

**КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА****И.А. Корнева^{1,2}, О.О. Рыбак^{1,3,4}, Е.А. Рыбак¹**¹Институт природно-технических систем, г. Севастополь, ул. Ленина, 28*E-mail: comissa@mail.ru*²Институт географии РАН, г. Москва, Старомонетный переулок, 29, стр. 4³Институт водных проблем РАН, г. Москва, ул. Губкина, 3⁴Кабардино-Балкарский государственный университет,
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Для моделирования динамики горных ледников необходимы климатические данные с высоким пространственным и временным разрешением. Оптимальными для прогностических целей являются данные мезомасштабных климатических моделей, адаптированные к региональным особенностям. Поля климатических моделей содержат систематические ошибки, поэтому перед практическим применением их необходимо скорректировать. В результате корректировки и перемасштабирования на сетку с большим пространственным разрешением модельных результатов проекта CORDEX были получены прогностические оценки приземной температуры воздуха и количества осадков для 2091–2100 гг. в соответствии с климатическими сценариями RCP2.6 и RCP8.5. Согласно расчетам максимальное повышение температуры воздуха ожидается в предгорных и равнинных районах в сценарии RCP8.5, и в среднем достигает 7,5°C относительно исторического периода 1977–2005 гг. В районе Эльбруса максимальное повышение температуры воздуха в сценарии RCP8.5 составляет 4°C, а в сценарии RCP2.6 практически не изменится. В годовом ходе максимальное повышение температуры воздуха ожидается с июня по сентябрь. В среднем по всему региону к концу 21-го века осадки возрастут приблизительно на 17% в сценарии RCP8.5, и наибольший рост будет наблюдаться с октября по март. В зоне оледенения, где рост годового количества осадков не превысит 7% в сценарии RCP8.5, и еще меньше в сценарии RCP2.6, вероятно будут складываться условия, способствующие дальнейшей деградации горных ледников – значительный рост температуры воздуха не будет компенсироваться ростом количества зимних осадков.

Ключевые слова: региональная климатическая модель, глобальная климатическая модель, регионализация, коррекция модельных данных, прогноз климата, климатические сценарии, Кавказ, горный ледник.

Поступила в редакцию: 14.12.2023. После доработки: 19.02.2024. Принята к печати: 22.03.2024.

Введение. Современное потепление климата является причиной сокращения горного оледенения по всему Земному шару. В частности, за последние два десятилетия скорость деградации горных ледников удвоилась и составила 267±16 Гт/год [14]. Повышение глобального уровня Мирового океана за счет таяния горных ледников за период 1967–2016 гг. уже составило 27±22 мм в водном эквиваленте (в.э.) [28]. Согласно расчетам на шести глобальных гляциологических моделях в соответствии с «экстремальным» климатическим сценарием RCP8.5, масса всех горных ледников мира к 2100 г. по отношению к уровню

2015 г. сократится на 41±13% (среднее значение по всем моделям), что с учетом ледников на периферии Антарктиды и Гренландии приведет к повышению уровня мирового океана на 200 мм в.э. [12].

Согласно последним оценкам за период 2000–2020 гг. площадь ледников Кавказа сократилась на 1060,9±33,6 км² (23,2±3,8%) [25]. Одна из ориентировочных оценок, полученная путем расчета регрессионных соотношений на основе климатических расчетов по модели ГГО по среднему сценарию (RCP4.5), показала, что к концу 21 в. оледенение Кавказа сократится на 585 км² (76,5%), а

ледниковый сток уменьшится на 74–80% [5].

В последние десятилетия все более актуальными становятся оценки экологических и экономических последствий таяния ледников в горных регионах [21]. В частности, прогноз состояния горных ледников критически важен для хозяйственного планирования и минимизации рисков опасных гидрологических явлений вследствие увеличения ледникового стока на первом этапе потепления [15].

Для моделирования горных ледников и речного стока необходимы климатические данные с высоким пространственным и временным разрешением. Качество и полнота климатических данных оказывает значительное влияние на результаты расчетов. К сожалению, горные районы России не обеспечены достаточным количеством метеорологических станций, в том числе и Кавказский регион. Широко используемый архив Университета Восточной Англии CRU TS (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>) имеет только лишь месячное разрешение по времени, а данные последней версии европейского реанализа ERA5 (пространственное разрешение 25 км) удовлетворительно воспроизводят годовые суммы осадков в горных регионах [10], но содержат ошибки в воспроизведении сезонных сумм (например, оценки летних осадков на Тибете завышены вплоть до 200% [18]), экстремумов [17] и знака тренда [10]. По этим причинам для целей моделирования современного состояния ледников Кавказа и их прогнозирования целесообразно использовать уже готовые прогностические данные мезомасштабных климатических моделей, адаптированные к региональным особенностям. Например, первоначальные оценки по данным одной из моделей проекта CORDEX, SMHI RCA4, показали, что модельная среднегодовая температура воздуха в кавказском регионе занижена на 3–8°C, а осадки в горных завышены практически вдвое по сравнению с данными наблюдений [3]. Поскольку поля, генерируемые климатическими моделя-

ми, содержат систематические ошибки, перед практическим применением их необходимо соответствующим образом скорректировать, используя данные наблюдений. Таким образом, модельные данные требуют проведения процедуры коррекции («bias correction» в англоязычной литературе). В настоящей работе детально разбирается методика коррекции климатических данных эксперимента по региональному моделированию CORDEX в приложении к региону Кавказа. На основе полученных результатов нами анализируются вероятные климатические изменения в регионе, которые ожидаются в конце текущего столетия в соответствии с «минимальным» (RCP2.6) и «максимальным» (RCP8.5) климатическими сценариями.

Исходные данные. Результаты мезомасштабного климатического моделирования в рамках CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) нашли широкое применение в гляциологических приложениях (например, в [27]). В проекте CORDEX собраны климатические проекции до конца XXI века, рассчитанные на разных климатических моделях. Особенность подхода, реализованная в проекте, заключается в том, что в связке работают глобальные климатические модели (ГКМ), на которых рассчитываются глобальные климатические поля с малым пространственным разрешением (от 1° до 5° по горизонтали в зависимости от вида и реализации модели), которые задают граничные условия региональным (мезомасштабным) климатическим моделям (РКМ), которые работают уже на гораздо более детальном пространственном разрешении (11–50 км). Земной шар поделен на 13 макрорегионов, для каждого из которых на различных связках ГКМ+РКМ рассчитываются стандартизованные региональные климатические проекции. В настоящей работе использовались результаты расчетов для региона Центральной Азии (CAS), который включает в себя Кавказский регион. В настоящей работе были использованы три связки из трех ГКМ и двух РКМ:

MPI+REMO (1), CNRM+ALARO-0 (2)
NCC-NorESM1+ REMO (3).

Глобальная компонента (ГКМ):

- MPI (<https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>);
- CNRM-CERFACS (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique1&lang=en>);
- NCC-NorESM1 (<https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/ncc-1>).

Региональная компонента (ПКМ):

- ALARO-0 (<http://euro-cordex.be/meteorview/en/29038078-ALARO-0+model.html>);
- REMO (<https://www.remo-rcm.de/>).

Климатические поля, полученные в рамках эксперимента CORDEX, находятся в свободном доступе на Интернет-ресурсе Всемирной программы исследований климата (WCRP) <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>. Нами бы-

ли использованы модельные данные приземной температуры воздуха (°C) и сумм атмосферных осадков (мм) в суточном разрешении. Исторический период для сопоставления с наблюдениями включает данные 1977–2005 гг., прогнозный – 2006–2100 гг., пространственное разрешение модельных полей – 25 км. Для всех полей была проведена коррекция и регионализация исходных данных моделирования CORDEX с использованием данных наблюдений на 25 сетевых метеорологических станциях на Северном Кавказе (табл. 1, исключение составляет станция Местиа на южном склоне Большого Каказа). Регион включает бассейны рек Терек и Кубань (42,4–45,5° с.ш., 40,7–45,0° в.д., рис. 1).

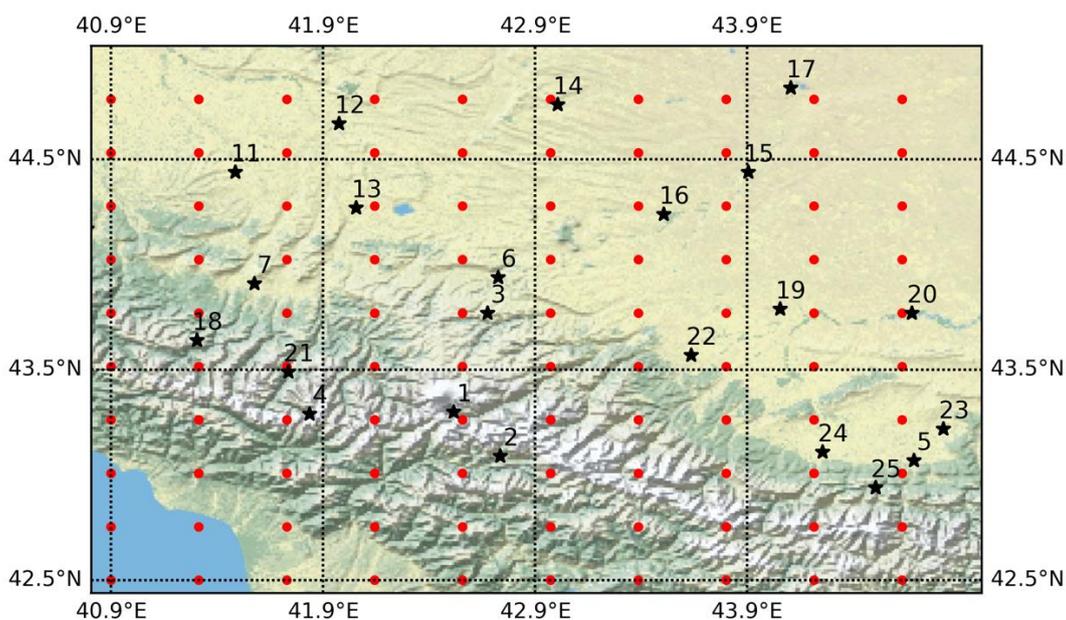


Рис. 1. Область исследования. В границах области расположены ледники Центрального Кавказа и бассейны рек Терека и Кубани. Обозначения: метеорологические станции (черные звездочки), пространственная сетка данных моделирования CORDEX (красные кружки).

Номера станций соответствуют номерам в табл. 1

Fig. 1. Study area. Glaciers of the Central Caucasus and Terek and Kuban river basins are located within the borders of the area. Symbols: weather stations (black stars), spatial grid of model data of the CORDEX (red circles). Numbers of stations correspond to the numbers in table 1

Методы коррекции модельных климатических данных. В настоящее время на практике применяются различные методы статистической коррекции модельных данных. Поскольку статистическое распределение температуры

воздуха и осадков имеет различный вид – температура описывается нормальным распределением, а осадки – экспоненциальным или гамма-распределением, это определяет разный подход к построению коррекционных схем. Рассмотрим ниже

подробно основные методы коррекции данных: методы 1, 3, 4, 5 могут применяться как для температуры воздуха, так и для осадков, метод 2 – только для тем-

пературы воздуха, метод 6 – только для осадков.

1) Линейный метод (linear scaling [20])

$$\begin{aligned} T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} &= T_{RCM_{hist,m,d}} + (\overline{T_{OBS_{hist,m}}} - \overline{T_{RCM_{hist,m}}}) \\ Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} &= Pr_{RCM_{hist,m,d}} \times \frac{\overline{Pr_{OBS_{hist,m}}}}{\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\overline{T_{OBS_{hist,m}}}$ – среднемесячная температура за исторический период по данным наблюдений, $\overline{T_{RCM_{hist,m}}}$ – среднемесячная температура за исторический период по данным моделирования, $T_{RCM_{hist,m,d}}$ – суточная температура по данным моделирования. Для осадков (Pr) – анало-

гичные обозначения. Здесь и далее индекс $hist$ обозначает исторический период, m – среднемесячные значения, d – среднесуточные значения.

2) Линейный метод с учетом дисперсии (variance scaling [20])

$$T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = \overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}} + \Delta T_{RCM_{hist,m,d}} \times \frac{\sigma_m(T_{OBS,m,d})}{\sigma_m(T_{RCM_{hist,m,d}})}, \quad (2)$$

где $\overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}}$ – средняя температура, уже скорректированная по линейному методу (1), σ – стандартное отклонение, $\Delta T_{RCM_{hist,m,d}}$ – аномалия температуры: $\Delta T_{RCM_{hist,m,d}} = T_{RCM,LS,m,d}^{corr} - \overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}}$. Индексы RCM и OBS обозначают соответственно модельные данные и данные наблюдений.

пределения вероятности [25]: распределение модельных данных корректируется в соответствии с функцией распределения данных наблюдений. Обычно предполагается, что данные наблюдений и модели соответствуют определенному выбранному закону распределения вероятностей. Для температуры воздуха чаще всего используется нормальное распределение

3) Коррекция с помощью функции рас-

$$T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = F_N^{-1}[(F_N(T_{RCM_{hist,m,d}} | \mu_{hist,m}, \sigma_{hist,m}^2) | \mu_{obs,m}, \sigma_{obs,m}^2)], \quad (3)$$

где F_N – функция распределения, μ – среднее значение, σ – среднеквадратическое отклонение.

Для моделирования количества осадков оптимальным является использование гамма-распределения

$$Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = F_Y^{-1}(F_Y(Pr_{LOCI_{hist,m,d}} | \alpha_{LOCI,hist,m}, \beta_{LOCI,hist,m}) | \alpha_{obs,m}, \beta_{obs,m}), \quad (4)$$

где F_Y – гамма-функция, $Pr_{LOCI_{hist,m,d}}$ – суточное кол-во осадков по модели, уже скорректированное на частоту и интенсивность (см. метод 6); α – параметр формы, β – параметр масштаба для распределения.

4) Метод квантилей (quantile mapping [11, 20]) – определенный квантиль распределения суточных модельных данных корректируется в соответствии с квантилем распределения данных наблюдений, и далее в соответствии с этим корректируются прогностические данные

$$X_{RCM_{proj,m,d}}^{corr} = Q_{D^p_{X(obs)}} \left[P_{D^p_{X(RCM)}}(X_{RCM_{proj,m,d}}) \right], \quad (5)$$

где X – климатическая характеристика (температура или осадки), $Q_{D_{X(obs)}^p}$ – квантиль вероятности p распределения данных наблюдений, $D_{X(RCM)}^p$ – соответствующая вероятность p распределения данных модели. Выбор вида квантиля и соответственно вида трансформационной функции зависит от задач.

$$T_{RCM_{proj,m,d}}^{corr} = T_{OBS_{m,d}} + (\overline{T_{RCM_{proj,m,d}}} - \overline{T_{RCM_{hist,m,d}}}) \cdot Pr_{RCM_{proj,m,d}}^{corr} = Pr_{OBS_{m,d}} \times \frac{\overline{Pr_{RCM_{proj,m,d}}}}{\overline{Pr_{RCM_{hist,m,d}}}}. \quad (6)$$

6) Коррекция интенсивности и частоты выпадения осадков (Local intensity scaling, LOCI method [16, 20]) – сначала определяется пороговое значение суточной интенсивности осадков для для каждого месяца $Pr_{T,m}$, ниже которого все мо-

5) Дельта-метод: исторические модельные данные приравниваются к данным наблюдения. Далее рассчитывается прогностическая аномалия («дельта», разность в случае температуры воздуха и отношение в случае осадков), которая затем применяется к данным наблюдений [20, 23]

дельные значения отсекаются; затем рассчитывается коэффициент s_m таким образом, чтобы среднее многолетнее значение за месяц по модельным данным совпадало с данными наблюдений

$$s_m = \frac{\overline{Pr_{OBS,m,d}} | Pr_{OBS,m,d} > 0}{\overline{Pr_{RCM,m,d}} | Pr_{RCM,m,d} > Pr_{T,m}} \quad Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = \begin{cases} Pr_{RCM,m,d} \times s_m & | Pr_{RCM,m,d} > Pr_{T,m} \\ 0 & | Pr_{RCM,m,d} < Pr_{T,m} \end{cases} \quad (7)$$

Таблица 1. Метеорологические станции кавказского региона, используемые в работе. Положение метеостанций показано на рис. 1

№№	Метеостанция	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота над у.м., м
1	Терскол	43,26	42,51	2150
2	Местиа	43,05	42,73	2075
3	Шаджатмаз	43,73	42,67	2056
4	Клухорский перевал	43,25	41,83	1850
5	Владикавказ	43,03	44,68	702
6	Кисловодск	43,90	42,72	943
7	Зеленчукская	43,87	41,57	928
8	Ставрополь	45,12	42,08	452
9	Лабинск	44,60	40,70	282
10	Псебай	44,13	40,78	820
11	Отрадная	44,40	41,48	462
12	Невинномысск	44,63	41,97	335
13	Черкесск	44,23	42,05	538
14	Александровское	44,72	43,00	313
15	Зеленокумск	44,40	43,90	229
16	Георгиевск	44,20	43,50	246
17	Буденновск	44,80	44,10	140
18	Архыз	43,60	41,30	2366
19	Прохладная	43,75	44,05	200
20	Моздок	43,73	44,67	127
21	Теберда	43,45	41,73	1345
22	Нальчик	43,53	43,63	420
23	Назрань	43,18	44,82	571
24	Алагир	43,07	44,25	559
25	Кармадон	42,90	44,50	1624

Методы коррекции, в которых используются функции распределения вероятности (3–4), в отличие от линейных методов (1–2), позволяют скорректировать не только средние по выборке величины, но и экстремумы – значения, находящиеся на «хвосте распределения». Для температуры воздуха это не столь актуально – поскольку температура воздуха подчиняется нормальному закону распределения и имеет достаточно однородную пространственную структуру и большой радиус пространственной корреляции [2]. Поэтому модельные ошибки часто сводятся лишь к систематическому завышению или занижению всей выборки и могут удовлетворительно корректироваться линейными методами [27]. Иная картина складывается при коррекции модельных значений количества осадков – при более и менее реалистичном воспроизведении среднего значения, модели (и реанализы тоже) часто некорректно воспроизводят осадки максимальной и минимальной интенсивности [13]. Достаточно эффективным при коррекции минимумов количества осадков и частоты их выпадения является метод 6, т.к. модели нередко завышают частоту осадков слабой интенсивности («drizzle effect» [22]). В нашем исследовании метод 6 не использовался, поскольку во время предварительного тестирования этот метод не позволил получить удовлетворительные результаты.

Коррекция климатических данных для Кавказского региона. Все три использованные связки ГKM+PKM удовлетворительно воспроизводят пространственную структуру поля приземной температуры воздуха, однако существенно занижают абсолютные значения в горных и предгорных районах – на 2–15°C (рис. 2а–в). Однако в поле модельных температур есть достаточно обширный район с отрицательными среднегодовыми температурами, в то время как по данным станций они должны быть положительными. Наиболее реалистичные значения годовых сумм осадков дает модель CAS CNRM-CERFACS (рис. 2г), остальные же две модели завышают осадки в среднем в 1,5–2,0 раза. Анало-

гичное превышение количества осадков по данным моделей из проекта CORDEX Центральной Азии было обнаружено в регионе Тибета [26]. Нами было проведено сравнение нескольких основных методов коррекции данных для температуры и осадков. В качестве критериев оценки качества выполнения процедуры коррекции использовались коэффициент корреляции и абсолютной ошибки (табл. 2), а также сравнение вида годового хода модельных и наблюдаемых данных. Абсолютная ошибка рассчитывалась для каждого узла модельной сетки в области, показанной на рис. 1, условно приведенного к высоте 2000 м, как абсолютная разность между рядом модельных и наблюдаемых значений, которые были получены путем линейной экстраполяции из точки ближайшей метеостанции. В результате были выбраны методы, оптимальные для района исследований и набора входных стационарных данных. Каждый набор из 3-х связок данных ГKM-PKM был скорректирован отдельно, и затем рассчитаны средние поля по трем массивам. Следует отметить, что в среднем по региону коэффициенты корреляции для всех рассмотренных методов коррекции кроме квантильного (метод 4), превысили 0,9 для среднемесячных значений (табл. 2) и 0,6 для среднесуточных. Наименьшая абсолютная ошибка (меньше 1°C, табл. 2) была получена при использовании линейного метода (метод 1) и линейного метода с учетом дисперсии (метод 2), но был выбран последний, так как для точек, расположенных в высокогорных районах, он показал наилучший результат.

Помимо коэффициента корреляции важным критерием выбора метода коррекции явилось сравнение вида годового хода по наблюдаемым и модельным данным. В случае с осадками этот критерий был принципиален, так как модельные данные систематически занижены на Центральном Кавказе в течение летнего сезона, и максимум годового хода приходится на зимний сезон, что противоречит данным наблюдений в высокогорных районах. Оказалось, что ни

один из используемых методов коррекции не дал хорошей сходимости с данными наблюдений - коэффициент корреляции 0,04–0,12, а абсолютная ошибка в среднем за месяц не менее 1 мм/сутки (табл. 2). Несмотря на то, что с помощью линейного метода (1) удалось скорректировать вид годового хода, из-за низкой

корреляции с данными наблюдений, а также из-за наличия выбросов сверхбольших суточных значений было решено использовать метод введения обычной поправки в виде отношения между суточными данными наблюдений и данными модели (дельта-метод 5, ур. 6).

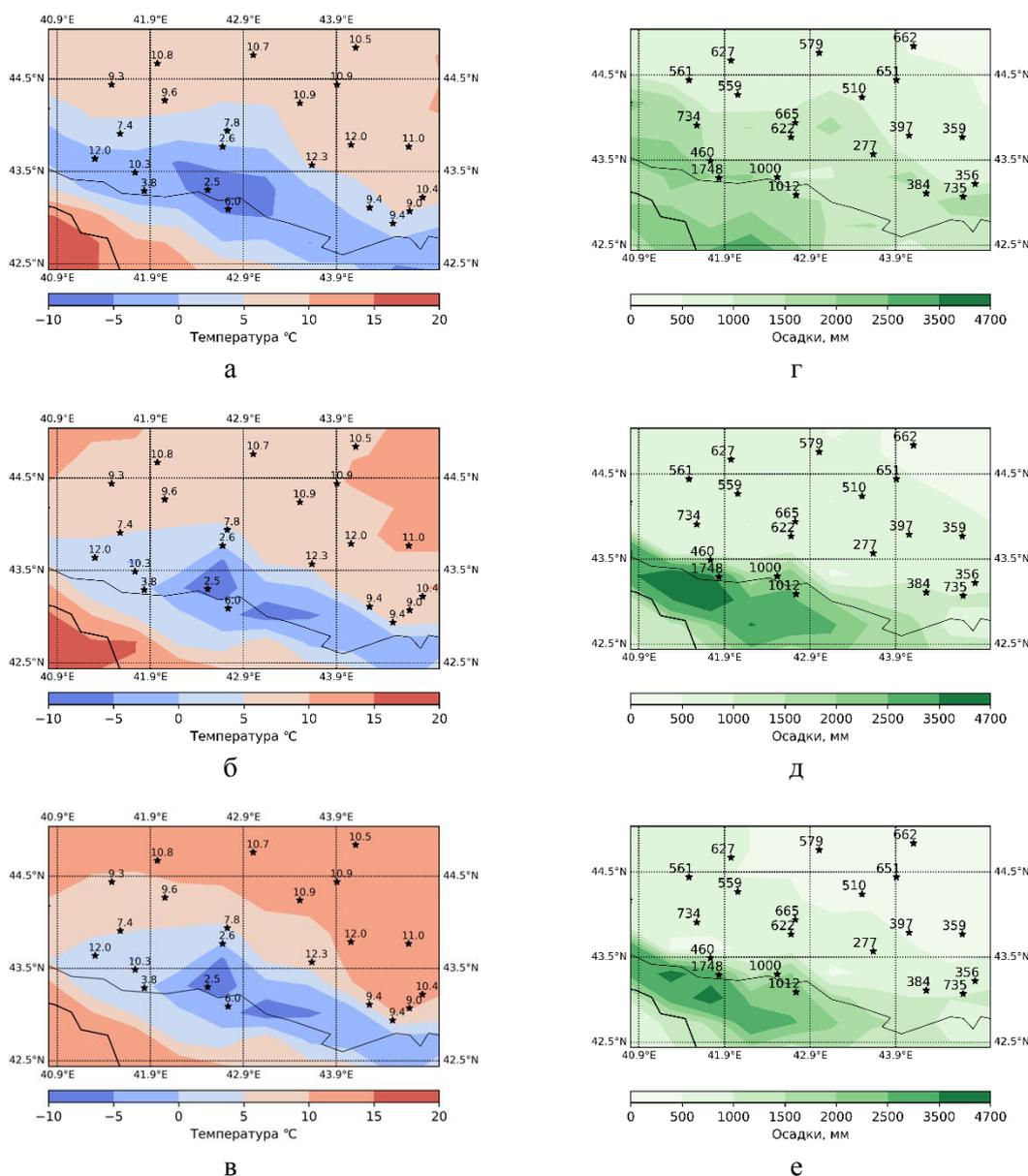


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (а-в) и годовая сумма осадков (г-е) в среднем за исторический период 1977–2005 гг. по данным трех моделей CORDEX: CAS CNRM-CERFACS (а, г), MPI (б-д), NCC-NorESM1 (в-е), и данным наблюдений на метеорологических станциях (черные звездочки)
Fig. 2. Average annual air temperature (а-в) and annual precipitation amount (г-е) averaged over the historical period 1977–2005 yr. according to the data of three models CORDEX CAS CNRM-CERFACS (а, г), MPI (б-д), NCC-NorESM1 (в-е) and observations at the weather stations (marked with the black stars)

Регионализация климатических данных. Регионализация скорректированных данных заключалась в их перемасштабировании из модельной сетки разрешением 25 км в пространственную сетку с разрешением около 1 км для всего кавказского региона и 25 м для района Эльбруса. Для всего региона была использована цифровая модель рельефа ЦМР с разрешением 30 м ALOS Global Digital Surface Model «ALOS World 3D - 30m» (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm). Для района Эльбруса была использована цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная в рамках серии радиолокационных измерений, выполненных отделом гляциологии Института географии РАН в 2017 г. [19].

Процедура регионализации проводилась с использованием заданных постоянных значений вертикальных градиентов температуры воздуха и количества осадков. Для температуры воздуха были взяты значения, рассчитанные по данным наблюдений на метеостанциях кавказского региона (рис. 1, табл. 1). Рассчитанные градиенты составили: $-3,2^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (зима), $-4,3^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (весна), $-5,5^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (лето), $-4,1^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (осень). Согласно выводам [7] эти значения могут быть использованы для всего региона. Например, значение градиента в летний период согласуется с данными наблюдений на южном склоне Эльбруса [4], где вертикальный градиент с мая по август составлял от $-5,3^{\circ}\text{C}/\text{км}$ до $-7,1^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Таблица 2. Сравнение исходных и скорректированных (номер метода коррекции соответствует номеру метода, ур. 1–7) среднемесячных рядов данных о температуре воздуха и количестве осадков с данными наблюдений на метеостанциях за период 1977–2005 гг.: коэффициент корреляции Пирсона и абсолютная ошибка в среднем по 100 модельным точкам региона: а) для температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$); б) для количества осадков (мм/сутки)

Метод коррекции	Коэффициент корреляции			Абсолютная ошибка (MAE)		
	MPI	NCC-NorESM1	CNRM	MPI	NCC-NorESM1	CNRM-CERFACS
Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$)						
Исходные данные модели	0,94	0,94	0,92	3,41	4,38	3,82
(1)	0,98	0,99	0,99	0,74	0,70	0,72
(2)	0,98	0,98	0,98	0,73	0,74	0,76
(3)	0,95	0,95	0,93	1,29	1,26	1,66
(4)	0,94	0,95	0,92	3,47	4,33	3,99
Количество осадков (мм/сутки)						
Исходные данные модели	0,06	0,04	0,08	2,17	2,09	2,12
(1)	0,12	0,11	0,10	0,95	0,99	0,96
(3)	0,06	0,04	0,07	1,26	1,43	1,24
(4)	0,06	0,04	0,08	2,04	2,02	1,97

Более детальные наблюдения на Эльбрусе вплоть до Восточной Вершины [4] показали, что температурный градиент в период абляции составляет $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ в нижней части склона (2150–3850 м) и $-0,7^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ в верхней части склона (3850–5150 м). Что касается вертикального градиента осадков, то он существенно зависит от вертикального профиля температуры воздуха, влагосодержания и скорости ветра в конкретный

момент времени, и поэтому различен в разных частях Кавказского региона и на склонах разной экспозиции. Для расчета орографической составляющей осадков необходимо использовать метеорологические параметры с высоким пространственным разрешением, как по вертикали, так и по горизонтали, поэтому в данной работе ввиду крайней ограниченности исходных данных плювиометриче-

ский градиент был также задан в виде постоянных значений.

Следует отметить, что отрывочные данные о плювиометрическом градиенте на северном склоне Большого Кавказа свидетельствуют о большой неоднородности этой характеристики. Так градиент в бассейне реки Теберда выше 2000 м в период абляции составил 22 мм/100 м, а в период аккумуляции 45 мм/100 м [6]. По данным измерений на леднике Марух вертикальный градиент осадков в диапазоне высот 1500-2500 м составляет около 100 мм/100 м в холодный сезон (октябрь – май) и 60 мм/100 м в теплый сезон [1]. Согласно нашим оценкам, значения градиентов на Западном Кавказе по данным метеостанций Зеленчукская и Клухорский перевал составили для теплого сезона 16,8 мм/100 м, для холодного сезона 67,2 мм/100 м. В настоящей работе нами были использованы рассчитанные значения плювиометрического градиента по данным метеорологических станций Кисловодск, Терскол и Шаджатмаз за период 1977–2005 гг. в среднем для каждого месяца. Для высот ниже 2500 м были получены следующие значения: для теплого сезона (май-сентябрь) 9,2 мм/100 м, для холодного сезона (октябрь-апрель) 25 мм/100 м. В расчетах было принято допущение, что выше 4000 м количество осадков не увеличивается с высотой, так как на этих высотах прекращается рост влагосодержания атмосферы [4].

Прогностические оценки температуры воздуха и количества осадков в 2091–2100 гг. Итоговые осредненные по площадям скорректированные прогностические значения температуры воздуха для сезона абляции и осадков для сезона аккумуляции для 2091–2100 гг. представлены на рис. 3 и 4. Очевидно, что максимальное повышение температуры воздуха ожидается в предгорных и равнинных районах в сценарии RCP8.5, и в среднем достигает 7,5°C относительно исторического периода 1977-2005 гг. (рис. 3а). В высокогорном районе Эльбруса максимальное повышение в сценарии RCP8.5 составляет 4°C, а в сцена-

рии RCP2.6 температура практически не изменится. В годовом ходе максимальное повышение температуры воздуха в среднем по региону произойдет с июня по сентябрь (рис. 3б). Рост осадков в регионе прогнозируется примерно с одинаковой скоростью в обоих сценариях (рис. 4а), при этом в высокогорном районе Эльбруса количество осадков останется практически без изменений. В среднем по всему региону к концу 21-го века осадки возрастут приблизительно на 17%, причем наибольший рост будет наблюдаться в холодную половину года (с октября по март). В зоне оледенения (выше 2000 м, зоны 2 и 3 на рис. 4а), где рост годового количества осадков не превысит 7% в сценарии RCP8.5 и еще меньше в сценарии RCP2.6, вероятно будут складываться условия, способствующие дальнейшей деградации горных ледников – значительный рост температуры воздуха едва ли будет компенсироваться ростом количества зимних осадков. Согласно расчетам на модели HadRM3P [6] к концу 21-го в. в летние месяцы увеличение температуры достигнет 6°C. Расчеты на модели ГГО [9] также показывают наиболее высокое потепление в Кавказском регионе в летние месяцы – до 4-5°C в 2090–2099 гг. (хотя эти оценки несколько ниже нашей - до 8–9 °C в июле-августе) Осадки по расчетам на модели ГГО зимой возрастут в регионе на 0,2 мм/сутки – около 10% [9], что несколько ниже наших оценок.

Заключение. В настоящей статье нами были рассмотрены процедуры коррекции и регионализации модельных климатических данных проекта CORDEX для Кавказского региона. Обе процедуры выполнялись в виде последовательных шагов:

1. Приведение станционных данных и модельных данных к условной единой высоте над у.м. (в нашем случае 2000 м).
2. Интерполяция и экстраполяция данных наблюдений в сетку модели линейным методом.
3. Коррекция исторических и прогностических модельных данных в сетке

каждой из трех связок моделей (разрешение 25 км).

4. Графический контроль скорректированных модельных данных.

5. Осреднение данных трех скорректированных модельных связок.

Далее была выполнена регионализация модельных данных в пространственную сетку с разрешением около 1 км (для всего Центрального Кавказа) и разрешением 25 м для района Эльбруса.

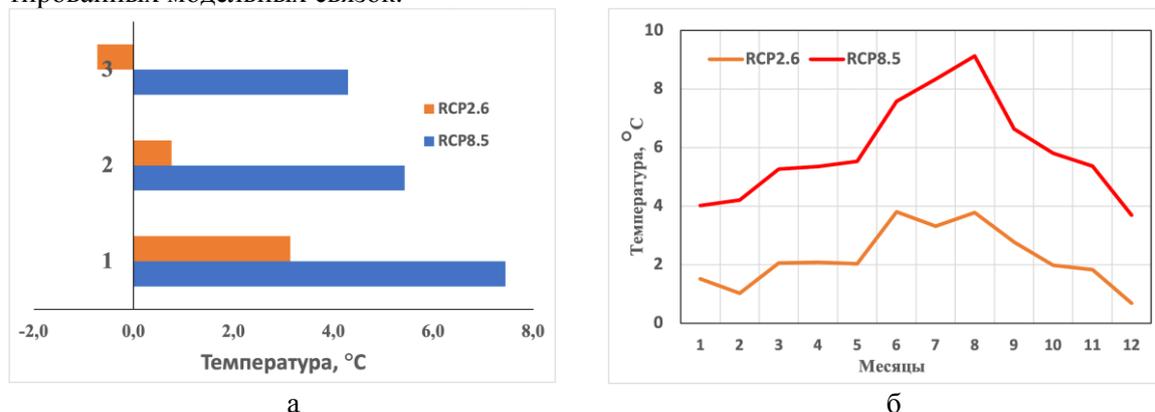


Рис. 3. Прогностические аномалии приземной температуры воздуха (°C) в климатических сценариях RCP2.6 и RCP8.5 в сезон абляции (май-сентябрь) (а), осредненные за период 2091–2100 гг. и по площади для всего Кавказского региона как на рис. 1 (1), для точек с абсолютной высотой более 2000 м над у. м. (2), для района Эльбруса (43,18°–43,35° с.ш., 42,27°–42,43° в.д.).

Годовой ход прогностических аномалий приземной температуры воздуха (°C), осредненные за период 2091–2100 гг. во всем Кавказском регионе (б)

Fig. 3. Spatially averaged prognostic anomalies of the surface air temperature (°C) in the climatic scenarios RCP2.6 and RCP8.5 in the ablation season (May-September) (a) averaged over the period 2091–2100 and over the area of the whole Caucasus region as indicated in fig. 1 (1), over the grid points located higher than 2000 m a. s. l. (2), and over the Elbrus region (43.18°–43.35°N, 42.27°–42.43°E). Annual cycle of the prognostic surface air temperature anomalies (°C), averaged over the period 2091–2100 in the whole Caucasus region in the climatic scenarios RCP2.6 and RCP8.5 (б)

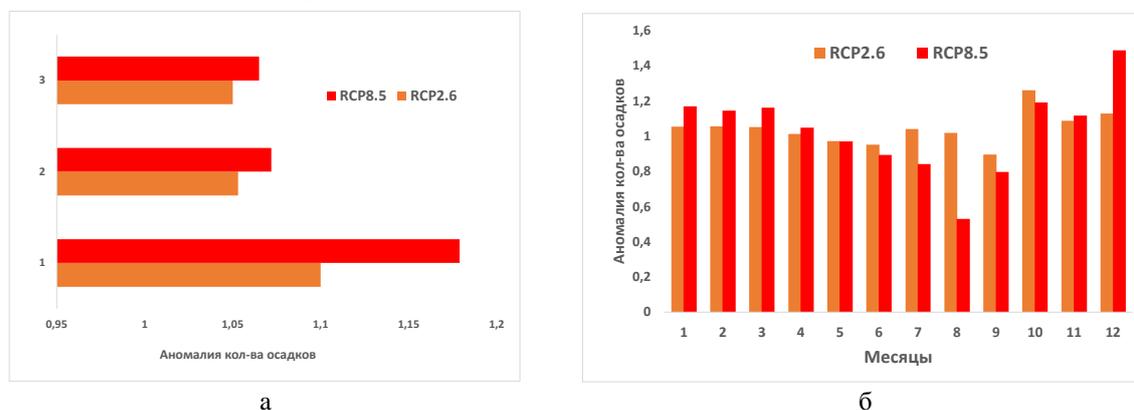


Рис. 4. Прогностические аномалии количества осадков (относительные единицы) в климатических сценариях RCP2.6 и RCP8.5 в сезон аккумуляции (октябрь-апрель) (а), осредненные за период 2091–2100 гг. и по площади для всего Кавказского региона как на рис. 1 (1), для точек с абсолютной высотой более 2000 м над у. м. (2), для района Эльбруса (43,18°–43,35° с.ш., 42,27°–42,43° в.д.).

Годовой ход аномалий количества осадков (относительные), осредненные за период 2091–2100 гг. во всем Кавказском регионе (б)

Fig. 4. Spatially averaged prognostic anomalies of the precipitation amount (relative units) in the climatic scenarios RCP2.6 and RCP8.5 in the accumulation season (October-April) (a) averaged over the period 2091–2100 and over the area of the whole Caucasus region as indicated in fig. 1 (1), over the grid points located higher than 2000 m a. s. l. (2), and over the Elbrus region (43.18°–43.35°N, 42.27°–42.43°E).

Annual cycle of the prognostic anomalies of the precipitation amount (relative units), averaged over the period 2091–2100 in the whole Caucasus region in the climatic scenarios RCP2.6 and RCP8.5 (б)

В результате были построены прогностические поля с пространственным разрешением 1 км для всего региона и 25 м для региона, включающего ледниковый комплекс Эльбруса (температура воздуха и количество осадков) суточного разрешения за каждый год с 1977 по 2100 гг., а также средние многолетние за исторический период 1977–2005 гг. и по прогностическим десятилетиям с 2006 по 2100 гг.

Полученные в работе прогностические поля высокого разрешения могут быть использованы в гидрологических и гляциологических математических моделях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем (№ госрегистрации 124013000609-2).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИВП РАН И.Н. Крыленко и Е.Д. Корниловой за предоставленные данные метеостанций Кавказского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошина А.П. Метеорология горных ледников. Материалы гляциологических исследований. 2002. Вып. 92. С. 3–138.
2. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 360 с.
3. Корнева И.А., Рыбак О.О. Проекция климата на Центральном Кавказе (результаты эксперимента CORDEX) // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4. С. 5–12.
4. Ледники и климат Эльбруса. М., СПб.: Нестор-История. 2020. 372 с.
5. Лурье П.М., Панов В.Д. Изменение современного оледенения северного склона Большого Кавказа в XX в. и прогноз его деградации в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 68–76.
6. Морозова П.А., Рыбак О.О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчета баланса массы горных ледников // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 437–452.
7. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М. и др. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв // Лед и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 5–22.
8. Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лед и Снег. 2016. Т. 56, № 1. С. 5–19.
9. Школьник И.М., Ефимов С.В. Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. 2015. Вып. 576. С. 201–211.
10. Chen Y., Sharma S., Zhou X., et al. Spatial performance of multiple reanalysis precipitation datasets on the southern slope of central Himalaya // Atmospheric Research. 2021. V. 250 (105365)1.
11. Enayati M., Bozorg-Haddad O., Bafrafsan J. et al. Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables // Journal of Water and Climate Change. 2021. V. 12, No. 2. P. 401–419.
12. Hock R., Bliss A., Marzeion B., et al. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections // Journal of Glaciology. 2015. V. 65(251). P. 453–467.
13. Holthuijzen M., Beckage B., Clemens P.J., et al. Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method // Theoretical and Applied Climatology. 2022. V. 149. P. 863–882.
14. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature. 2021. V. 592. P. 726–731.
15. Huss M., Bookhagen B., Huggel C. et al. Toward mountains without permanent snow and ice // Earth's Future. 2017. V. 5. P. 418–435.
16. Ji X., Li Y., Luo X., et al. Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin // Atmospheric Research. 2020. V. 242 (104964).

17. Jiang Q., Li W., Fan Z., et al. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland // *Journal of Hydrology*. 2021. V. 595 (125660).
18. Jiao, D., Xu, N., Yang, F. et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China // *Scientific Reports*. 2021. V. 11 (17956).
19. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A. et al. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7 (153).
20. Luo M., Liu T., Meng F. et al. 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 (1046).
21. Rasul G., Molden D. The Global Social and Economic Consequences of Mountain Cryospheric Change // *Frontiers in Environmental Science*. 2019. V. 7 (91).
22. Schmidli J., Frei C., Vidale P.L. Down-scaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods // *International Journal of Climatology*. 2006. V. 26. No. 5. P. 679–68.
23. Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., et al. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // *Water*. 2020. V. 12 (627).
24. Switanek B.M., Troch A.P., Castro C.L. et al. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. V. 21, No. 6. P. 2649–2666.
25. 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).
26. Top S., Kotova L., De Cruz L. et al. Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.2 resolution over the CORDEX Central Asia domain // *Geoscientific Model Development*. 2021. V. 14. P. 1267–1293.
27. Zekollari H., Huss M., Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 1125–1146.
28. Zemp M., Huss M., Thibert E. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. V. 568. P. 382–386.

CORRECTION OF THE MODEL CLIMATIC DATA FOR SIMULATION OF THE CENTRAL CAUCASUS MOUNTAIN GLACIERS

I.A. Korneva^{1,2}, O.O. Rybak^{1,3,4}, E.A. Rybak¹

¹Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Lenina St., 28.

²Institute of Geography of RAS, Moscow, Staromonetny per., 29, bld. 4

³Institute of Water Problems of RAS, Moscow, Gubkina St., 3

⁴Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Chernyshevskogo St., 173

Modeling the dynamics of mountain glaciers requires climatic data with high spatial and temporal resolution. Therefore, data from mesoscale climate models are optimal for prediction purposes. Generated fields contain systematic errors, so they must be corrected before practical use. Corrected and rescaled results of the CORDEX project were used to obtain estimates of future surface air temperature and precipitation for 2091–2100 in accordance with climate scenarios RCP2.6 and RCP8.5. We found that the maximum increase in air temperature is expected in the RCP8.5 scenario, and on average reaches 7.5°C with respect to the historical period 1977–2005. In the Elbrus area, the maximum increase in the RCP8.5 scenario is 4°C during June–September. In the RCP2.6 scenario, temperature will apparently not change. Averaged over the region, precipitation will increase by approximately 17% by the end of the 21st century under the RCP8.5 scenario, with the largest growth in October–March. In the glaciated zone, the increase in annual precipitation will not exceed 7% in the RCP8.5 scenario, and even less in the RCP2.6 scenario. Therefore,

it is very likely that growth in air temperature will not be compensated by increase in winter precipitation, which will result in further degradation of glaciation

Keywords: regional climate model, global climate model, regionalization, correction of the model data, climate prediction, climatic scenarios, Caucasus, mountain glaciers.

REFERENCES

1. Voloshina A.P. Meteorologija gornyx lednikov (Meteorology of mountain glaciers). *Materialy Giatseologicheskikh Issledovaniy*, 2002, Vol. 92, pp. 3–138.
2. Gandin L.S. and Kagan R.L. Statisticheskiye metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh (Statistical methods for interpretation of the meteorological data). Leningrad: Gidromemteozdat, 1976, 360 p.
3. Korneva I.A. and Rybak O.O. Projektsii klimata na Tsentralnom Kavkaze (rezul'taty eksperimenta CORDEX) (Climate projections for Central Caucasus (CORDEX experiment results)). *Sistemy kontrolya okruzhayushej sredy*, 2020, No. 4 (42), pp. 5–12.
4. *Ledniki i klimat Elbrusa* (Glaciers and climate of Elbrus). Moscow, Saint-Petersburg: Nestor-Istorija, 2020, 372 p.
5. Lur'e P.M. and Panov V.D. Izmeneniye sovremennogo oledeneniya severnogo sklona Bolshogo Kavkaza v XX veke i prognoz jego degradatsii v XXI veke (Changes in present-day glaciation of the northern slope of the Greater Caucasus in the XXth century and the prediction of its degradation in the XXIst century). *Meteorologija i gidrologija*, 2014, No. 4, pp. 68–76.
6. Morozova P.A. and Rybak O.O. Regionalisatsiya dannykh global'nogo klimaticeskogo modelirovaniya dlia rascheta balansa massy gornyx lednikov (Downscaling of the global climate model data for the mass balance calculation of mountain glaciers). *Liod i Sneg*, 2017, Vol. 57, No. 4, pp. 437–452.
7. Rototajeva O.V., Nosenko G.A., and Kerimov A.M. et al. Izmeneniya balansa massy lednika Garabashi (Elbrus) na rubezhe XX-XXI vv. (Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries). *Liod i Sneg*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 5–22.
8. Toropov P.A., Mikhaleiko V.N., and Kutuzov S.S. et al. Temperaturnyy i radiatsionnyy rezhim lednikov na sklonakh Elbrusa v period ablyatsii za posledniye 65 let (Temperature and radiation regime of glaciers on slopes of the Mount Elbrus in the ablation period over last 65 years). *Liod i Sneg*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 5–19.
9. Shkolnik I.M. and Yefimov S.V. Regionalnaya model' novogo pokoleniya dlia territorii severnoy Jevrazii (New generation regional model for the territory of the Northern Eurasia). *Trudy GGO*, 2015, Vol. 576, pp. 201–211.
10. Chen Y., Sharma S., and Zhou X. et al. Spatial performance of multiple reanalysis precipitation datasets on the southern slope of central Himalaya. *Atmospheric Research*, 2021, Vol. 250 (105365).
11. Enayati M., Bozorg-Haddad O., and Bazrafshan J. et al. Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, Vol. 12, No. 2, pp. 401–419.
12. Hock R., Bliss A., and Marzeion B., et al. GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 2015, Vol. 65 (251), pp. 453–467.
13. Holthuijzen M., Beckage B., and Clemens P.J. et al. Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, Vol. 149, pp. 863–882.
14. Hugonnet R., McNabb R., and Berthier E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 2021, Vol. 592, pp. 726–731.
15. Huss M., Bookhagen B., and Huggel C. et al. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 2017, Vol. 5, pp. 418–435.
16. Ji X., Li Y., and Luo X. et al. Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin. *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 242 (104964).
17. Jiang Q., Li W., and Fan Z. et al. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. *Journal of Hydrology*, 2021, Vol. 595 (125660).
18. Jiao D., Xu N., and Yang F. et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11 (17956).
19. Kutuzov S., Lavrentiev I., and Smirnov A. et al. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*, 2019, Vol. 7 (153).

20. Luo M., Liu T., Meng F. et al. 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, Vol. 10 (1046).

21. Rasul G. and Molden D. The Global Social and Economic Consequences of Mountain Cryospheric Change. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, Vol. 7 (91).

22. Schmidli J., Frei C., and Vidale P.L. Down-scaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *Int. Journ. Climatol.*, 2006, Vol. 26, No. 5, pp. 679–68.

23. Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W. et al. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia. *Water*, 2020, Vol. 12 (627).

24. Switanek B.M., Troch A.P., Castro C.L. et al. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, Vol. 21, No. 6, pp. 2649–2666.

25. Tielidze L.G., Jomelli V., and Nosenko G.A. Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades. *Atmosphere*, 2022, Vol. 13 (256).

26. Top S., Kotova L., De Cruz L. et al. Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain. *Geosci. Model Development*, 2021, Vol. 14, pp. 1267–1293.

27. Zekollari H., Huss M., and Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13, pp. 1125–1146.

28. Zemp M., Huss M., Thibert E. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 2019, Vol. 568, pp. 382–386.