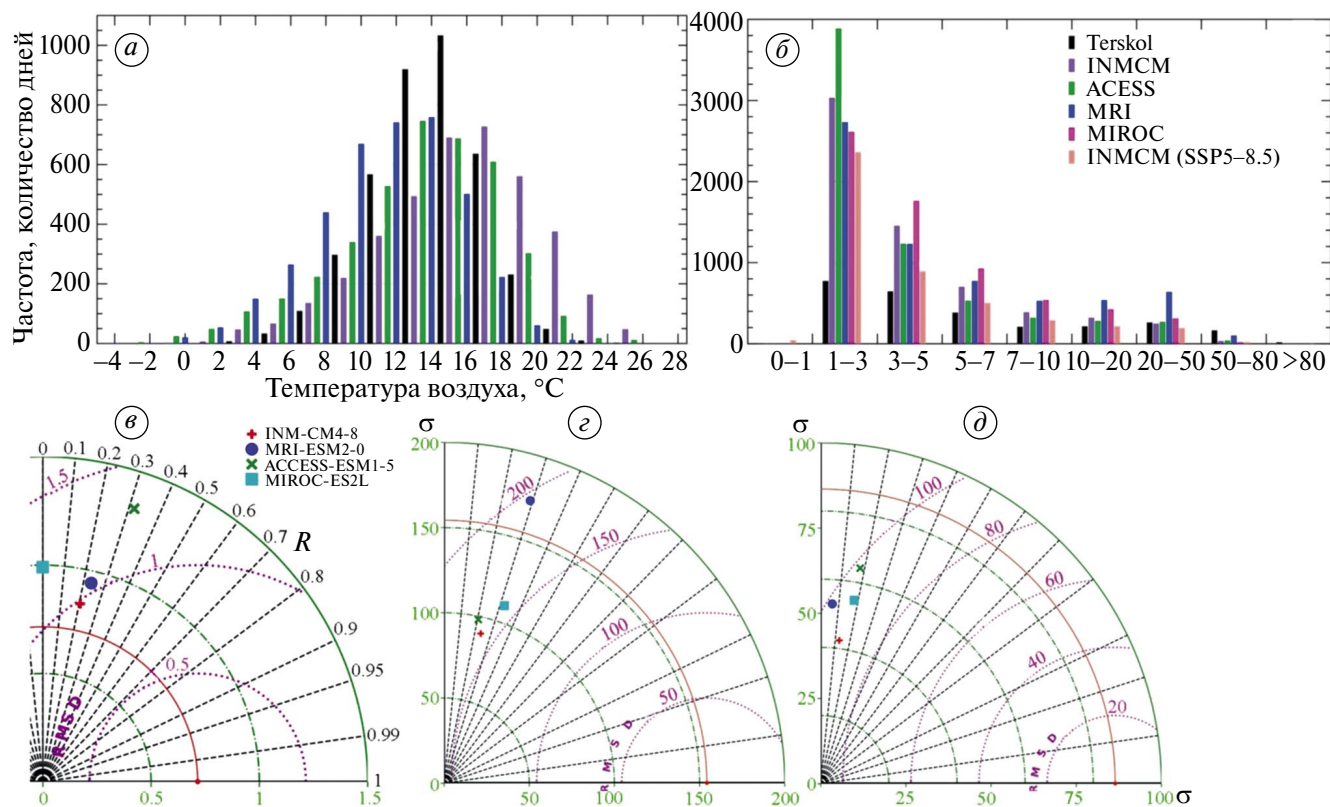


Рис. 2. Гистограммы распределения среднесуточной летней (июнь–сентябрь) температуры воздуха (а) и среднесуточной суммы осадков за месяцы холодного периода (октябрь–апрель) (б); диаграммы Тейлора для средней летней температуры воздуха (июнь–сентябрь) в районе Эльбруса (в), суммы осадков за октябрь–апрель в районе Эльбруса (г), суммы осадков за май–июль в районе метеостанции Бахмаро (д)

Fig. 2. Histograms of the distribution of average daily summer (June–September) air temperature (а) and average daily precipitation for the months of the cold period (October–April) (б); Taylor diagrams for average summer air temperature (June–September) in Elbrus area (в), the amount of precipitation for October–April in Elbrus area (г), the amount of precipitation for May–July in Bakhmaro area (д)

всех климатических моделей drizzle effect, когда в модельных данных вместо нулевого количества осадков появляется много значений “около нуля” (Stephens et al., 2010; Lazoglou et al., 2024). В остальных диапазонах (особенно 1–3, 3–5 мм) модели также завышают частоту возникновения осадков, но не воспроизводят экстремальные осадки высокой интенсивности (более 50 мм). Сравнение реконструированных значений аккумуляции, полученной на Западном плато Эльбруса по ледяному керну (Mikhalenko et al., 2024), с суммой осадков за холодный период на метеостанции Терскол показывает, что их средние значения достаточно близки, однако коэффициент корреляции низкий — 0.08, и межгодовая изменчивость аккумуляции гораздо выше (см. табл. 3), что говорит о том, что динамика снегонакопления на Эльбрусе на межгодовом масштабе существенно зависит от местных факторов.

Сравнение суммы осадков за тёплый период в районе дендрорекострукции в Абастумани, Грузия, показывает, что ненулевые коэффициенты корреляции также получены для моделей ACCESS-ESM-1-5 и INM-CM-4-8, но модель ACCESS-ESM-1-5 завышает абсолютные значения суммы осадков по сравнению с данными ближайшей станции Бахмаро в 1.5 раза.

Итак, по результатам сравнения с данными наблюдений на метеостанциях лучше всего воспроизводят температуру воздуха и осадки модели ACCESS-ESM-1-5 и INM-CM-4-8. С учётом трёх статистических характеристик (коэффициент корреляции, стандартное отклонение, корень из среднеквадратической ошибки), отражённых на диаграмме Тейлора (см. рис. 2, в–г), наилучшей оказывается модель INM-CM-4-8.

Таблица 3. Статистические характеристики (коэффициент корреляции с данными метеостанции, максимум, минимум, стандартное отклонение) рядов средних летних температур воздуха (июнь–сентябрь), суммы зимних осадков (октябрь–апрель) за период 1977–2011 гг. по данным метеостанции Терскол, дендрорекострукции и моделям CMIP6; суммы летних осадков (май–июль) за периоды 1936–1964, 1977–1990 гг. по данным метеостанции Бахмаро, дендрорекострукции и моделям CMIP6

Table 3. Statistical characteristics (correlation coefficient with weather station data, maximum, minimum, standard deviation) of series of mean summer air temperatures (June–September), total winter precipitation (October–April) for the period 1977–2011 according to data from the Terskol weather station, dendrochronology, and CMIP6 models; summer precipitation totals (May–July) for the periods 1936–1964 and 1977–1990 based on data from the Bakhmara weather station, dendrochronology, and CMIP6 models

Источник	Температура воздуха					Сумма осадков				
	<i>r</i>	Mean	Max	Min	σ	<i>r</i>	Mean	Max	Min	σ
	1977–2011 (июнь–сентябрь)					1983–2009 (октябрь–апрель)				
Терскол		11.5	13.5	10.1	0.8		563	887	283	165
Реконструкция*	0.8	11.6	13.8	9.9	0.9	0.08	518	1310	80	336
ACCESS-ESM-1-5	0.3	11.8	15.7	9.4	1.3	0.16	430	535	312	67
MRI-ESM2.0	0.4	9.4	11.4	7.5	1.1	–0.08	792	1133	553	114
INM-CM-4-8	0.3	14.2	15.6	12.4	0.9	0.00	473	641	358	72
		Сумма осадков								
		1936–1964, 1977–1990 (май–июль)								
Бахмаро		308	479	179	87					
Реконструкция*	0.57	263	398	145	52					
ACCESS-ESM-1-5	0.16	470	619	324	71					
MIROC-ES2L	0.13	298	429	148	64					
MRI-ESM2.0	–0.01	257	419	122	66					
INM-CM-4-8	0.14	245	370	163	46					

* Для летней температуры воздуха и летних осадков применяются дендрорекострукции, для зимних осадков — аккумуляция по ледяному керну (Mikhailenko et al., 2024).

КЛИМАТ 1466–2014 ГГ. ПО ДАННЫМ РЕКОНСТРУКЦИЙ И МОДЕЛЕЙ CMIP6

Температура воздуха. Модельный эксперимент последнего тысячелетия (850–1849) — “промежуточный” между экспериментами за исторический период и палеоклиматическими экспериментами последнего ледникового максимума или оптимума голоцена. Цель эксперимента past 1000 заключается в оценке отклика на внешние форсинги (орбитальные параметры, солнечная активность, вулканический форсинг, землепользование, парниковые газы) на фоне климатического режима, сходного с современным, а также в выявлении различий влияния внешнего форсинга и внутренней климатической изменчивости (Jungclauss et al., 2017). Поэто-

му данные такого промежуточного эксперимента — достаточно сложные для интерпретации.

Часто для интерпретации модельных результатов анализируется отклик на внешние форсинги. Например, в работе (Wang et al., 2023) проанализирован отклик на вулканические извержения восстановленной по дендрорекострукциям и смоделированной по данным RMP4/CMIP6 температуры воздуха за последнюю тысячу лет в регионе Северной Атлантики (в Восточной Канаде и Западной Европе). В работе показано, что отклик на вулканические извержения во внетропических широтах в модельных данных RMP4/CMIP6 проявился значительно слабее, чем на извержения в тропиках. Отмечено, что в модели INM-CM4-8 отклик на вулканиче-

ские извержения сильно завышен. Модельные оценки MIROC-ES2L за последнее тысячелетие показали сильный отклик глобальной температуры на вулканические извержения, а отклик на остальные внешние форсинги не проявился, возможно, за счёт большой внутренней изменчивости климатической системы (Ohgaito et al., 2020). Эта модель хорошо воспроизвела понижение глобальной температуры в течение малого ледникового периода (далее — МЛП), однако потепление в Средневековье не проявилось. При этом авторы отмечают, что, по-видимому, эта аномалия более характерна для регионального масштаба, а основной причиной возникновения МЛП послужили вулканические извержения. Отмечено, что среди причин возникновения МЛП отмечаются и другие: достаточно большое количество минимумов солнечной активности в этот период (минимумы Вольфа, Спёра, Маундера, Дальтона), а также обратные связи в климатической системе, вызванные похолоданием и соответственным увеличением площади арктического морского льда и альбедо поверхности, замедление термохалинной океанической циркуляции в Северной Атлантике (Phister and Wanner, 2021; Wanner et al., 2022). Продолжительность и время начала и окончания МЛП различна в разных регионах земного шара (Кислов, 2021; Wanner et al., 2022), в европейском регионе МЛП охватывает 1250–1860-е гг., в рамках которого периоды похолодания сменяются кратковременными периодами потепления.

Достаточно работ посвящено анализу данных предыдущей стадии модельных экспериментов PMIP3 (Jungclaus et al., 2010; Fernández-Donado et al., 2013; Phipps et al., 2013; Ljungqvist et al., 2019), в которых показано, что динамика температуры по результатам моделей PMIP3 за последнее тысячелетие на глобальном и континентальном масштабах в целом сходятся с данными реконструкций, в том числе показывают значимые различия между температурами в эпоху потепления Средневековья и МЛП, а также сходные функции спектральной плотности (Fernández-Donado et al., 2013). В работе (Ljungqvist et al., 2019) выполнено сравнение разности температуры воздуха в эпоху потепления Средневековья (950–1250) и во время МЛП (1450–1850) по данным реконструкций и модельных экспериментов PMIP3 — таким образом оценена способность моделей воспроизводить межвековую (низкочастотную) динамику температуры воздуха. Модельные результаты в большинстве районов

Северного полушария показывают значительно меньшие разности в эти два климатических периода, по сравнению с данными реконструкций. Показано, что модельные данные хорошо согласуются с реконструкциями на континентальном масштабе, но на локальном существуют существенные различия. Гораздо более низкая амплитуда температурной изменчивости в моделях по сравнению с реконструкциями может говорить как о недостаточном воспроизведении внутренней климатической изменчивости в модели, так и об отсутствии в моделях какого-то значимого внешнего форсинга или о слабом механизме обратных связей.

По данным для региона Эльбруса, коэффициенты корреляции исходных рядов с годовым разрешением за период 1466–1849 гг. между реконструкциями и данными моделирования температуры воздуха за период XV–XIV вв. практически равны 0, что ожидаемо, учитывая специфику палеоклиматических модельных данных (см. табл. 4). Линейные корреляции скользящих 25-летних аномалий за период 1466–1849 гг. также достаточно низкие — до 0.22. За исторический период 1850–2011 гг. корреляции выше, наиболее высокие значения получены для моделей INM-CM4-8 и ACCESS-ESM-1-5: 0.82/0.60 соответственно. Анализ скользящих коэффициентов корреляции показал, что их значения непостоянны во времени и меняются от -0.4 до 0.4 в зависимости от модели и временного промежутка.

Поскольку период средневековой климатической аномалии выходит за рамки временного периода, рассматриваемого в работе, сравнены средние летние температуры за период МЛП (1466–1849) и за индустриальный период (1850–2011). Модель MRI-ESM2.0 показывает одинаковые летние температуры в среднем за периоды 1466–1849 гг. и 1850–2011 гг., а в моделях INM-CM4-8 и ACCESS-ESM-1-5 разность составляет -0.2 и -0.4 °C соответственно. По данным дендрорекострукции соответствующая разность составляет -0.2 °C.

По данным озёрных отложений, периоды наступания ледников на Западном Кавказе отмечались в три стадии в течение МЛП: 1-я стадия в 1270–1310 гг. и 1370–1410 гг., 2-я стадия в 1500–1630 гг. и 3-я стадия в 1750–1840 гг. (Alexandrin et al. 2023). В то же время значительное наступание ледника Ирик (г. Эльбрус), длина которого составляет около 9.3 км, про-

Таблица 4. Статистические характеристики (коэффициент корреляции исходных рядов годового разрешения (в скобках — 10-летних средних аномалий), максимум, минимум, стандартное отклонение) рядов средней летней температуры воздуха (июнь—сентябрь) за период 1466—1849 гг. и 1850—2011 гг. по данным дендрорекострукции и моделей CMIP6; зимних осадков (октябрь—апрель) за 1750—2009 гг. и летних осадков (май—июль) за период 1761—1849 гг. по данным реконструкций и моделей CMIP6: коэффициент корреляции 25-летних скользящих средних рядов аномалий (r), стандартное отклонение, максимум и минимум абсолютных значений

Table 4. Statistical characteristics (correlation coefficient of the initial series of annual resolution (in brackets — 10-year average anomalies), maximum, minimum, standard deviation) of the series of average summer air temperature (June—September) for the period 1466—1849 and 1850—2011 based on dendrochronological reconstruction and CMIP6 models; winter precipitation (October—April) for 1750—2009 and summer precipitation (May—July) for the period 1761—1849 based on reconstructions and CMIP6 models: correlation coefficient of 25-year moving average anomaly series (r), standard deviation, maximum and minimum absolute values

Источник	Температура воздуха (июнь—сентябрь)									
	r	Mean	Max	Min	σ	r	Mean	Max	Min	σ
	1466—1849					1850—2011				
Реконструкция		11.0	13.5	8.4	0.8		11.2	13.8	8.9	0.8
ACCESS-ESM-1-5	0.04 (0.17)	11.0	13.9	8.4	0.89	0.16 (0.60)	11.4	15.7	9.3	1.0
MRI-ESM2.0	0.03 (0.05)	9.4	11.3	6.9	0.72	0.11 (0.41)	9.4	11.7	7.1	0.9
INM-CM-4-8	0.07 (0.22)	13.3	15.9	7.6	1.09	0.24 (0.82)	13.5	15.6	10.8	0.9
Сумма осадков 1750—2009 (октябрь—апрель)					Сумма осадков 1761—2014 (май—июль)					
	r	Mean	Max	Min	σ	r	Mean	Max	Min	σ
Реконструкция		582	1700	60	391		261	431	98	56
ACCESS-ESM-1-5	0.05 (0.23)	425	606	239	66	0.05 (0.35)	484	796	295	85
MIROC-ES2L	0.16 (–0.12)	601	782	358	76	0.10 (0.11)	317	520	148	66
MRI-ESM2.0	0.02 (–0.59)	815	1204	549	113	–0.08 (0.00)	274	448	122	67
INM-CM-4-8	–0.11 (0.34)	477	666	325	69	0.11 (0.33)	253	427	136	54

изошло около 1600—1700 л.н. (Solomina et al., 2023). Достаточно большое количество отрицательных аномалий, по модельным данным, сосредоточено как раз в промежутке 1600—1700 гг., а данные дендрорекострукции показывают более значительные эпизоды похолодания в 1470—1550 гг. (рис. 3). Общее отступление ледников началось в 1840-х гг. с небольшими периодами положительного баланса массы в 1860—1880-х гг. и в 1910, 1920 и 1970—1980-х гг. Ледник Большой Азау в XX веке в целом отступал, но были небольшие периоды наступания: в 1911, 1930—1932 и 1972—1981 гг. Преобладание положительных аномалий температуры после 1840-х гг. показывает модель ACCESS-ESM-1-5.

Несколько периоды наступания и отступления ледников Эльбруса совпадают с эпизодами похолодания и потепления? Как отмечено во многих работах, реакция ледников на внешние изменения климата происходит с некоторым запаздыванием, время реакции зависит прежде всего от размеров ледника (Harrison et al., 2001), от его длины и толщины (Johannesson et al., 1989; Harrison et al., 2001; Cuffey and Paterson, 2010). Маленькие ледники реагируют на изменения климата быстрее, поэтому, в частности, в эпоху современного потепления климата больше всего сократились и внесли вклад в увеличение уровня моря ледники малых размеров (Gardner et al., 2013). В (Wanner et al. 2022) показано, что Алечский ледник — самый большой ледник в Альпах, у которого длина бо-

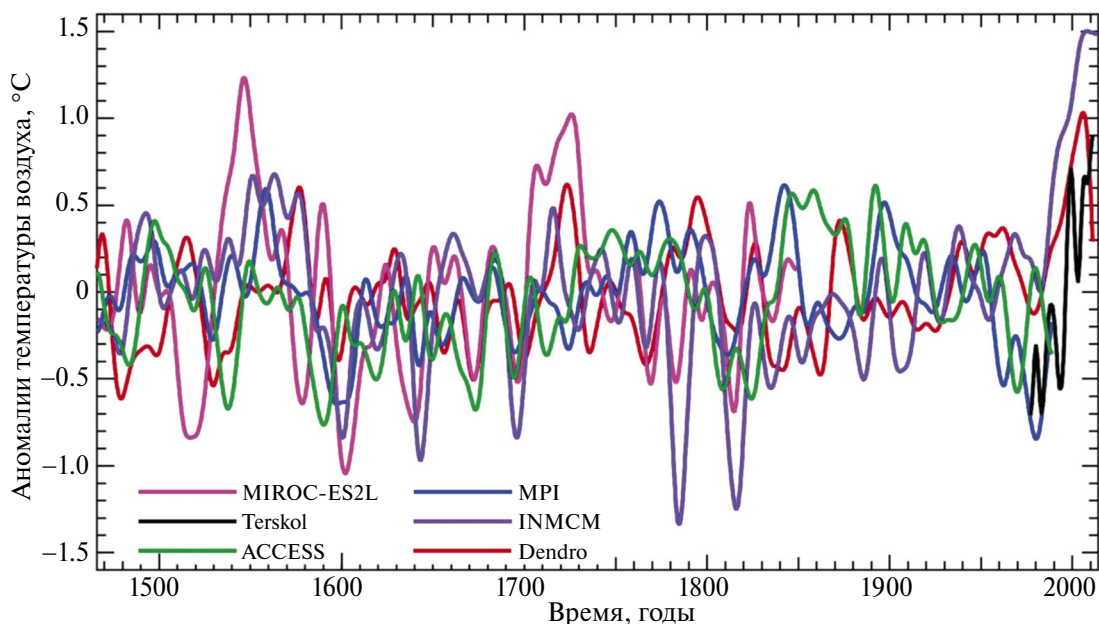


Рис. 3. Ряды сглаженных биномиальным фильтром аномалий летней температуры воздуха (июнь–сентябрь) относительно среднего за период 1466–2011 гг. по данным дендрорекострукции (Dolgova, 2016), метеостанции Терскол и по данным климатических моделей CMIP6

Fig. 3. Series of summer air temperature anomalies smoothed by a binomial filter (June–September) relative to the average for the period 1466–2011 according to dendroreconstruction (Dolgova, 2016), Terskol weather station and according to CMIP6 climate models

лее 20 км и толщина льда более 800 м, имеет время реакции на внешние климатические изменения, в частности на МЛП, более 50 лет, в то время как ледники длиной порядка 10 км реагируют гораздо быстрее — около 20 лет, а маленькие ледники порядка нескольких км могут реагировать на климатические изменения в пределах нескольких лет (Haeberli, 1995). Время реакции зависит также и от других факторов, таких как высотный градиент баланса массы (Johannesson et al., 1989), скорость фронтальной абляции, геометрия ледника, рельеф (Raper, Brathwaite, 2009).

Атмосферные осадки. Процесс аккумуляции на Эльбрусе в значительной степени определяется атмосферными осадками, что подтверждается как высокой степенью связи статистических характеристик годовой аккумуляции по керну на Западном плато Эльбруса и годовых сумм осадков по данным наблюдений, так и высокой корреляцией зимней аккумуляции и индекса Северо-Атлантического колебания (Mikhalenko et al., 2024). Аккумуляция на Эльбрусе в летний период в большей степени определяется мезомасштабными процессами, главным драйвером которых является орографический эффект.

Сопоставлены модельные ряды зимних сумм осадков с реконструкцией зимней аккумуляции на Эльбрусе за 1750–2009 гг., полученной по данным ледяного керна (Mikhalenko et al., 2024) (рис. 4, а; см. табл. 4). Так, модель MRI в 1.4 раза завышает зимнюю сумму осадков и имеет отрицательные корреляции с данными реконструкции. Наилучший результат показывают модели INMCM-4-8 и ACCESS-ESM-1-5 (см. табл. 4): за весь период 1750–2009 гг. коэффициент корреляции с данными керна составляет 0.34 и 0.23 соответственно, средние сезонные суммы равны 477 и 425 мм, а по данным реконструкции — 582 мм в.э. Преобладание отрицательных аномалий аккумуляции до конца XIX в. и затем её рост в целом совпадает со схожими тенденциями по моделям INMCM-4-8 и ACCESS-ESM-1-5. Рост аккумуляции на рубеже XIX–XX вв. получен для ледника Джанкуат (Дюргеров, Поповнин, 1981) и для ледников Казбека (Кренке, Попова, 1974). Что касается более раннего периода, МЛП характеризовался в основном холодными и снежными зимними сезонами (Pfister, Wanner, 2021; Wanner et al. 2022), что, наоборот, показывают модели MRI-ESM2 и MIROC-ES2L (см. рис. 4, а).

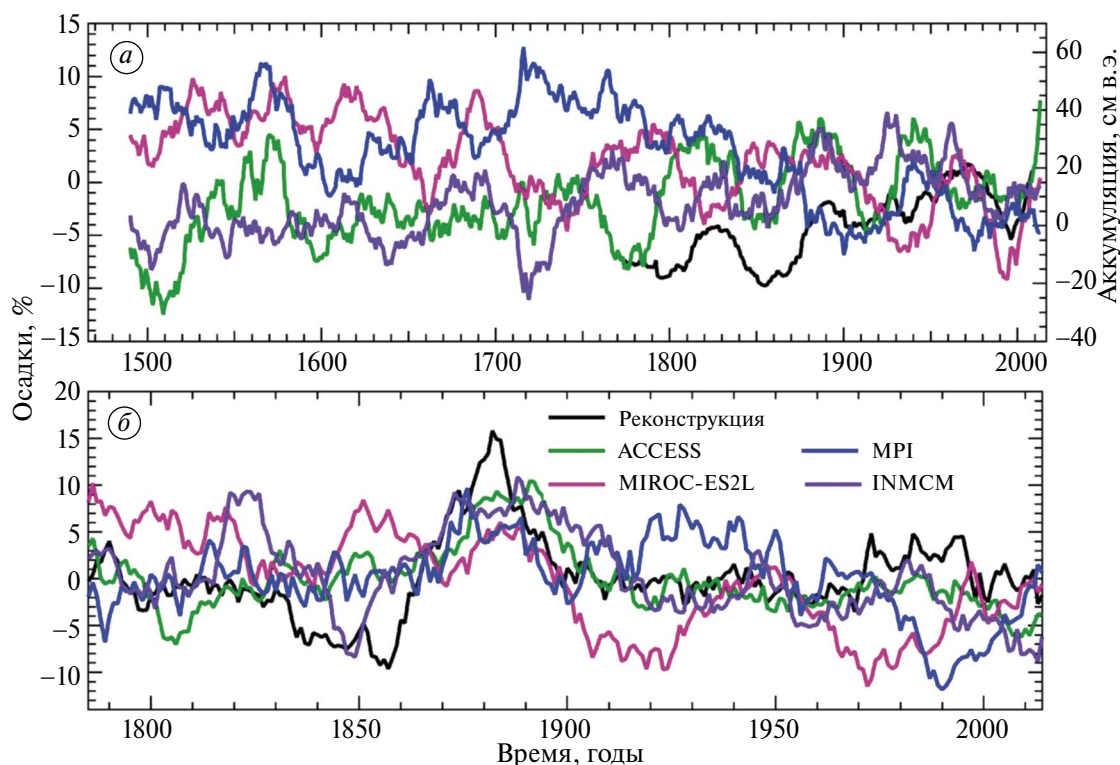


Рис. 4. 25-летние скользящие относительные аномалии (%) осадков за зимний сезон (октябрь–апрель) по моделям CMIP6 для района Эльбруса и реконструированные значения аккумуляции по данным ледяного ядра Эльбруса (Mikhalenko et al., 2024) (а); 25-летние скользящие относительные аномалии (%) осадков за летний сезон (май–июль) по моделям CMIP6 и реконструкция осадков по дендрохронологическим данным в районе Абастумани (Грузия) за 1761–2015 гг. (б)

Fig. 4. 25-year rolling relative anomalies (%) of winter precipitation (October–April) according to CMIP6 models for the Elbrus area and reconstructed accumulation values from Elbrus ice core data (Mikhalenko et al., 2024) (a); 25-year rolling relative anomalies (%) rainfall for the summer season (May–July) according to CMIP6 models and precipitation reconstruction from dendrochronological data in the area of Abastumani (Georgia) from 1761–2015 (b)

Допущено, что качество воспроизведения летних сумм атмосферных осадков глобальными климатическими моделями сопоставимо с таковым для зимних осадков, поэтому проведено также сравнение летних сумм атмосферных осадков за май–июль по четырём моделям CMIP6 и по данным дендрорекострукции в Абастумани (Грузия) (см. рис. 4, б; табл. 4). Модель ACCESS-ESM-1-5 в среднем завышает сумму осадков приблизительно на 80%. Коэффициент корреляции рядов этой модели с данными реконструкции оказался удовлетворительным для исторического периода (1850–2011 гг.), но низким для периода 1761–1849 гг. (см. табл. 4). Самый высокий коэффициент корреляции 25-летних скользящих аномалий получен для моделей ACCESS-ESM-1-5 и INM-CM-4-8. Из четырёх рассмотренных моделей только MRI корректно воспроизводит годовой ход в рассматриваемом районе: максимум осадков приходится на осенне-зимний период, как и по данным наблюдений

на ближайшей доступной метеостанции Бахмаро. Отмечено, что в горных районах глобальные климатические модели часто ошибочно воспроизводят годовой ход осадков, поскольку недоучитывают их конвективную составляющую. В период МЛП по данным реконструкций в Европе наблюдались достаточно часто годы с холодным и влажным летним сезоном, в том числе и с экстремальными наводнениями (Starkel, 2001; Soon, Baliunas, 2003), поэтому в среднем период МЛП должен характеризоваться положительными аномалиями осадков. Положительные аномалии летних осадков за 1466–1849 гг. показали модели INM-CM-4-8 и MRI-ESM2.

По результатам сравнения данных температуры воздуха и осадков с данными наблюдений и реконструкций наилучшими оказались модели ACCESS-ESM1-5 и INM-CM4-8, поэтому для дальнейшей работы решено применять среднее по данным этих двух моделей.

Коррекция систематической ошибки данных моделирования. Итак, для минимизации систематической модельной ошибки в мировой практике повсеместно применяются разные методы коррекции модельных данных, в данной работе — простые методы линейной коррекции (Luo et al., 2018) для температуры воздуха (1, 2) и осадков (3) за период 1983–2014 гг.:

$$T_{M_d}^c = T_{M_d} + (\overline{T_{O_m}} - \overline{T_{M_m}}) \quad (1)$$

$$T_{M_d}^c = \overline{T_{M_m}^c} + \Delta T_{M_d} \times \frac{\sigma_m(T_{O,d})}{\sigma_m(T_{M_d})} \quad (2)$$

$$P_{M_d}^c = P_{M_d} \times \frac{\overline{P_{O_m}}}{P_{M_m}} \quad (3)$$

В (1)–(3) нижний индекс M обозначает данные моделей, нижний индекс O — данные наблюдений, нижний индекс m — среднемесячные данные, нижний индекс d — среднесуточные данные. Верхний индекс c обозначает скорректированные данные. Верхняя черта (например, $\overline{T_{M_m}}$) означает многолетнее осреднение. T — температура воздуха, P — сумма осадков, σ — стандартное отклонение.

Наибольшие отклонения модельной температуры воздуха от наблюдаемой характерны для летних месяцев (табл. 5): модель завышает температуру воздуха (максимум на 5.0 °C в июле).

В зимние же месяцы, наоборот, значения модельной температуры занижены, но ошибка в среднем не превышает 1.3° C. Стандартные отклонения среднемесячной модельной температуры воздуха близки к наблюдаемым. Количество модельных осадков в тёплый сезон оказывается несколько завышено относительно наблюдаемых, а в холодный сезон, наоборот, занижено в 1.4–1.8 раза.

В работе принято допущение, что полученные за исторический период 1983–2014 гг. модельные отклонения температуры воздуха и осадков от данных наблюдений остаются постоянными во времени. В действительности это, конечно, не так. Насколько изменчива величина систематической модельной ошибки? Этому вопросу посвящено некоторое количество работ. В некоторых из них показано, что систематическую модельную ошибку правомерно оценивать на больших временных масштабах порядка нескольких десятилетий, когда долгопериодный климатический сигнал преобладает над естественной внутренней климатической изменчивостью (Teutschbein, Seibert, 2013; Maraun, and Widmann, 2018). В новой работе (Weathers et al., 2025) оценено влияние метода и периода коррекции данных моделирования на будущие прогностические оценки баланса массы ледников в разных районах земного шара, показано, что в кавказском регионе выбор периода коррекции (2000–2019 или 1980–2019 гг.) практически не влияет на распределение температуры и осад-

Таблица 5. Отклонения среднемесячных данных моделирования (модель INM-CM-4-8) от данных наблюдений на ГМС Терскол для температуры воздуха и количества осадков в среднем за период 1983–2014 гг. Delta — разность (для температуры воздуха) или отношение (для осадков) средних наблюдаемых и модельных значений; Sigma_ratio — отношение стандартного отклонения наблюдаемых данных к стандартному отклонению модельных данных

Table 5. Deviations of mean monthly modeling data (INM-CM-4-8 model) from observation data at the Terskol Hydrometeorological Station for air temperature and precipitation averages for the period 1983–2014. Delta is the difference (for air temperature) or ratio (for precipitation) between the average observed and modeled values; Sigma_ratio is the ratio of the standard deviation of the observed data to the standard deviation of the modeled data

	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха												
Delta, °C	1.26	0.44	-1.59	-1.85	-1.81	-3.62	-5.02	-4.16	-1.25	1.10	0.27	0.58
Sigma_ratio	1.27	1.07	1.12	0.96	1.00	0.85	0.82	0.75	0.75	0.97	1.27	1.29
Атмосферные осадки												
Delta	1.59	1.38	0.98	0.71	0.58	0.71	0.57	0.46	0.84	1.74	1.75	1.81

ков и к концу XXI в. даёт различия в расчётном балансе массы в пределах 5%. В работе проверена динамика модельной ошибки во времени в рассматриваемом кавказском регионе: за последовательные двадцатилетние периоды по данным о температуре воздуха на метеостанции Терскол (1983–2014) и по длинному ряду на метеостанции Сочи (1870–2014), при этом брались ближайшие к метеостанциям точки модельных данных. По данным обеих метеостанций, значения модельного отклонения в зависимости от периода меняются в пределах 0.1–0.7 °C и при этом годовой ход этой ошибки остаётся стабильным — сильное завышение модельных данных по сравнению с данными метеостанций в тёплый период (на 1–5 °C) и занижение в холодный. Таким образом, абсолютные значения модельной ошибки практически во все месяцы значительно превышают её временную изменчивость, поэтому будет правомерным применять единые значения для всего временного интервала: значения, приведённые в табл. 5, — и для коррекции данных палеомоделирования 1466–1850 гг., а также и прогностических данных 2015–2100 гг. Таким образом, получены единые скорректированные ряды среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков 1466–2100 гг.

Прогностические оценки температуры воздуха и количества осадков до 2100 г. Единые ряды аномалий температуры воздуха и количества осадков по скорректированным модельным данным для региона Эльбруса приведены на рис. 5. При самом мягком сценарии изменения климата (SSP1-2.6) температура воздуха в регионе в середине века стабилизируется на уровне аномалии +2 °C относительно современного климата (1981–2010 гг.), а при самом жёстком (SSP5-8.5) к концу века аномалия достигает +6 °C (см. рис. 5, а). Отмечено, что аномалия температуры за последние пять веков по сравнению с современным периодом 1981–2010 гг. отрицательна.

Поскольку в аккумуляцию на Эльбрусе вносят вклад твёрдые атмосферные осадки как во время холодного (апрель–октябрь), так и во время тёплого сезона (май–сентябрь), то проанализированы аномалии количества осадков за оба сезона. Установлено, что вплоть до начала XVII в. в основном преобладали отрицательные аномалии количества зимних осадков по сравнению с современным уровнем, а начиная с середины XIX в. и на протяжении почти всего XX в., наоборот, положительные аномалии (см. рис. 5, б). В среднем по всем

сценариям в XXI в. ожидается рост количества зимних осадков и почти во всех сценариях ожидаются положительные аномалии количества зимних осадков на протяжении всего XXI в., за исключением самого мягкого сценария SSP1-2.6, в котором ожидается примерно современный уровень осадков в начале XXI в. Во всех сценариях прогнозируется уменьшение количества зимних осадков в 2010–2030-х гг. и их стабилизация на уровне аномалии от +8 до +20% в зависимости от сценария. Замечено, что наибольшее количество зимних осадков во второй половине XXI в. ожидается в сценарии SSP3-7.0, а не в сценарии SSP5-8.5. При этом статистическое распределение суточных значений осадков по данным модели INMCM-4-8 к концу века не меняется.

Летние атмосферные осадки (см. рис. 5, в), наоборот, по прогнозам, практически во всех сценариях будут сокращаться, за исключением сценария SSP1-2.6, в соответствии с которым в начале столетия осадки будут сокращаться, затем расти к середине столетия и снижаться к его концу.

Оценки изменения баланса массы оледенения Эльбруса за XV–XXI вв. Основная цель работы — получение длинных рядов температуры воздуха и атмосферных осадков для дальнейшего использования в качестве входных параметров в полной гляциологической модели для моделирования оледенения Эльбруса. Однако в качестве “первого приближения” интересно посмотреть на динамику баланса массы ледников за последние шесть веков как функцию только температуры и осадков, используя простые регрессионные соотношения. Попытки такой реконструкции баланса массы ледников уже делались ранее в некоторых других работах. Так, в (Роготаева, Тарасова, 2000) сделана реконструкция баланса массы ледника Гарабаши на основе линейной регрессии метеорологических данных и данных об измеренных составляющих баланса массы за период 1905–1995 гг. Для расчёта абляции применена летняя температура воздуха, а для расчёта аккумуляции — сумма осадков за гидрологический год (принято во внимание, что на Эльбрусе значительные снегопады бывают летом), при этом для расчёта аккумуляции кроме метеостанции Терскол учтены и метеостанции в Грузии (Местия, Хаиши). Проверка полученных расчётных значений абляции и аккумуляции по данным измерений показала хорошее соответствие: $r = 0.92$ и относительная ошибка 10.8% для

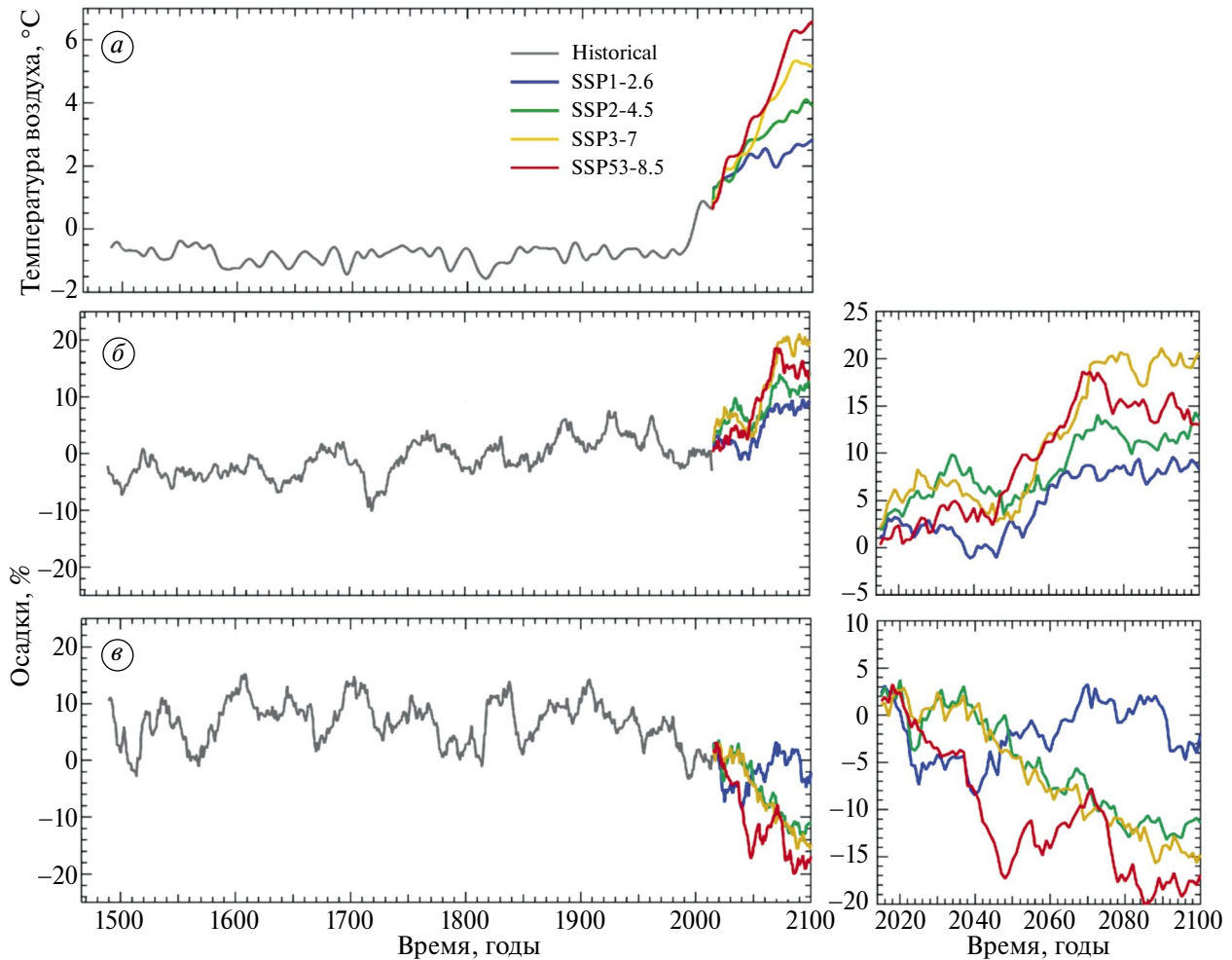


Рис. 5. Скользящие средние за 25 лет аномалии среднелетней (июнь–сентябрь) температуры воздуха по данным среднего двух моделей INM-CM4-8 и ACCESS-ESM1-5 (а) и аномалии сумм атмосферных осадков за холодный период (апрель–октябрь) (б) и за теплый период (май–сентябрь) (в) в районе г. Эльбрус за 1466–2100 гг. Увеличенные фрагменты динамики атмосферных осадков после 2020 г. на рис. б–в приведены справа. Аномалии рассчитаны относительно среднего за период 1981–2010 гг.

Fig. 5. 25-years moving averages of summer (June–September) air temperatures by the average data of 2 models INM-CM4-8 and ACCESS-ESM1-5 (a) and precipitation anomalies for the cold period (April–October) (б) and for the warm period (May–September) (в) in Elbrus region for the years 1466–2100. Enlarged fragments of precipitation dynamics after 2020 at Figure б–в are presented by the right hand. Anomalies are calculated from the average of the years 1981–2010

абляции, $r = 0.94$ и относительная ошибка 5.6% для аккумуляции. Результаты реконструкции показали, что межгодовые колебания баланса массы ледника Гарабаша определяются в большей степени температурой воздуха. В работе (Долгова и др., 2013) представлена реконструкция баланса массы ледника Гарабаша за более длительный период — 1800–2005 гг. по дендрохронологическим данным о температуре воздуха, полученным в Тебердинском заповеднике. Полученная реконструкция показала рост баланса массы в 1830–1860-х гг., что подтверждается историческими данными и датировками морен (Соломина и др., 2012). В (Linderholm et al., 2007)

реконструирован баланс массы ледника Сторго (Швеция) на основе дендрорекострукции летней температуры воздуха и зимних индексов циркуляции атмосферы. Реконструкция оледенения в Британской Колумбии, Канада (Wood, Smith, 2012), на основе дендрохронологических данных с 1780-х гг. показала, что главным драйвером в вариациях баланса массы служит сокращение твёрдых осадков в зимний период с середины 1700-х гг.

В работе абляция оценена с помощью температурно-индексного подхода, который широко применяется для глобальных и региональных

оценок таяния ледников на больших временных масштабах порядка нескольких десятилетий, в том числе в известных глобальных гляциологических моделях (Hock, 1999, 2003; Hock et al., 2019; Litt et al., 2019; Чернов и др., 2019). В большинстве случаев учитывается зависимость абляции от суммы градусодней с положительной температурой воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за период таяния через коэффициент таяния ($\text{мм}/^{\circ}\text{C}/\text{день}$), который подбирается на основе данных наблюдений. В данном случае — ряды со среднемесячным разрешением, и для расчёта абляции применена простая эмпирическая формула Кренке—Ходакова (Кренке, Ходаков, 1966), которая была получена по данным наблюдений за суммарной абляцией на ледниках в разных районах земного шара:

$$A = (T_d + 10)^3, \quad (4)$$

где A — абляция, $\text{мм}/\text{год}$; T_d — средняя температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$, над поверхностью льда за летний период (июнь—август).

Для корректного расчёта по формуле (4) необходимо сначала оценить вертикальный градиент температуры γ . Для этого расчётная абляция на леднике Гарабаши (на южном склоне Эльбруса) сравнивалась с инструментальными наблюдениями за 1984–2014 гг. Сравнение производилось в стометровых высотных поясах, и по его результатам определено оптимальное значение $\gamma = -0.57^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (через минимизацию среднеквадратической ошибки). После определения γ на леднике Гарабаши рассчитана абляция для всего ледникового массива Эльбруса с 1466 по 2100 г. Для этого Эльбрус поделён на высотные зоны с интервалом 500 м. Абляция для всей ледниковой системы рассчитывалась как средневзвешенное по площади каждой зоны. Поскольку оценить γ в доиндустриальный период не представляется возможным, упомянутое выше значение градиента применялось для расчётов за весь период моделирования, что, разумеется, является существенным допущением.

Для этого же временного интервала рассчитана и аккумуляция для всего Эльбруса, учтены суммы осадков за холодный период (с ноября по май). Отмечено, что величина осадков на Эльбрусе зависит не только от высоты, но и от ориентации склонов и их крутизны (Торопов и др., 2022). В частности, показано, что на южных и юго-западных склонах Эльбруса осадков выпадает вдвое больше, чем на северо-восточных и вос-

точных. Соответственно, определение пространственного распределения аккумуляции с помощью простой модели аккумуляции не представляется реалистичным. В работе (Elagina et al., 2025) получена карта средней многолетней толщины снежного покрова Эльбруса, и на этой основе выведен коэффициент, на который умножается количество твёрдых осадков, выпавших за зимний период, для каждой точки расчётной сетки с узлами 250 на 250 м. Данный коэффициент позволяет получить карту распределения снега для каждого балансового года. Также он применялся и в этой работе для учёта пространственной неоднородности поля аккумуляции. Таким образом, в работе аккумуляция рассчитывается посредством умножения суммы осадков за зимний период на средний коэффициент распределения снежного покрова, полученный из среднегодовой карты толщины снега.

На основе рассчитанных рядов абляции и аккумуляции получены ряды баланса массы для ледниковой системы Эльбруса с 1466 по 2014 г. Далее такой же расчёт выполнен и по прогностическим данным для 2015–2100 гг. в соответствии с четырьмя сценариями SSP. Полные ряды баланса массы представлены на рис. 6. Для сравнения показан также баланс массы, рассчитанный тем же способом, но с учётом данных дендрореконовструкций температуры воздуха и данных аккумуляции по ледяному керну на Западном плато Эльбруса.

Баланс массы, рассчитанный по данным палеореконовструкций, показывает положительные значения в 1750–1800 и 1850–1930 гг., что согласуется с данными реконструкций оледенения Кавказа, однако отрицательный баланс массы Эльбруса на протяжении XIX в. и во второй половине XX в. не соответствует палеоклиматическим свидетельствам о состоянии ледников (Alexandrin et al. 2023; Solomina et al., 2023). В работах (Кренке, Попова, 1974; Дюргеров, Поповнин, 1981; Рототаева, Тарасова, 2000) показано, что баланс массы ледников Кавказа (в том числе ледника Гарабаши) в начале XX в. слаболожительный или нулевой, в середине века — отрицательный, а затем во второй половине XX в. снова стал положительным. Это означает, что предложенный простейший метод расчёта баланса массы — абляции по формуле Кренке—Ходакова и аккумуляции через усреднённый снежный коэффициент, не всегда хорошо работает для такой сложной системы, как Эльбрус.

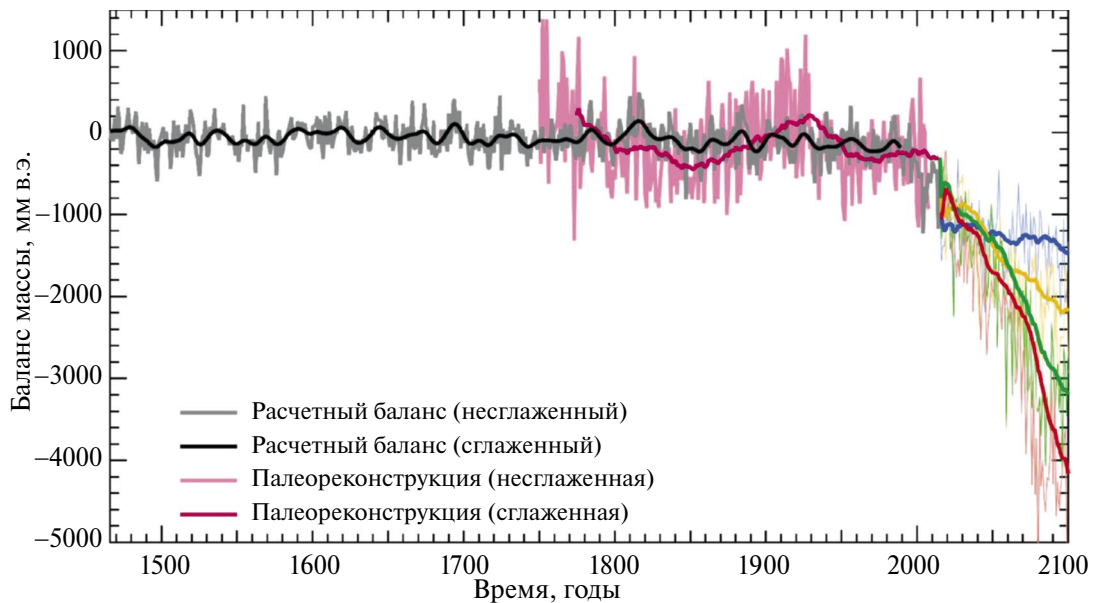


Рис. 6. Баланс массы ледников Эльбруса, рассчитанный по формуле Кренке–Ходакова, исходя из данных моделирования CMIP6 (чёрная и цветные кривые) и рассчитанный по данным палеореконструкций (розовая кривая)

Fig. 6. Elbrus glaciers mass balance, calculated by Krenke–Hodakov method, using CMIP6 model data (black and color lines) and using paleoreconstructions data (pink line)

Баланс массы, рассчитанный с применением модельных данных CMIP6, не показывает значительных различий между значениями в МЛП и в индустриальную эпоху. До 1830-х гг. периоды отрицательных аномалий модельного баланса массы чередуются с периодами слабоположительных значений. Таким образом, получается, что рассчитанный описанным выше способом по модельным данным баланс массы в МЛП не показывает существенного наступания ледников Эльбруса, что, судя по палеоклиматическим данным, также нереалистично. Исходя из вышеизложенного, амплитуда межгодовых, междесятилетних и межвековых разновременных колебаний баланса массы, рассчитанного по модельным данным CMIP6, значительно ниже, чем рассчитанного по данным реконструкций. По расчётным оценкам, в XXI в. в зависимости от сценария баланс массы будет уменьшаться вслед за ростом температуры, особенно интенсивно при сценариях SSP3-7.0 и SSP5-8.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа данных климатических моделей проекта CMIP6 построен синтетический ряд форсинга температуры воздуха и атмосферных осадков за 1466–2100 гг. в районе ледникового комплекса Эльбруса для применения в гляциологическом моделировании.

Он получен на основе выбора лучших для района моделей по итогам сравнения с данными наблюдений и палеореконструкций и коррекции систематической ошибки. Наилучшим образом воспроизвели климат района Эльбруса модели INM-CM-4-8 и ACCESS-1-5. К концу XXI в. по оценкам моделей среднелетняя температура воздуха возрастёт на 2–6 °C в зависимости от сценария климатических изменений, количество зимних осадков возрастёт от 8 до 20% в зависимости от сценария, а количество летних осадков, наоборот, сократится до 20% (кроме сценария SSP3-7.0).

При анализе и сравнении данных выявлены некоторые особенности, которые стоит отметить. Выяснено, что данные моделей CMIP6, как и данные дендрорекоkonструкций температуры воздуха, не показывают сильных различий в средних летних температурах во время МЛП и в индустриальную эпоху — различия составляют лишь 0.2–0.4 °C. Амплитуда колебаний температуры воздуха и осадков, а также баланса массы, рассчитанного по этим характеристикам, на разных временных масштабах по модельным данным CMIP6 значительно ниже, чем по данным реконструкций.

Баланс массы Эльбруса, рассчитанный с помощью простых регрессионных соотношений

(формула Кренке–Ходакова) на основе лишь данных о температуре воздуха и атмосферных осадках в некоторые периоды XIX–XX вв., не согласуется с данными реконструкций колебаний ледников

Благодарности. Оценки баланса массы оледенения Эльбруса выполнены в рамках проекта РНФ № 23-17-00247; анализ данных дендрорекострукции осадков в Абастумани выполнен в рамках темы государственного задания Института географии РАН № FMWS-2024-0004, исследование модельных рядов температуры воздуха и осадков выполнено в рамках темы государственного задания Института водных проблем РАН № FMWZ-2025-0001.

Acknowledgements. Estimates of the mass balance of Elbrus glaciation were carried out with the financial support of the RNF grant No. 23-17-00247; analysis of precipitation dendrochronological data in Abastumani was carried within the framework of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. FMWS-2024-0004, the study of model series of air temperature and precipitation was carried out within the framework of the of the Research Plan of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences No. FMWZ-2025-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19–21 веках // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 379–400.
- Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 34–42. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-34-42>
- Дюргеров М.Б., Поповнин В.В. Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX в. // Материалы гляциологических исследований. 1981. Вып. 40. С. 73–82.
- Корнева И.А., Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Коррекция модельных климатических данных для моделирования горных ледников центрального Кавказа // Системы контроля окружающей среды. 2024. Т. 55. № 1. С. 9–22.
- Корнева И.А., Рыбак О.О., Сатылканов Р.А. Климатические проекции для центрального и внутреннего Тянь-Шаня на основе данных CORDEX // Фундаментальная и прикладная климатология. 2023. Т. 9. № 2. С. 133–164.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // Материалы гляциологических исследований. 1966. Вып. 12. С. 153–163.
- Кренке А.Н., Попова В.С. Реконструкция изменений баланса массы ледников Казбека по метеорологическим данным // Материалы гляциологических исследований. 1974. Вып. 24. С. 264–273.
- Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Торопов П.А. Ледники и климат Эльбруса. М. - СПб.: Нестор-История, 2020. 327 с.
- Рототаева О.В., Тарасова Л.Н. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши за последнее столетие // Материалы гляциологических исследований. 2000. Вып. 88. С. 16–26.
- Соломина О.Н., Бушуева И.С., Кудерина Т.М., Мацковский В.В., Кудиков А.В. К голоценовой истории ледника Уллукам // Лёд и Снег. 2012. Вып. 52 (1). С. 85–94.
- Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 485–503. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040146>
- Чернов Р.А., Кудиков А.В., Вишневца Т.В., Осокин Н.И. Оценка поверхностной абляции и баланса массы ледника Восточный Грэнфьорд (Западный Шпицберген) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 59–66. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-59-66>
- Akkemik U., Aras A. Reconstruction (1689–1994 AD) of April–August Precipitation in the Southern Part of Central Turkey // International Journal of Climatology. 2005. V. 25. № 4. P. 537–548.
- Allen M., Frame D., Kettleborough J., Stainforth D. Model Error in Weather and Climate Forecasting. Cambridge University Press, 2006. P. 391–427.
- Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. Variations of Heat Availability in the Western Caucasus in the Past 1500 Years Inferred from a High-Resolution Record of Bromine in the Sediment of Lake Karakel // Quaternary International. 2023. V. 664. P. 20–32.
- Charnay V., Lowry D.P., Keller E.D., Sood A. Evaluation of Regional Climate Features over Antarctica in the PMIP Past 1000 Experiment and Implications for 21st-Century Sea Level Rise // EGUSphere [preprint]. 2024. P. 2024–3638. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3638>
- Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years et al. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. National Academies Press, 2006.
- Cook E.R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. PhD. University of Arizona. 1985. 183 p.

- Cuffey K.M., Paterson W.S.B.* The Physics of Glaciers. Fourth edition. Amsterdam, etc., Academic Press. 2010. 704 p.
- Dimri A.P., Palazzi E., Daloz A.S.* Elevation Dependent Precipitation and Temperature Changes over Indian Himalayan Region // *Climate Dynamics*. 2022. V. 59. P. 1–21.
- Dolgova E.* June–September Temperature Reconstruction in the Northern Caucasus Based on Blue Intensity Data // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. P. 17–23.
- Dolgova E.A., Solomina O.N.* First Quantitative Reconstruction of Air Temperature for the Warm Period in the Caucasus Based on Dendrochronological Data // *Doklady of Russian Academy of Sciences*. 2010. № 431 (1). P. 371–375.
- Elagina N., Rets E., Korneva I., Toropov P., Lavrentiev I.* Simulation of Mass Balance and Glacial Run-off of Mount Elbrus from 1984 to 2022 // *Hydrological Sciences Journal*. 2025. P. 1–21. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2516080>
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
- esgf-node.ipsl.upmc.fr // Электронный ресурс. URL: <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip6-ipsl/> (Дата обращения: 10.05.2025).
- Fernández-Donado L., González-Rouco J.F., Raible C.C., Ammann C.M., Barriopedro D., García-Bustamante E., Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Luterbacher J., Phipps S.J., Servonnat J., Swingedouw D., Tett S.F.B., Wagner S., Yiou P., Zorita E.* Large-Scale Temperature Response to External Forcing in Simulations and Reconstructions of the Last Millennium // *Climate of the Past*. 2013. V. 9. P. 393–421.
- Gardner A.S., Moholdt G., Cogley J.G., Wouters B., Arendt A.A., Wahr J., Berthier E., Hock R., Pfeffer W.T., Kaser G., Ligtenberg S.R., Bolch T., Sharp M.J., Hagen J.O., van den Broeke M.R., Paul F.* A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009 // *Science*. 2013. V. 340 (6134). P. 852–857.
- Haeblerli W.* Glacier Fluctuations and Climate Change Detection. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1995. V. 18. P. 191–199.
- Harrison W.D., Elsberg D.H., Echelmeyer K.A., Krimmel R.M.* On the Characterization of Glacier Response by a Single Time-Scale // *Journal of Glaciology*. 2001. V. 47. P. 659–664.
- Hock R.* A Distributed Temperature-Index Ice and Snowmelt Model Including Potential Direct Solar Radiation // *Journal of Glaciology*. 1999. V. 45. P. 101–111.
- Hock R.* Temperature Index Melt Modelling in Mountain Areas // *Journal of Hydrology*. 2003. V. 282. Issues 1–4. P. 104–115. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hock R., Bliss A., Marzeion B.* GlacierMIP — A Model Intercomparison of Global-Scale Glacier Mass-Balance Models and Projections // *Journal of Glaciology*. 2019. V. 65. № 251. P. 453–467. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.22>
- Holmes R.L.* Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. V. 43. P. 69–78.
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti F., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Käab A.* Accelerated Global Glacier Mass Loss in the Early Twenty-First Century // *Nature*. 2021. V. 592 (7856). P. 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- IPCC, 2021:* Summary for Policymakers. In: *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, 2021. P. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jóhanesson T., Raymond C., Waddington E.* Time-Scale for Adjustment of Glaciers to Changes in Mass Balance // *Journal of Glaciology*. 1989. V. 35. P. 355–369.
- Joussaume S., Taylor K.* Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) // 1995. V. 92. P. 425–430.
- Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Timmreck C., Reick C.H., Brovkin V., Six K., Segschneider J., Giorgetta M.A., Crowley T.J., Pongratz J., Krivova N.A., Vieira L.E., Solanki S.K., Klocke D., Botzet M., Esch M., Gayler V., Haak H., Raddatz T.J., Roeckner E., Schnur R., Widmann H., Claussen M., Stevens B., Marotzke J.* Climate and Carbon-Cycle Variability over the Last Millennium // *Climate of the Past*. 2010. V. 6. P. 723–737. <https://doi.org/10.5194/cp-6-723-2010>
- Jungclaus J.H., Bard E., Baroni M., Braconnot P., Cao J., Chini L.P., Egorova T., Evans M., González-Rouco J.F., Goosse H., Hurtt G.C., Joos F., Kaplan J.O., Khodri M., Klein Goldewijk K., Krivova N., LeGrande A.N., Lorenz S.J., Luterbacher J., Man W., Maycock A.C., Meinshausen M., Moberg A., Muscheler R., Nehrbaas-Ahles C., Otto-Bliessner B.I., Phipps S.J., Pongratz J., Rozanov E., Schmidt G.A., Schmidt H., Schmutz W., Schurer A., Shapiro A.I., Sigl M., Smerdon J.E., Solanki S.K., Timmreck C., Toohey M., Usoskin I.G., Wagner S., Wu C.-J., Yeo K.L., Zanchettin D., Zhang Q., Zorita E.* The PMIP4 Contribution to CMIP6 — Part 3: The Last Millennium, Scientific Objective, and Experimental Design for the PMIP4 Past1000 Simulations // *Geoscientific Model Development*. 2017. V. 10. P. 4005–4033. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017>

- Lalande M., Ménégos M., Krinner G., Naegeli K., Wunderle S.* Climate Change in the High Mountain Asia in CMIP6 // *Earth System Dynamics*. 2021. V. 12. P. 1061–1098. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-43>
- Larsson L.* CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 7.6. 2013. <http://www.cybis.se/forfun/dendro/>
- Lazoglou G., Economou T., Anagnostopoulou C., Zittis G., Tzirkalli A., Georgiades P., Lelieveld J.* Multivariate Adjustment of Drizzle Bias Using Machine Learning in European Climate Projections // *Geoscientific Model Development*. 2024. V. 17. P. 4689–4703. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-4689-2024>.
- Linderholm H.W., Jansson P., Chen D.* A High-Resolution Reconstruction of Storglaciären Mass Balance Back to 1780/1781 Using Tree-Ring Data and Circulation Indices // *Quaternary Research*. 2007. V. 67. P. 12–20.
- Litt M., Shea J., Wagnon P.* Glacier Ablation and Temperature Indexed Melt Models in the Nepalese Himalaya // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. 5264. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41657-5>
- Ljungqvist F.C., Zhang O., Brattstrom G., Krusic P.J., Seim A., Li Q., Zhang Q., Moberg A.* Centennial-Scale Temperature Change in Last Millenium Simulations and Proxy-Based Reconstructions // *Journal of Climate*. 2019. V. 32. P. 2441–2482. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0525.1>
- Luo M., Liu T., Meng F.* Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China // *Water*. 2018. V. 10. P. 1046.
- Maraun D.* Bias Correcting Climate Change Simulations — a Critical Review // *Current Climate Change Reports*. 2016. V. 2. P. 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Maraun D., Widmann M.* Cross-Validation of Bias-Corrected Climate Simulations Is Misleading // *Hydrology Earth System Science*. 2018. V. 22. P. 4867–4873.
- Martin-Benito D.* Tree-Ring Reconstructed May–June Precipitation in the Caucasus Since 1752 CE // *Climate Dynamics*. 2016. V. 47. № 9. C. 3011–3027.
- Mikhailenko V., Kutuzov S., Toropov P., Legrand M., Sokratov S., Chernyakov G., Lavrentiev I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobiev M., Khairedinova A., Lipenkov V.* Accumulation Rates over the Past 260 Years Archived in Elbrus Ice Core, Caucasus // *Climate of the Past*. 2024. V. 20. P. 237–255. <https://doi.org/10.5194/cp-20-237-2024>
- Monteverde C., De Sales F., Jones C.* Evaluation of the CMIP6 Performance in Simulating Precipitation in the Amazon River Basin // *Climate*. 2022. V. 10. № 8. P. 122. <https://doi.org/10.3390/cli10080122>
- Ohgaito R., Yamamoto A., Hajima T., Oishi R., Abe M., Tatebe H., Abe-Ouchi A., Kawamiya M.* PMIP4 Experiments Using MIROC-ES2L Earth System Model // *Geoscientific Model Development*. 2021. V. 14. P. 1195–1217. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1195-2021>
- Pfister G.C., Wanner H.* *Climate and Society in Europe: the Last Thousand Years*. Bern: Haupt, 2021. 400 p.
- Phipps S.J., McGregor H.V., Gergis J., Gallant A.J.E., Neukom R., Stevenson S., Ackerley D., Brown J.R., Fischer M.J., T.D. van Ommen.* Paleoclimate Data–Model Comparison and the Role of Climate Forcings over the Past 1500 Years // *Journal of Climate*. 2013. V. 26. P. 6915–6936. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00108.1>
- Raper S.C.B., Braithwaite R.J.* Glacier Volume Response Time and Its Links to Climate and Topography Based on a Conceptual Model of Glacier Hypsometry // *The Cryosphere*. 2009. V. 3. 183–194.
- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christofer A., Rudolf B., Ziese M.* GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges Built on GTS-Based and Historic Data. 2011. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCP/FD_M_V7_050
- Soon W., Baliunas S.* Proxy Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years // *Climate Research*. 2003. V. 23. V. 2. P. 89–110. <http://www.jstor.org/stable/24868339>
- Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhailenko V., Matskovsky V.* Glacier Variations in the Northern Caucasus Compared to Climatic Reconstructions over the Past Millennium // *Global Planetary Change*. 2016. V. 140. P. 28–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
- Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S.* First ¹⁰Be Dates of Late Holocene Moraines of the Kashkatash and Irik Glaciers, Northern Caucasus // *Ice and Snow*. 2023. V. 63. № 3. P. 410–425.
- Solomina O., Jomelli V., Bushueva I.S.* Chapter 19. Holocene Glacier Variations in the Northern Caucasus, Russia. In *European Glacial Landscapes*. Tanarro, Elsevier, 2024. P. 353–365. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99712-6.00005-2>
- Starkel L.* Extreme Rainfalls and River Floods in Europe During the Last Millennium // *Geographia Polonica*. 2001. V. 74. № 2. P. 69–79.
- Stephens G.L., L'Ecuyer T., Forbes R., Gettelmen A., Golaz J.-C., Bodas-Salcedo A., Suzuki K., Gabriel P., Haynes J.* Dreary State of Precipitation in Global Models // *Journal of Geophys. Research*. 2010. V. 115. D24211. <https://doi.org/10.1029/2010JD014532>
- Teutschbein C., Seibert J.* Is Bias Correction of Regional Climate Model (RCM) Simulations Possible for Non-Stationary Conditions? // *Hydrology and Earth Sys-*

- tem Sciences. 2013. V. 17. № 12. P. 5061–5077.
<https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>
- Tielidze L.G., Jomelli V., Nosenko G.A. Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 256. P. 2–26.
- Top S., Kotova L., De Cruz L., Aniskevich S., Bobylev L., De Troch R., Gnatiuk N., Gobin A., Hamdi R., Kriegsmann A., Remedio A.R., Sakalli A., Vyver H.V.D., Schaeybroeck B.V., Zandersons V., De Maeyer Ph., Termonia P., Caluwaerts S. Evaluation of Regional Climate Models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° Resolution over the CORDEX Central Asia Domain // *Geoscientific Model Development*. 2021. V. 14. P. 1267–1293.
- Wang F.D., Arseneault E., Boucher F., Gennaretti F., Lapointe S.Yu., Francus P. Volcanic Imprints in Last-Millennium Land Summer Temperatures in the Circum-North Atlantic Area // *Journal of climate*. 2023. V. 36. P. 5923–5939.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0107.1>
- Wanner H., Pfister C., Neukom R. The Variable European Little Ice Age // *Quaternary Science Reviews*. 2022. V. 287. P. 107531.
- Wood L.J., Smith D.J. Climate and Glacier Mass Balance Trends from ad 1780 to Present in the Columbia Mountains, British Columbia, Canada // *The Holocene*. 2012. V. 23. № 5. P. 739–748.
<https://doi.org/10.1177/0959683612465450>
- Weathers M., Rounce D.R., Fasullo J., Maussion F. Evaluating the Role of Internal Climate Variability and Bias Adjustment Methods on Decadal Glacier Projections // *Earth's Future*. 2025. V. 13, e2024EF005624.
<https://doi.org/10.1029/2024EF005624>
- Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y. CMIP6 Evaluation and Projection of Temperature and Precipitation over China // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2021. V. 38. № 5. P. 817–830.
<https://doi.org/10.1007/s00376-021-0351-4>
- Yukimoto S., Kawai H., Koshiro T., Oshima N., Yoshida K., Urakawa S., Tsujino H., Deushi M., Tanaka T., Hosaka M., Yabu S., Yoshimura H., Shindo E., Mizuta R., Obata A., Adachi Y., Ishii M. The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2019. V. 97. P. 931–965.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Zemp M., Huss M., Thibert E. Global Glacier Mass Changes and Their Contributions to Sea-Level Rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. V. 568. P. 382–386.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
- Zhang X., Hua L., Jiang D. Assessment of CMIP6 Model Performance for Temperature and Precipitation in Xinjiang, China // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2022. V. 15. I. 2. P. 100128.
<https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>
- Zhu H., Jiang Z., Li J., Li W., Sun C. Does CMIP6 Inspire More Confidence in Simulating Climate Extremes over China? *Advances in Atmospheric Sciences*. 2020. V. 37. № 107. P. 1119–1132.
<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9289-1>
- Ziehn T., Chamberlain M.A., Law R.M., Lenton A., Bodman R.W., Dix M., Stevens L., Wang Y.-P., Sribnovsky J. The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5 // *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*. 2020. V. 70. P. 193–214.
<https://doi.org/10.1071/ES19035>

Citation: Korneva I.A., Rybak O.O., Dolgova E.A., Elagina N.E. Reconstruction of Climate and Glaciers on Mount Elbrus in the XV–XXI Centuries by CMIP6 Model Data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 8–32. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010024

Reconstruction of Climate and Glaciers on Mount Elbrus in the XV–XXI Centuries by CMIP6 Model Data

© 2026 I. A. Korneva^{a,b,#}, O. O. Rybak^{b,c,d}, E. A. Dolgova^a, N. E. Elagina^a

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

^b*Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia*

^c*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia*

^d*H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia*

[#]*e-mail: comissa@mail.ru*

Received May 15, 2025; revised October 6, 2025; accepted December 29, 2025

The main objective of this work is to create long-term series of air temperature and precipitation for the 15th–21st centuries to model the glaciation of Mount Elbrus. For this purpose, CMIP6 climate models' data for the period 1466–2100 were used. Statistical comparison of model series with different

types of observations and paleoreconstructions were carried out: meteorological observations on weather stations, dendrochronological reconstructions of air temperature and precipitation, reconstruction of snow accumulation on the West Elbrus Plateau by ice core data. The comparison showed that the paleoclimatic model data for XV–XIX centuries can be compared with data from paleoreconstructions on time scales more than decades. The best match with observations and reconstructions is obtained by the set of criteria over different periods of times for the INM-CM4-8 and ACCESS-ESM1-5 models. Systematic errors of the selected models were eliminated using a linear correction based on monthly average anomalies calculated from the observations at Terskol weather station. It is shown that the amplitude of air temperature and precipitation fluctuations, as well as the mass balance calculated from these characteristics, at different time scales according to CMIP6 model data are significantly lower than according to reconstruction data. It was found that the mass balance of the Elbrus glaciers, calculated using simple regression relationships based only on data on air temperature and precipitation in several periods of the 19th–20th centuries does not agree with reconstruction data of glacier oscillations. The final prognostic series by the end of 2100 yr. show an increase in air temperature by 2–6 °C depending on the climate change scenario, the amount of winter precipitation will increase from 8 to 20% depending on the scenario, and the amount of summer precipitation, on the contrary, will decrease to 20% (except for the SSP3-7.0 scenario).

Keywords: climate projections, climate reconstruction, climate models, CMIP6 project, Elbrus, glacier mass balance

REFERENCES

- Volodin E.M., Diansky N.A., Gusev A.V.* INMCM4 Earth System model: Simulation and Prediction of Climate Changes in the 19th–21st Centuries. *Izvestia RAN. Fizika Atmosferi i Okeana*. Izvestiya RAS. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2013, 49 (4): 379–400 [In Russian].
- Dolgova E.A., Matskovsky V.V., Solomina O.N., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Khmelevskoy I.V.* Reconstructing Mass Balance of Garabashi Glacier (1800–2005) Using Dendrochronological data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (1): 34–42 <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-34-42> [In Russian].
- Dolgova E.A., Solomina O.N.* First Quantitative Reconstruction of Air Temperature for the Warm Period in the Caucasus Based on Dendrochronological Data. *Doklady of Russian Academy of Sciences*. 2010, 431 (1): 371–375. [In Russian].
- Durgerov M.B., Popovnin V.V.* Reconstruction of the Mass Balance, Spatial Position and Liquid Runoff of the Dzhankuat Glacier from the Second Half XIX. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1981, 40: 7382. [In Russian].
- Korneva I.A., Rybak O.O., Rybak E.A.* Correction of Model Climate Data for Modelling Mountain Glaciers of the Central Caucasus. *Sistemy Kontrolya Okruzhayushchej Sredy*. Systems of Environmental Control. 2024, 55 (1): 9–22. [In Russian].
- Korneva I.A., Rybak O.O., Satylkanov R.* Climate Projections for the Central and Inner Tien Shan Based on CORDEX Data. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2023, 9 (2): 133–164. [In Russian].
- Krenke A.N., Hodakov V.G.* On the Relationship Between Surface Melting of Glaciers and Air Temperature. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–163. [In Russian].
- Krenke A.N., Popova V.S.* Reconstruction of Changes in the Mass Balance of Kazbek Glaciers Based on Meteorological Data. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1974, 24: 264–273. [In Russian].
- Mikhaleenko V.N., Kutuzov S.S., Lavrent'yev I.I., Toropov P.A.* *Ledniki i klimat El'brusa*. Glaciers and Climate of Elbrus. Moscow — Sankt-Peterburg: Nestor-History, 2020: 327 p. [In Russian].
- Rototaeva O.V., Tarasova L.N.* Reconstruction of the Mass Balance of the Garabashi Glacier over the Last Century. *Materialy Glyaciologicheskikh Issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 16–26. [In Russian].
- Solomina O.N., Bushueva I.S., Kuderina T.M., Matskovsky V.V., Kudikov A.V.* On the Holocene History of the Ullukam Glacier. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 52 (1): 85–94. [In Russian].
- Toropov P.A., Shestakova A.A., Yarinich Yu.I., Kutuzov S.S.* Modelling the Orographic Component of Precipitation Using Elbrus as an Example. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (4): 485–503. [In Russian].
- Chernov R.A., Kudikov A.V., Vshivtseva T.V., Osokin N.I.* Estimation of the Surface Ablation and Mass Balance of Eustre Grønfjordbreen (Spitsbergen). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (1): 59–66; [In Russian].
- Akkemik U., Aras A.* Reconstruction (1689–1994 AD) of April–August Precipitation in the Southern Part of Central Turkey. *International Journ. of Climatology*. 2005, 25 (4): 537–548.
- Allen M., Frame D., Kettleborough J., Stainforth D.* Model Error in Weather and Climate Forecasting. Cambridge University Press, 2006: 391–427.
- Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V.* Variations of Heat Availability in the Western Caucasus in the Past

- 1500 Years Inferred from a High-Resolution Record of Bromine in the Sediment of Lake Karakel. *Quaternary International*. 2023, 664: 20–32.
- Charnay V., Lowry D.P., Keller E.D., Sood A. Evaluation of Regional Climate Features over Antarctica in the PMIP Past1000 Experiment and Implications for 21st-Century Sea Level Rise. *EGUsphere* [preprint]. 2024: 2024–3638. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3638>
- Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years et al. *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*. National Academies Press, 2006.
- Cook E.R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Ph.D. University of Arizona. 1985: 83 p
- Cuffey K.M., Paterson W.S.B. *The Physics of Glaciers*. Fourth edition. Amsterdam, etc., Academic Press. 2010: 704 p.
- Dimri A.P., Palazzi E., Daloz A.S. Elevation Dependent Precipitation and Temperature Changes over Indian Himalayan Region. *Climate dynamics*. 2022, 59: 1–21.
- Dolgoва E. June–September Temperature Reconstruction in the Northern Caucasus Based on Blue Intensity Data. *Dendrochronologia*. 2016, 39: 17–23.
- Elagina N., Rets E., Korneva I., Toropov P., Lavrentiev I. Simulation of Mass Balance and Glacial Runoff of Mount Elbrus from 1984 to 2022. *Hydrological Sciences Journ.* 2025: 1–21. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2516080>
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9: 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016
- esgf-node.ipsl.upmc.fr: official site. Retrieved from: URL: <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip6-ipsl/> (Last access: May 10, 2025).
- Fernández-Donado L., González-Rouco J.F., Raible C.C., Ammann C.M., Barriopedro D., García-Bustamante E., Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Luterbacher J., Phipps S.J., Servonnat J., Swingedouw D., Tett S.F.B., Wagner S., You P., Zorita E. Large-Scale Temperature Response to External Forcing in Simulations and Reconstructions of the Last Millennium. *Climate of the Past*. 2013, 9: 393–421.
- Gardner A.S., Moholdt G., Cogley J.G., Wouters B., Arendt A.A., Wahr J., Berthier E., Hock R., Pfeffer W.T., Kaser G., Ligtenberg S.R., Bolch T., Sharp M.J., Hagen J.O., van den Broeke M.R., Paul F. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. *Science*. 2013, 340 (6134): 852–857.
- Haerberli W. Glacier Fluctuations and Climate Change Detection. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1995, 18: 191–199.
- Harrison W.D., Elsberg D.H., Echelmeyer K.A., Krimmel R.M. On the Characterization of Glacier Response by a Single Time-Scale. *Journ. of Glaciology*. 2001, 47: 659–664.
- Hock R. A Distributed Temperature-Index Ice and Snowmelt Model Including Potential Direct Solar Radiation. *Journal of Glaciology*. 1999, 45: 101–111.
- Hock R. Temperature Index Melt Modelling in Mountain Areas. *Journal of Hydrology*. 2003, 282 (1–4): 104–115. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hock R., Bliss A., Marzeion B. GlacierMIP — A Model Intercomparison of Global-Scale Glacier Mass-Balance Models and Projections. *Journal of Glaciology*. 2019, 65 (251): 453–467. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.22>
- Holmes R.L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 1983, 43: 69–78.
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti F., Huss M., Dussailant I., Brun F., Kääb A. Accelerated Global Glacier Mass Loss in the Early Twenty-First Century. *Nature*. 2021, 592 (7856): 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *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, 2021: 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jóhanesson T., Raymond C., Waddington E. Time-Scale for Adjustment of Glaciers to Changes in Mass Balance. *Journ. of Glaciology*. 1989, 35: 355–369.
- Joussaume S., Taylor K. Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). 1995, 92: 425–430.
- Jungclaus J.H., Lorenz S.J., Timmreck C., Reick C.H., Brovkin V., Six K., Segschneider J., Giorgetta M.A., Crowley T.J., Pongratz J., Krivova N.A., Vieira L.E., Solanki S.K., Klocke D., Botzet M., Esch M., Gayler V., Haak H., Raddatz T.J., Roeckner E., Schnur R., Widmann H., Claussen M., Stevens B., Marotzke J. Climate and Carbon-Cycle Variability over the Last Millennium. *Climate of the Past*. 2010, 6: 723–737. <https://doi.org/10.5194/cp-6-723-2010>
- Jungclaus J.H., Bard E., Baroni M., Braconnot P., Cao J., Chini L.P., Egorova T., Evans M., González-Rouco J.F., Goosse H., Hurr G.C., Joos F., Kaplan J.O., Khodri M., Klein Goldewijk K., Krivova N., LeGrande A.N., Lorenz S.J., Luterbacher J., Man W., Maycock A.C., Meinshausen M., Moberg A., Muscheler R., Nehrbass-Ahles C., Otto-Bliessner B.I., Phipps S.J., Pongratz J., Rozanov E., Schmidt G.A., Schmidt H., Schmutz W., Schurer A., Shapiro A.I., Sigl M., Smerdon J.E., Solanki S.K., Timmreck C., Toohey M.,

- Usoskin I.G., Wagner S., Wu C.-J., Yeo K.L., Zanchettin D., Zhang Q., Zorita E.* The PMIP4 Contribution to CMIP6 — Part 3: The Last Millennium, Scientific Objective, and Experimental Design for the PMIP4 Past1000 Simulations. *Geoscientific Model Development*. 2017, 10: 4005–4033
<https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017>, 2017
- Lalande M., Ménégot M., Krinner G., Naegeli K., Wunderle S.* Climate Change in the High Mountain Asia in CMIP6. *Earth System Dynamics*. 2021, 12: 1061–1098.
<https://doi.org/10.5194/esd-2021-43>
- Larsson L.* CooRecorder and Cdendro Programs of the Coo Recorder/Cdendro package version 7.6. 2013.
<http://www.cybis.se/forfun/dendro/>
- Lazoglou G., Economou T., Anagnostopoulou C., Zittis G., Tzyrkalli A., Georgiades P., Lelieveld J.* Multivariate Adjustment of Drizzle Bias Using Machine Learning in European Climate Projections. *Geoscientific Model Development*. 2024, 17: 4689–4703.
<https://doi.org/10.5194/gmd-17-4689-2024>
- Linderholm H.W., Jansson P., Chen D.* A High-Resolution Reconstruction of Storglaciären Mass Balance Back to 1780/81 Using Tree-Ring Data and Circulation Indices. *Quaternary Research*. 2007, 67: 12–20.
- Litt M., Shea J., Wagnon P.* Glacier Ablation and Temperature Indexed Melt Models in the Nepalese Himalaya. *Scientific Reports*. 2019, 9: 5264.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-41657-5>
- Ljungqvist F.C., Zhang O., Brattstrom G., Krusic P.J., Seim A., Li Q., Zhang Q., Moberg A.* Centennial-Scale Temperature Change in Last Millennium Simulations and Proxy-Based Reconstructions. *Journal of Climate*. 2019, 32: 2441–2482.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0525.1>
- Luo M., Liu T., Meng F.* Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water*. 2018, 10: 1046.
- Maraun D.* Bias Correcting Climate Change Simulations — a Critical Review. *Current Climate Change Reports*. 2016, 2: 211–220.
<https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Maraun D., Widmann M.* Cross-Validation of Bias-Corrected Climate Simulations Is Misleading. *Hydrol. Earth System Science*. 2018, 22: 4867–4873.
- Martin-Benito D.* Tree-Ring Reconstructed May–June Precipitation in the Caucasus Since 1752 CE. *Climate Dynamics*. 2016, 47 (9): 3011–3027.
- Mikhailenko V., Kutuzov S., Toropov P., Legrand M., Sokratov S., Chernyakov G., Lavrentiev I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobiev M., Khairedinova A., Lipenkov V.* Accumulation Rates over the Past 260 Years Archived in Elbrus Ice Core, Caucasus. *Climate of the Past*. 2024, 20: 237–255.
<https://doi.org/10.5194/cp-20-237-2024>
- Monteverde C., De Sales F., Jones C.* Evaluation of the CMIP6 Performance in Simulating Precipitation in the Amazon River Basin. *Climate*. 2022, 10 (8): 122.
<https://doi.org/10.3390/cli10080122>
- Ohgaito R., Yamamoto A., Hajima T., O'ishi R., Abe M., Tatebe H., Abe-Ouchi A., Kawamiya M.* PMIP4 Experiments Using MIROC-ES2L Earth System Model. *Geoscientific Model Development*. 2021, 14: 1195–1217.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-1195-2021>
- Pfister G.C., Wanner H.* *Climate and Society in Europe: the Last Thousand Years*. Bern: Haupt, 2021: 400 p.
- Phipps S.J., McGregor H.V., Gergis J., Gallant A. J.E., Neukom R., Stevenson S., Ackerley D., Brown J.R., Fischer M.J., T.D. van Ommen.* Paleoclimate Data–Model Comparison and the Role of Climate Forcings over the Past 1500 Years. *Journ. of Climate*. 2013, 26: 6915–6936.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00108.1>
- Raper S.C.B., Braithwaite R.J.* Glacier Volume Response Time and Its Links to Climate and Topography Based on a Conceptual Model of Glacier Hypsometry. *The Cryosphere*. 2009, 3:183–194.
- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Ziese M.* GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. 2011.
https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V7_050
- Soon W., Baliunas S.* Proxy Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years. *Climate Research*. 2003, 23 (2): 89–110. <http://www.jstor.org/stable/24868339>
- Solomina O., Bushueva I., Dolgova E., Jomelli V., Alexandrin M., Mikhailenko V., Matskovsky V.* Glacier Variations in the Northern Caucasus Compared to Climatic Reconstructions over the Past Millennium. *Global Planetary Change*. 2016, 140: 28–58.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
- Solomina O.N., Jomelli V., Bushueva I.S.* First ¹⁰Be Dates of Late Holocene Moraines of the Kashkatash and Irik Glaciers, Northern Caucasus. *Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 410–425.
- Solomina O., Jomelli V., Bushueva I.S.* Chapter 19. Holocene Glacier Variations in the Northern Caucasus, Russia. In *European Glacial Landscapes*. Tanarro, Elsevier, 2024: 353–365.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99712-6.00005-2>
- Starkel L.* Extreme Rainfalls and River Floods in Europe During the Last Millennium. *Geographia Polonica*. 2001, 74 (2): 69–79.
- Stephens G.L., L'Ecuyer T., Forbes R., Gettelmen A., Golaz J.-C., Bodas-Salcedo A., Suzuki K., Gabriel P., Haynes J.* Dreary State of Precipitation in Global Models. *Journ. of Geophys. Research*. 2010, 115: D24211.
<https://doi.org/10.1029/2010JD014532>

- Teutschbein C., Seibert J.* Is Bias Correction of Regional Climate Model (RCM) Simulations Possible for Non-Stationary Conditions? // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17 (12): 5061–5077. <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>
- Tielidze L.G., Jomelli V., Nosenko G.A.* Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades. *Atmosphere*. 2022, 13 (2560): 2–26
- Top S., Kotova L., De Cruz L., Aniskevich S., Bobylev L., De Troch R., Gnatiuk N., Gobin A., Hamdi R., Kriegsmann A., Remedio A.R., Sakalli A., Vyver H.V.D., Schaeybroeck B.V., Zandersons V., De Maeyer Ph., Termonia P., Caluwaerts S.* Evaluation of Regional Climate Models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° Resolution over the CORDEX Central Asia Domain. *Geoscientific Model Development*. 2021, 14: 1267–1293.
- Wang F.D., Arseneault E., Boucher F., Gennaretti F., Lapointe S.Yu., Francus P.* Volcanic Imprints in Last-Millennium Land Summer Temperatures in the Circum-North Atlantic Area. *Journal of climate*. 2023, 36: 5923–5939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0107.1>
- Wanner H., Pfister C., Neukom R.* The Variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*. 2022, 287: 107531.
- Wood L.J., Smith D.J.* Climate and Glacier Mass Balance Trends from ad 1780 to Present in the Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *The Holocene*. 2012, 23 (5): 739–748. <https://doi.org/10.1177/0959683612465450>
- Weathers M., Rounce D.R., Fasullo J., Maussion F.* Evaluating the Role of Internal Climate Variability and Bias Adjustment Methods on Decadal Glacier Projections. *Earth's Future*. 2025, 1313: e2024EF005624. <https://doi.org/10.1029/2024EF005624>
- Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y.* CMIP6 Evaluation and Projection of Temperature and Precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2021, 38 (5): 817–830. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0351-4>
- Yukimoto S., Kawai H., Koshiro T., Oshima N., Yoshida K., Urakawa S., Tsujino H., Deushi M., Tanaka T., Hosaka M., Yabu S., Yoshimura H., Shindo E., Mizuta R., Obata A., Adachi Y., Ishii M.* The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *Journ. of the Meteorological Society of Japan*. 2019, 97: 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Zemp M., Huss M., Thibert E.* Global Glacier Mass Changes and Their Contributions to Sea-Level Rise from 1961 to 2016. *Nature*. 2019, 568: 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
- Zhang X., Hua L., Jiang D.* Assessment of CMIP6 Model Performance for Temperature and Precipitation in Xinjiang, China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2022, 15 (2): 100128. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>
- Zhu H., Jiang Z., Li J., Li W., Sun C.* Does CMIP6 Inspire More Confidence in Simulating Climate Extremes over China? *Advances in Atmospheric Sciences*. 2020, 37 (107): 1119–1132. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9289-1>
- Ziehn T., Chamberlain M.A., Law R.M., Lenton A., Bodman R.W., Dix M., Stevens L., Wang Y.-P., Srbinovsky J.* The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journ. of Southern Hemisphere Earth Systems Science*. 2020, 706: 193–214. <https://doi.org/10.1071/ES19035>