

Климатические проекции для центрального и внутреннего Тянь-Шаня на основе данных CORDEX*И.А. Корнева^{1),2)*}, О.О. Рыбак^{2),3),4)}, Р.А. Сатылканов^{5),6)}*

¹⁾Институт географии РАН,
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

²⁾Институт природно-технических систем,
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

³⁾Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3

⁴⁾ФИЦ «Субтропический научный центр РАН»,
Россия 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28

⁵⁾ Тянь-Шанский Высокогорный научный центр при Институте водных проблем и гидроэнергетики НАН КР,
Кыргызстан, 722000, Кызыл-Суу, ул. Пионерская, 9

⁶⁾ Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии,
Кыргызстан, 720040, Бишкек, бульвар Эркиндик

*Адрес для переписки: comissa@mail.ru

Реферат. Климатические изменения в Средней Азии обуславливают сокращение масштабов горного оледенения Тянь-Шаня. Последнее является важнейшим источником стабильного поступления воды в гидрологическую систему этого засушливого региона. Ускоренное таяние ледников создает дополнительные риски для устойчивого развития и региональной водной, энергетической и продовольственной безопасности. В фокусе настоящего исследования находится Центральный и Внутренний Тянь-Шань. Эта территория характеризуется высокой степенью оледенения. На ней находятся истоки одной из важнейших водных артерий Кыргызстана – р. Нарын.

Для физически обоснованного прогнозирования эволюции горного оледенения на долгосрочную перспективу и вызванных им изменений в речном стоке необходимо исходить из модельных проекций регионального климата. Пространственное разрешение в первые десятки километров обеспечивают мезомасштабные (региональные) климатические модели (РКМ), которые используются в связке с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО): первые генерируют климатические изменения на долгосрочную перспективу в планетарном масштабе с разрешением первые сотни километров и обеспечивают граничные условия для РКМ, областью решения которых является пространственно-ограниченный регион. В настоящей работе для целей построения региональных климатических проекций были использованы материалы проекта CORDEX, которые включают варианты прогностических расчетов на трех различных связках МОЦАО-РКМ для обширного

Центральноазиатского региона, к которому относятся Центральный и Внутренний Тянь-Шань. Исходные поля имеют пространственное разрешение около 25 км и разрешение по времени 1 сутки. Исторический период охватывает 1977-2005 гг., прогностический (для климатических сценариев – «умеренного» RCP2.6 и «экстремального» RCP8.5) – 2006-2100 гг.

Систематические ошибки в модельных климатических полях исключаются различными процедурами коррекции. В статье приводится обзор этих процедур и обосновывается выбор оптимальных для целей исследования. Скорректированные поля подвергаются дальнейшей регионализации до пространственного масштаба 1 км. Для проведения этой процедуры используются данные наблюдений на сетевых метеостанциях и автоматических метеостанциях, установленных на ледниках региона.

Было установлено, что в соответствии со сценарием RCP2.6 величина положительной аномалии приземной температуры воздуха в среднем за летний период к концу XXI века не превышает 1.5°C, а по сценарию RCP8.5 достигает 5.5°C относительно исторического периода. В годовом ходе аномалий максимум прогнозируется в осенние и зимние месяцы, минимум – в апреле. В рамках обоих сценариев прогнозируется рост количества осадков, который не превышает 50% в сценарии RCP8.5 в конце столетия в период максимального роста (весной).

Полученные прогностические поля предназначены для использования в гидрологическом и гляциологическом моделировании.

Ключевые слова. Тянь-Шань, горное оледенение, климатические проекции, глобальная климатическая модель, региональная климатическая модель, статистическая коррекция, регионализация.

Climate projections for Central and Inner Tian Shan based on CORDEX data

I.A. Korneva^{1),2)}, O.O. Rybak^{2),3),4)}, R.A. Satylkanov^{5),6)}*

¹⁾ Institute of Geography RAS,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russian Federation

²⁾ Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina str., 299011, Sevastopol, Russian Federation

³⁾ Water Problems Institute RAS,
3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ Subtropical Scientific Center RAS,
2/28, Ya. Fabriziusa str., 354002, Sochi, Russian Federation

⁵⁾ Tien Shan High Mountains Scientific Center at the Institute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic,
9, Pionerskaya str., 722000, Kyzyl Suu, Kyrgyzstan

⁶⁾ Scientific Research Center of Ecology and Environment of the Central Asia,
Erkindik blvd, 720040, Bishkek, Kyrgyzstan

*Correspondence address: comissa@mail.ru

Abstract. Climatic changes in Central Asia cause reduction in the mountain glaciation extent in the Tien Shan. The latter is the most important source of stable water contribution to the hydrological system of this arid region. Accelerated melting of glaciers creates additional risks for sustainable development and regional water, energy and food security. In the focus of our study is the Central and Inner Tien Shan. This area is highly glaciated and upper reaches of the river Naryn, one of the most important waterways of Kyrgyzstan, are located here.

For a physically based long-term prediction of the evolution of mountain glaciation and induced changes in river runoff, it is necessary to start with model projections of the regional climate. Spatial resolution of the first tens of kilometers is provided by mesoscale (regional) climate models (RCMs), which, however, are not intended for long-term forecasts on a time scale of decades. The solution is to use a combination of AOGCMs (Atmospheric and Oceanic General Circulation Models) and RCMs: the former generate long-term climate changes on the planet as a whole with a resolution of a few hundreds of kilometers and provide boundary conditions for the latter, whose operational area is a spatially limited region. In this study, for the purposes of constructing regional climate projections, materials of the CORDEX project were used, which include climate projections simulated by three different AOGCM-RCM pairs for the vast Central Asian region, which includes the Central and Inner Tien Shan. The initial fields have a spatial resolution of about 25 km and a temporal resolution of 1 day. The historical period covers 1977-2005, the prognostic period – 2006-2100 (for two climate scenarios – "moderate" RCP2.6 and "extreme" RCP8.5).

Systematic errors in model climatic fields are eliminated by various correction procedures. In the paper, we provide an overview of these procedures and justify the choice of the optimal ones for the purposes of the research. The corrected fields are further downscaled to a spatial resolution of 1 km. To carry out this procedure, we used observational data from the regular weather stations and automatic weather stations installed directly on the glaciers.

Our analysis revealed that in accordance with the RCP2.6 scenario, the value of the positive anomaly of surface summer air temperature by the end of the 21st century does not exceed 1.5°C, and according to the RCP8.5 scenario, it reaches 5.5°C relative to the historical period. During the year, the maximum of anomalies is predicted in the autumn and winter months, the minimum – in April. Both scenarios predict an increase in precipitation that does not exceed 50% in the RCP8.5 scenario at the end of the century during the period of maximum growth (spring). The resulting prognostic fields can be used in hydrological and glaciological modeling.

Keywords. Tian-Shan, mountain glaciers, climate projections, general circulation model, regional climate model, bias correction, downscaling.

Введение

Одним из ключевых последствий современного потепления климата является масштабное сокращение оледенения Земного шара. Наиболее интенсивной

деградации подвержены горные ледники: за последние два десятилетия скорость их сокращения удвоилась и составила 267 ± 16 Гт/год (Hugonnet et al., 2021). По оценкам (Zemp et al., 2019) повышение уровня мирового океана за счет таяния горных ледников за период 1967-2016 гг. составило 27 ± 22 мм в.э. По данным (Hock et al., 2019), в соответствии с климатическим сценарием RCP8.5, масса всех горных ледников мира к 2100 г. относительно 2015 г. сократится в среднем по оценкам шести глобальных гляциологических моделей на $41 \pm 13\%$.

Ледники Центральной Азии являются критически важным источником пресной воды в регионе, а оледенение Тянь-Шаня опосредовано обеспечивает пресной водой более 100 млн человек (Aizen et al., 2006). Цифра, приведенная выше, может показаться несколько завышенной, однако только в области водосбора р. Сыр-Дарьи (в верховье – р. Нарын) проживает 20 млн человек (Bernauer, Siegfried, 2012). По прошествии нескольких лет после опубликования вышеупомянутых работ ситуация едва ли существенно изменилась из-за высоких темпов прироста населения в регионе (Siegfried et al., 2012). Изменение климата не только влияет на ресурсы пресной воды, оно вызывает наводнения, оползни, засухи и другие стихийные бедствия (Ibatullin et al., 2009). Ускоренное таяние ледников создает дополнительные риски для устойчивого развития и региональной водной, энергетической и продовольственной безопасности (Баетов, Архангельская, 2015). Масштаб проблемы сокращения ледников становится яснее, если учесть вклад талой ледниковой воды в общий сток. В Кыргызстане талые воды составляют до 50% общего стока в годовом исчислении и до 70% в летние месяцы (Sorg et al., 2012), обеспечивая, помимо сельского хозяйства, гидроэнергетику, которая, в свою очередь, покрывает до 90% потребностей страны в электроэнергии (Ibatullin et al., 2009). Деграция горного оледенения в регионе может привести к существенным последствиям для обеспечения жизнедеятельности (Поповнин и др., 2021; Aizen et al., 2006). По оценкам (Aizen et al., 2006), за период 1943-2003 гг. сокращение ледников Северного и Центрального Тянь-Шаня составило 14.2%. Авторы отмечают, что за этот период произошел рост летней температуры воздуха (на метеостанции Тянь-Шань – на 1.0°C за 1943-2003 гг.), особенно с 1970-х гг., а количество осадков оставалось практически неизменным. В работе (Сатылканов, 2016) предполагается, что увеличение абляции ледников бассейна р. Чон-Кызыл-Суу в связи с ростом летней и осенней температуры воздуха может привести к сокращению речного стока.

Климат Внутреннего Тянь-Шаня – резко континентальный, с большими годовыми амплитудами температуры воздуха, около 75% осадков выпадает с мая по сентябрь, максимум – в летние месяцы (Aizen, 1995; Kutuzov, Shahgedanova, 2009; Van Tricht et al., 2021). Большинство ледников в данном районе имеет весенний максимум аккумуляции, а летом частые снегопады препятствуют дополнительному таянию за счет увеличения альбедо поверхности (Van Tricht et al., 2021). Ледники такого типа наиболее чувствительны к потеплению в летний период, так как, помимо эффекта от уменьшения альбедо поверхности, происходит увеличение доли жидких осадков.

Для моделирования эволюции горных ледников и речного стока необходимы климатические данные с высоким пространственным и временным разрешением (Постникова, Рыбак, 2021, 2022). Качество и полнота климатических данных оказывает значительное влияние на результаты гляциологических расчетов. Общие климатические тенденции выявляются по результатам анализа численных экспериментов на моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), которые в последние годы трансформируются в так называемые «модели земной системы» (Володин и др., 2016) в силу все более и более детального описания физических процессов, протекающих в биосфере и деятельном слое суши. Пространственное разрешение в атмосферных блоках современных моделей земной системы не превышает одного градуса, что, естественно, крайне недостаточно для гляциологического моделирования в горных районах. Региональные (мезомасштабные) климатические модели (РКМ) обеспечивают пространственное разрешение, исчисляемое первыми десятками километров, но при этом, разумеется, не способны воспроизвести глобальные климатические тенденции и тоже неприменимы для описания метеорологических полей даже для крупных горных ледников. По сложившейся в последние годы практике региональные климатические проекции получают при использовании связки МОЦАО-РКМ: первые генерируют климатические изменения на долгосрочную перспективу в целом по планете и обеспечивают граничные условия для вторых, операционной областью которых является пространственно-ограниченный регион.

Для построения региональных климатических проекций в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня в настоящей работе использованы данные проекта по мезомасштабному моделированию CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment), которые сформированы в том числе и для Центральной Азии. Поскольку климатические поля, генерируемые в связке МОЦАО-РКМ содержат систематические ошибки, перед практическим применением их необходимо было соответствующим образом скорректировать, используя данные наблюдений (выполнить операцию, получившую в англоязычной литературе «bias correction» (Christensen et al., 2008; Terink et al., 2010 и мн. др.). В нашей работе подробно рассмотрена методика коррекции исходных модельных данных о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков и анализируются ожидаемые климатические изменения этих двух параметров, которые потенциально могут привести к деградации горного оледенения в регионе. Целью данной работы явилось получение скорректированных и регионализованных до 1 км прогностических полей температуры воздуха и осадков до 2100 г. в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня, которые могут быть использованы в качестве входных параметров (граничных условий) для гляциологического моделирования. Заметим, что результаты проекта CORDEX использовались и ранее для исследования реакции горного оледенения на прогнозируемые изменения климата (Zekollari et al., 2019).

Исходные данные

Данные проекта CORDEX представляют собой климатические проекции до конца XXI в., полученные в нескольких связках МОЦАО-РКМ. На МОЦАО рассчитываются глобальные климатические поля с малым пространственным разрешением (от 1° до 5° по широте и долготе в зависимости от вида и реализации модели), задающие граничные условия для РКМ, которые оперируют на пространственных сетках с гораздо меньшим пространственным шагом (11-50 км). В проекте CORDEX Земной шар поделен на 13 макрорегионов, для каждого из которых используются различные связки МОЦАО+РКМ. В настоящей работе использовались результаты расчетов для региона Центральной Азии (CAS), который включает в себя регион Тянь-Шаня (рис. 1а).

Для данного региона были использованы следующие глобальные климатические модели (участвовавшие в проекте CMIP5):

- МОЦАО Метеорологического института Макса Планка (Гамбург, ФРГ) MPI (<https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpe-esm/>),
- МОЦАО CNRM-CERFACS Национального метеорологического центра Франции и Meteo-France (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique1&lang=en>),
- МОЦАО NCC-NorESM1 Климатического центра Норвегии <https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/ncc-1>);

и региональные модели:

- Бельгийско-французская РКМ ALARO-0 (<http://euro-cordex.be/meteo/view/en/29038078-ALARO-0+model.html>),
- РКМ REMO Института Макса Планка и Климатического Центра CERICS (Гамбург, ФРГ) (<https://www.remo-rcm.de/>; <https://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en>).

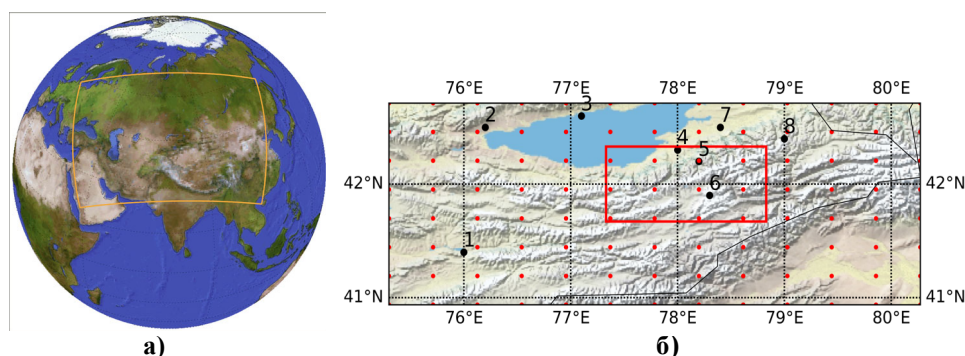


Рисунок 1. а) Регион № 13 (Центральная Азия) в проекте CORDEX (<https://cordex.org/domains/region-8-central-asia/>), б) Регион Тянь-Шаня: черные кружки – сетевые метеорологические станции, используемые в работе (табл. 1), красные кружки – узлы модельной сетки, красный прямоугольник – условные границы Внутреннего Тянь-Шаня

Figure 1. a) Region № 13 (Central Asia) in CORDEX Experiment (<https://cordex.org/domains/region-8-central-asia/>); b) Tian-Shan: black circles – meteorological stations used in this work (Table 1), approximate boundaries of the Inner Tian-Shan are marked by red rectangle

В работе были использованы расчеты на трех связках моделей: MPI-REMO, CNRM-ALARO, NCC-NorESM1-REMO. Таким образом, каждой МОЦАО соответствует своя РКМ. Климатические поля, полученные в рамках проекта CORDEX, находятся в свободном доступе на Интернет-ресурсе Всемирной программы исследований климата (WCRP): <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>.

Таблица 1. Метеостанции Кыргызской Республики, которые использовались для коррекции модельных данных

Table 1. Meteorological stations in Kyrgyz Republic used for bias correction

	Название метеостанции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота над у.м., м
1	Нарын	41.4	76.0	2041
2	Балыкчы	42.5	76.2	1658
3	Чолпон-Ата	42.6	77.1	1645
4	Кызыл-Суу	42.3	78.0	1770
5	Чон-Кызыл-Суу	42.2	78.2	2555
6	Тянь-Шань	41.9	78.3	3660
7	Каракол	42.5	78.4	1770
8	Чон-Ашу	42.4	79.0	2794

Для планируемого моделирования эволюции ледников массива Ак-Шийрак, хребтов Терской Ала-Тоо, Суёк из всего региона был вырезан район, включающий часть Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (41.0-43.0° с.ш., 75.5-80.5° в.д., рис. 1б). Исторические данные CORDEX CAS о приземной температуре воздуха и количестве осадков охватывают период 1977-2005 гг., прогностические – 2006-2100 гг., по двум сценариям – RCP2.6 и RCP8.5. Пространственное разрешение исходных данных CORDEX CAS – 25 км.

Известно, что поля климатических моделей содержат систематические ошибки (особенно в высокогорных районах), поэтому перед использованием их необходимо скорректировать, используя данные наблюдений. Для коррекции были использованы данные регулярных измерений на восьми метеорологических станциях (МС, табл. 1). Регулярные метеорологические наблюдения в Иссык-Кульской котловине Кыргызстана начались в конце XIX века, их история подробно описана в работе (Сатылканов, 2016). Дополнительно для регионализации данных моделирования привлекались данные автоматических метеостанций (АМС), установленных на леднике Кара-Баткак (высота над у.м. 3420 м, годы наблюдений 2017-2018 гг.), а также на его срединной морене (3450 м, годы наблюдений 2018-2020 гг.), и на леднике Сары-Тор (4080 м, 2015-2019 гг.). Наблюдения на всех метеостанциях, кроме Чон-Кызыл-Суу, выполняются Кыргызгидрометом, на метеостанции Чон-Кызыл-Суу и на автоматических метеостанциях на леднике Кара-Баткак выполняются Тянь-Шанским высокогорным научным центром ИВПиГЭ НАН КР (Сатылканов, 2016).

Сравнение данных моделирования с данными наблюдений

Для того чтобы иметь представление о качестве модельных данных, было проведено их сравнение с данными наблюдений и с данным реанализа. Для сравнения со стационарными данными модельные данные были проинтерполированы в точки станций из ближайшего узла модельной сетки с приведением к высоте станции с использованием вертикального градиента стандартной атмосферы для температуры и с использованием плевометрического градиента для осадков. При этом для осадков узел выбирался так, чтобы рельеф был наиболее схож с точкой расположения станции (долина/прибрежная зона/горный хребет). Такой подход является существенным упрощением сложного пространственного распределения осадков в высокогорном регионе, однако все же позволяет сформировать примерное представление о величине модельных ошибок. Кроме того, коэффициент пространственной корреляции месячных сумм осадков, по стационарным данным, составил 0.5-0.7, что означает, что радиус пространственной корреляции составляет около 130 км. Это значение близко к максимальному расстоянию от узла до ближайшей метеостанции на юго-востоке региона (см. рис. 1) – 150 км, а значит при данном пространственном разрешении модельной сетки и стационарных данных интерполяция правомерна.

На рис. 2 приведены средняя летняя температура воздуха (июнь-август) и суммы осадков за холодный (октябрь-апрель) и теплый (май-сентябрь) сезоны, по данным реанализа ERA5. В нашем случае была использована прогнозная система моделирования IFS Европейского центра ECMWF с использованием 4D-Var процедуры усвоения данных наблюдений, на 137 вертикальных уровнях в атмосфере вплоть до 0.01 ГПа (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>).

Для сопоставления с данными CORDEX мы использовали среднемесячные данные за период 1979-2005 гг. с пространственным разрешением 31 км (на регулярной сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$). Для сравнения на рис. 2 также показаны значения соответствующих параметров, по данным метеостанций. На рис. 3 приведены пространственное распределение средней летней температуры воздуха (июнь-август) и суммы осадков за холодный (октябрь-апрель) и теплый (май-сентябрь) сезоны в среднем за период 1977-2005 гг., по данным CORDEX для трех моделей.

Данные реанализа ERA5 в целом корректно воспроизводят поле средней летней температуры воздуха (рис. 2а) как качественно, так и количественно, исключение составляет юго-западная область, близкая к метеостанции Нарын, где данные реанализа ERA5 завышают температуру более, чем на 3°C . Во всех трех случаях по моделям CORDEX CAS были получены качественно схожие распределения температуры за исторический период (рис. 3 верхний ряд). Сравнение модельных результатов, интерполированных в точки с координатами метеостанций с наблюдениями на последних (табл. 2), показывает, что практически везде модели занижают значение температуры в лет-

ний период – особенно в точках у высокогорных станций Чон-Кызыл-Суу (2555 м) (кроме модели MPI) и Тянь-Шань (3660 м).

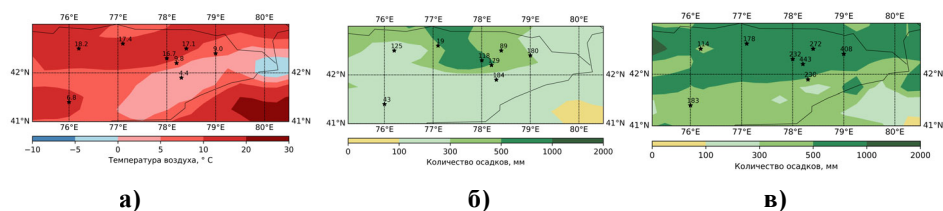


Рисунок 2. Средняя летняя температура приземного воздуха (а) и сумма осадков за холодный сезон (октябрь-апрель) (б) и теплый сезон (май-сентябрь) (в), по данным реанализа ERA5 в среднем за 1979-2005 гг.

Звездочками показано расположение метеостанций со значениями температуры и осадков, по данным этих метеостанций

Figure 2. Mean Summer (June-August) air temperatures (a), cold season (October-April) precipitation sums (b) and warm season (May-September) precipitation sums (c), by ERA5 data in average for the years 1979-2005

Positions of the stations are shown by black stars with air temperature and precipitation sums measured at these stations are indicated nearby

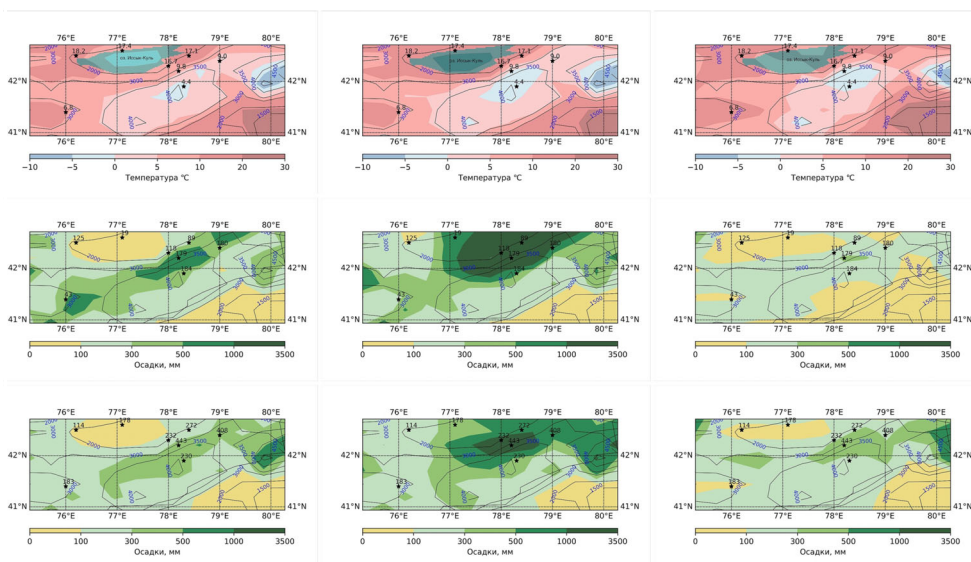


Рисунок 3. Средняя летняя (июнь-август) температура приземного воздуха (верхняя строка), сумма осадков за холодный сезон (октябрь-апрель, средняя строка) и сумма осадков за теплый сезон (май-сентябрь, нижняя строка), по данным моделирования CORDEX с использованием моделей MPI (слева), NCC-NorESM1 (в середине), CNRM-CERFACS (справа) в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня в среднем для исторического периода 1977-2005 гг.

Звездочками показано расположение метеостанций и значения соответствующих параметров; черные линии – изогипсы рельефа

Figure 3. Mean Summer (June-August) air temperatures (top row), cold season (October-April) precipitation sums (middle row) and warm season (May-September) precipitation sums (bottom row), by CORDEX CAS data for MPI model (left), NCC-NorESM1 model (in the middle), CNRM-CERFACS model (right), for the Central Tian-Shan and the Inner Tian-Shan, averages for the years 1977-2005
Stations' data and corresponding values are marked by black stars; relief is indicated by black contour lines

Таблица 2. Среднеголетние температуры воздуха, °С, в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 2. Summer mean air temperatures (°C), averages for the years 1977-2005 by meteorological stations data and model data, interpolated to stations' points

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	16.8	14.1	14.8	18.9
Балыкчы	18.2	16.7	14.0	17.2
Чолпон-Ата	17.4	17.1	12.7	16.9
Кызыл-Суу	16.7	9.0	15.8	6.8
Чон-Кызыл-Суу	9.8	3.9	10.7	1.7
Тянь-Шань	4.4	-1.5	1.1	-3.0
Каракол	17.1	14.2	17.1	13.7
Чон-Ашу	9.0	5.0	7.8	14.9

Распределение модельных сумм осадков как за сезон аккумуляции, так и за сезон абляции за исторический период различны во всех трех случаях (рис. 3). Наиболее реалистичную картину за оба сезона при сравнении с данными метеостанций (табл. 3, 4) дает модель CNRM – до 350 мм в сезон аккумуляции и до 500 мм в сезон абляции в горных районах и до 100 мм в районе оз. Иссык-Куль. Увеличение количества осадков с высотой вдоль горных хребтов получено на модели MPI, но абсолютная сумма сильно завышена – до 900 мм в высокогорных районах в сезон аккумуляции (рис. 2, табл. 3). Значения сумм осадков в сезон абляции по этой модели достаточно хорошо согласуются с данными станций (табл. 4). По результатам модели NCC-NorESM1 получен, очевидно, ошибочный максимум до 3350 мм в сезон аккумуляции и до 1600 мм в сезон абляции в районе оз. Иссык-Куль, столь высоких сумм осадков здесь не бывает даже в сумме за весь год (средняя годовая сумма на станции Чон-Кызыл-Суу за 1977-2005 гг. составляет 627 мм). Аналогичное завышение осадков в зимний сезон на Северном Тянь-Шане было отмечено в (Shahgedanova et al., 2020), а также в регионе Тибета по моделям CORDEX CAS (Top et al., 2021).

Две из трех моделей, MPI и NCC-NorESM, некорректно воспроизводят годовой ход осадков (рис. 3 и 4). Максимум в годовом ходе по этим моделям наблюдается в холодный сезон, в то время как, по данным наблюдений, в целом для всего региона характерен летний максимум осадков. Реанализ ERA5 корректно воспроизводит летний максимум осадков в регионе (рис. 2 и 4), однако абсолютные значения месячных сумм завышены в 2-3 раза (рис. 4). Как и в моделях CORDEX CAS значительное завышение сумм осадков характерно для района оз. Иссык-Куль и прибрежных районов (рис. 2б,в), особенно для теплого периода – до 1000 мм, по данным реанализа, в то время как, по данным станций, эти суммы составляют не более 400 мм.

Таблица 3. Суммы осадков за холодный сезон (октябрь-апрель, мм) в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 3. Cold season (October-April, mm) precipitation sums averages for the years 1977-2005 measured at meteorological stations and model data, interpolated to the stations' coordinates

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	43	307	535	64
Балыкчы	125	96	27	19
Чолпон-Ата	19	672	33	87
Кызыл-Суу	118	3323	844	304
Чон-Кызыл-Суу	179	3342	863	324
Тянь-Шань	184	699	470	205
Каракол	89	2023	175	78
Чон-Ашу	180	984	492	70

Таблица 4. Суммы осадков за теплый сезон (май-сентябрь, мм) в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 4. Warm season (May-September, mm) precipitation sums in average for the years 1977-2005 measured at meteorological stations and model data, interpolated to the stations' coordinates

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	183	197	206	52
Балыкчы	114	177	81	33
Чолпон-Ата	178	436	68	165
Кызыл-Суу	232	1568	347	455
Чон-Кызыл-Суу	443	1587	366	475
Тянь-Шань	230	508	331	271
Каракол	272	859	148	205
Чон-Ашу	408	704	343	187

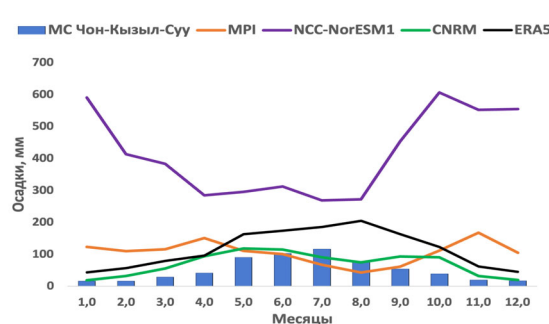


Рисунок 4. Годовой ход количества осадков на станции Чон-Кызыл-Суу, ближайшей к ней точке данных моделирования CORDEX (42.207° с.ш. 78.199° в.д., три модели) в среднем за период 1977-2005 гг., в ближайшем узле сетки реанализа ERA5 (42.25° с.ш. 78.25° в.д.) в среднем за период 1979-2005 гг.

Figure 4. Precipitation annual cycle at Chon-Kizil-Suu meteorological station, at the nearest CORDEX grid point (42.207° N 78.199° E, three models), averages for the years 1977-2005, at the nearest ERA5 grid point (42.25° N 78.25° E), averages for the years 1979-2005

Методы коррекции модельных данных

В настоящее время существуют и активно применяются различные методы статистической коррекции модельных данных (Fang et al., 2015; Luo et al., 2018; Maraun, 2016; Mendez et al., 2020). Поскольку статистическое распределение температуры воздуха и осадков имеет различный вид – температура в большинстве случаев подчиняется распределению Гаусса (нормальному распределению), а количество осадков традиционно описывается гамма-распределением или экспоненциальным распределением (см. например (Гандин, Каган, 1976), а повторяемость событий осадков – марковской цепью 1-2 порядков (Wilks, Wilby, 1999), это определяет разный подход к построению коррекционных схем. В нашем случае статистическое распределение среднемесячных значений температуры воздуха бимодально, а месячные суммы осадков подчиняются экспоненциальному распределению (рис. 5). Бимодальность при коррекции температуры воздуха может быть учтена с помощью разбиения выборки на сезоны или месяцы (в данной работе коррекция выполнялась по месяцам).

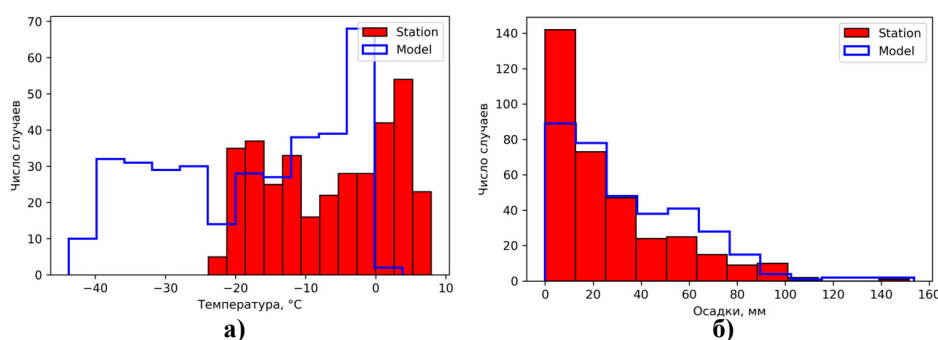


Рисунок 5. Статистическое распределение среднемесячной температуры воздуха (а) и месячных сумм осадков (б), по данным метеостанции Тянь-Шань (красные столбцы) и модели CNRM (синяя линия)

Figure 5. Statistical distribution of monthly air temperatures (a) and monthly precipitation (b), at Tian-Shan weather station (red bins) and by CNRM model data (blue line)

Рассмотрим подробно основные методы коррекции данных:

Линейный метод (температура воздуха и осадки, linear scaling (Luo et al., 2018)):

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

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) – аналогичные обозначения.

Линейный метод с учетом дисперсии (температура воздуха, variance scaling (Luo et al., 2018)):

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

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: $\Delta T_{RCM_{hist,m,d}} = T_{RCM,LS,m,d}^{corr} - \overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}}$

Коррекция с помощью функции распределения вероятности (Luo et al., 2018; Switanek et al., 2017) – распределение модельных данных корректируется в соответствие с функцией распределения данных наблюдений. Обычно предполагается, что данные наблюдений и модели соответствуют определенному выбранному закону распределения вероятностей. Для температуры воздуха чаще всего используется гауссовское распределение:

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

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

Для количества осадков оптимальным является использование гамма-распределения:

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

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

Метод квантилей (quantile mapping (Epaayati et al., 2021; Luo et al., 2018; Themeßl et al., 2012)) – определенный квантиль распределения суточных модельных данных корректируется в соответствии с квантилем распределения данных наблюдений (см. рис. 2 в (Luo et al., 2018)), и далее в соответствии с этим корректируются прогностические данные:

$$X_{RCM_{proj,m,d}}^{corr} = Q_{D_{X(obs)}^p} (P_{D_{X(RCM)}^p} (X_{RCM_{proj,m,d}})), \quad (5)$$

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

Дельта-метод (осадки) – коррекция по разности между наблюдаемыми и модельными значениями (дельта), а затем коррекция прогностических значений (Luo et al., 2018; Shahgedanova et al., 2020):

$$P_{RCMproj,m,d}^{corr} = P_{OBS,m,d} * \frac{\overline{P_{RCMproj,m,d}}}{\overline{P_{RCMhist,m,d}}} \quad (6)$$

Коррекция интенсивности и частоты выпадения осадков (Local intensity scaling, LOCI method (Fang et al., 2015; Ji et al., 2020; Luo et al., 2018)): сначала определяется пороговое значение суточной интенсивности осадков для каждого месяца $P_{T,m}$, ниже которого все модельные значения отсекаются; затем рассчитывается коэффициент s_m таким образом, чтобы среднее многолетнее значение за месяц по модельным данным совпадало с данными наблюдений:

$$s_m = \frac{\overline{P_{OBS,m,d} | P_{OBS,m,d} > 0}}{\overline{P_{RCM,m,d} | P_{RCM,m,d} > P_{T,m}}} \quad (7)$$

$$P_{RCMhist,m,d}^{corr} = \begin{cases} P_{RCM,m,d} * s_m & | P_{RCM,m,d} > P_{T,m} \\ 0 & | P_{RCM,m,d} < P_{T,m} \end{cases}$$

Методы 1, 3, 4, 5 могут применяться как для температуры воздуха, так и для осадков, метод 2 – только для температуры воздуха, метод 6 – только для осадков. Методы коррекции, использующие 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 – модельные ошибки часто сводятся лишь к систематическому завышению или занижению всей выборки и могут корректироваться линейными методами (например, (Zekollari et al., 2019)). В нашем случае вся выборка среднемесячных значений температуры имеет бимодальное распределение (рис. 5), поэтому при коррекции методом 3 и линейными методами (1 и 2) процедура осуществлялась отдельно для каждого месяца. Коррекция экстремальных значений оказывается существенной для модельных значений количества осадков – при относительно реалистичном воспроизведении среднего значения, модели (и реанализы) часто некорректно воспроизводят осадки максимальной и минимальной интенсивности (Holthuijzen et al., 2022; Xie et al., 2021). Достаточно эффективным при коррекции минимумов количества осадков и частоты их выпадения является метод 6, так как модели нередко завышают частоту осадков слабой интенсивности (так называемый «drizzle effect» в англоязычной литературе, см., например, (Schmidli et al., 2006; Velasquez et al., 2020; Fowler et al., 2007)). Более подробно на примере наших данных этот метод будет рассмотрен ниже.

Коррекция климатических данных CORDEX в регионе Внутреннего Тянь-Шаня

Нами было проведено сравнение основных методов коррекции модельных данных и выявлены оптимальные методы для температуры воздуха и количества осадков. Для этого в качестве критериев соответствия были

использованы абсолютная ошибка (MAE (8)), относительная ошибка (RE (9)), критерий Нэша-Саттклиффа (NSE (10), (Nash, Sutcliffe, 1970) (табл. 5), а также вид годового хода для каждой переменной. Все характеристики были рассчитаны для точек метеостанций, при этом данные моделирования интерполировались в эти точки из ближайшего узла с применением вертикального градиента.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{mod}|}{n} \quad (8)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} * 100\% \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs_mean})^2}, \quad (10)$$

где i – шаг по времени (в данном случае месяц), n – количество наблюдений, $|Y_i^{obs}|$ – значение параметра, по данным наблюдений, $|Y_i^{mod}|$ – значение параметра, по данным модели, $|Y_i^{obs_mean}|$ – среднее многолетнее значение параметра, по данным наблюдений.

Для коррекции температуры воздуха использовались среднемесячные значения температуры на станциях, перечисленных в табл. 1 за период 1977-2005 гг., а также среднесуточные данные на станции Кызыл-Суу за тот же период. В результате поля приземной температуры воздуха были скорректированы с помощью линейного метода с учетом дисперсии (метод 2, рис. ба), так как в соответствии с результатами сравнения, приведенными в табл. 5, именно этот метод показывает наилучшее соответствие с данными наблюдений – средняя абсолютная ошибка менее 0.4°C, а относительная ошибка не превышает 2%. Стандартное отклонение в данном случае рассчитывалось по среднемесячным данным, но корректировалось с использованием суточных данных на станции Кызыл-Суу (variance correction (Luo et al., 2018; Ternik et al., 2010; Zekollari et al., 2019). В данном случае каждый набор из 3-х связей модельных данных МОЦА-РКМ был скорректирован отдельно и затем рассчитаны средние поля по трем массивам.

Для расчета прогностических значений температуры воздуха к скорректированному историческому среднесуточному значению прибавлялась исходная прогностическая аномалия температуры, которая рассчитывалась как разность между прогностическим суточным значением за определенный день прогностического года и исходным среднесуточным значением температуры по модели в среднем за исторический период:

$$T_{RCM_{proj,m,d}}^{cor} = T_{RCM_{proj,anom}} + \overline{T_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}} \quad (11)$$

$$T_{RCM_{proj,anom}} = T_{RCM_{proj,m,d}} - \overline{T_{RCM_{hist,m,d}}}$$

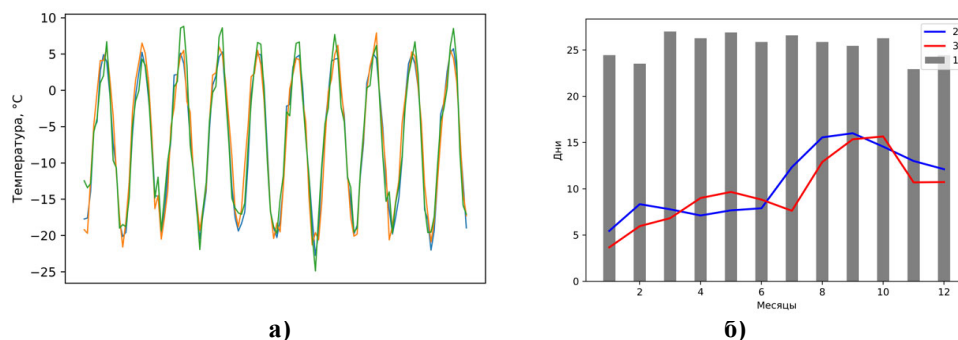


Рисунок 6. а) Временной ход среднемесячной температуры воздуха за период 1977-1986 гг., для точки метеостанции Тянь-Шань: оранжевая линия – данные наблюдений, зеленая линия – исходные значения по модели NCC-NorESM1, синяя линия – скорректированные модельные значения по методу 2; б) Количество дней с осадками для каждого месяца по исходным данным модели CNRM (1), данным наблюдений на МС Тянь-Шань (2), по скорректированным с помощью метода LOCI (метод 6) данным модели CNRM (3)

Figure 6. a) Monthly air temperatures for the years 1977-1986 for Tian-Shan weather station point, orange line – observations, green line – initial data by NCC-NorESM1 model, blue line – bias corrected data by NCC-NorESM1 model; b) Number of days with precipitation by initial CNRM model data (1), by meteorological station Tian-Shan data (2), by bias corrected CNRM model data using LOCI correction method (3)

Таблица 5. Сравнение скорректированных среднемесячных рядов температуры воздуха (номер метода коррекции соответствует номеру метода в разделе «Методы коррекции модельных данных») с данными наблюдений на метеостанциях за период 1977-2005 гг.: абсолютная ошибка (MAE, °C), относительная ошибка (RE, %) и критерий Нэша-Сатклиффа (NSE) в среднем по 8 точкам метеостанций

Table 5. Comparison of the corrected monthly air temperature time series (the number of correction method matches with the number in the Paragraph 3) with the observational data for the years 1977-2005: the mean absolute error (MAE, °C), the mean relative error (RE, %) and Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) averaged over 8 stations points

Метод коррекции	MAE(°C/мм)			RE(%)			NSE		
	MPI	NCC-NorESM1	CNRM	MPI	NCC-NorESM1	CNRM-CERFACS	MPI	NCC-NorESM1	CNRM-CERFACS
Температура									
(2)	0.28	0.39	0.28	-1.21	-1.23	-0.16	0.98	0.99	0.99
(3)*	1.55	1.01	2.55	7.46	-0.53	7.67	0.73	0.98	0.81
(4)	1.86	1.79	1,76	6.88	4.21	8.23	0.78	0.88	0.86
Количество осадков									
(1)	23.36	20.15	23.16	-57.39	-58.64	-52.52	0.26	0.19	-2.16
(3)	32.96	37.08	24.50	-122.32	-132.63	-46.20	-43.82	-28.18	-3.59
(4)	32.96	37.29	23.34	-123.05	-130.03	-71.56	-44.16	-27.18	-1.20

Примечание: *среднее значение для 12 отдельных выборок по месяцам

Коррекция осадков осуществлялась в два этапа. Сначала в модельных данных корректировалась частота выпадения осадков. В основном климатиче-

ские модели часто значительно превышают количество дней с осадками в течение месяца и дают много «околонулевых» значений количества осадков в сутки (уже упомянутый выше «drizzle effect»). В районе станций Чон-Кызыл-Суу и Тянь-Шань количество дней с осадками по исходным модельным данным (в среднем за 1977-2005 гг.) по всем трем моделям составило от 25 до 31 дней/месяц во все месяцы года, в то время как по данным станций (в среднем за 2011-2019 гг.), оно составляет от 4 дней/месяц в зимний период до 16 дней/месяц летом. Метод коррекции частоты выпадения осадков заключается в подборе такого порогового значения суточной суммы осадков по модели, выше которого количество дней с осадками в данном месяце будет совпадать со среднемноголетним значением, по данным наблюдений (метод 6). Пороговые значения, ниже которых значения кол-ва осадков задавались нулевыми, варьировались от 0.1 мм до 1.5 мм в зависимости от месяца и модели. Пример коррекции частоты выпадения осадков для модели CNRM приведен на рис. 6б.

На втором этапе корректировалась интенсивность осадков за исторический период. Как было показано на рис. 3 из представленных трех моделей только лишь модель CNRM показывает значения осадков, схожие по порядку величины с данными наблюдений в высокогорных районах. Исходя из значений приведенных в таблице 5, для моделей MPI и NCC-NorESM1 относительная ошибка в некоторых случаях превышает 100%, а критерий Нэша-Сатклиффа значительно меньше 0. Поэтому было принято решение использовать для дальнейших расчетов только данные модели CNRM. Коррекция была осуществлена с помощью стандартного линейного метода (метод 1), при сравнении с данными наблюдений критерии соответствия показали удовлетворительный результат (см. табл. 5). Кроме того, линейный метод позволяет скорректировать годовой ход осадков (см. рис. 4). Коррекция была осуществлена для суточных данных отдельно по месяцам в предположении, что отношение месячных сумм осадков по модели и наблюдениям совпадает с отношением суточных сумм. Было задано максимальное пороговое значение количества осадков в сутки – 50 мм (определено по станционным данным).

Прогностическая аномалия количества осадков рассчитывалась как отношение месячных сумм осадков за каждый месяц прогностического года и средней месячной модельной суммы осадков за весь исторический период:

$$Pr_{RCM_{proj,m,d}}^{cor} = \overline{Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}} \cdot \frac{Pr_{RCM_{proj,m}}}{\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}}, \quad (12)$$

где $\overline{Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}}$ – средняя скорректированная модельная суточная сумма осадков за весь исторический период, $\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}$ – средняя месячная исходная модельная сумма осадков за весь исторический период, $Pr_{RCM_{proj,m}}$ – месячная модельная прогностическая сумма осадков за каждый прогностический год.

Регионализация климатических данных CORDEX в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня

Регионализация температуры воздуха и количества осадков проводилась из модельной сетки CORDEX с разрешением 25 км в пространственную сетку с разрешением около 1 км для всего рассматриваемого региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (рис. 1). Для этого была использована цифровая модель рельефа ЦМР с разрешением 30 м ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30 m" (ALOS DEM).

Нами были рассчитаны вертикальные градиенты приземной температуры воздуха по всем имеющимся доступным метеорологическим данным наблюдений – сетевым метеостанциям КыргызГидромета (табл. 1) и АМС в ледниковых районах (табл. 6). Градиенты рассчитаны по среднесуточным данным или при их отсутствии по среднемесячным значениям (отмечены звездочкой в табл. 6). Как видно, по данным станций Кызыл-Суу (1770 м) и Тянь-Шань (3660 м), вертикальный градиент на протяжении всего года составляет $-0.6-0.8^{\circ}\text{C}/100$ м, причем абсолютное значение градиента зимой даже оказывается выше, чем в теплый период. Еще более высокие по абсолютной величине значения градиентов были получены и по станциям Кызыл-Суу (1770 м) и Чон-Кызыл-Суу (2555 м): $-0.7-0.9^{\circ}\text{C}/100$ м в холодный период и $-0.9-1.0^{\circ}\text{C}/100$ м – в теплый период. Результаты наших расчетов в целом согласуются с данными из (Сатылканов, 2016), в которой, показано, что максимум вертикального градиента температуры воздуха наблюдается летом и составляет около $-0.72^{\circ}\text{C}/100$ м, а в зимнее время часто наблюдаются инверсии температуры воздуха, особенно в отрицательных формах рельефа. В то же время на побережье озера Иссык-Куль зимние инверсии не наблюдаются.

Более «характерный» годовой ход вертикальных градиентов температуры воздуха получен при анализе данных МС Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена) и МС Чон-Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена): в холодное время года градиенты составляют $0.3-0.6^{\circ}\text{C}/100$ м, а в теплое – $-0.6-0.8^{\circ}\text{C}/100$ м. По данным, полученным с использованием АМС непосредственно на ледниках Карабаткак и Сары-Тор (табл. 6), инверсии в холодный период проявляются сильнее – по данным Чон-Кызыл-Суу – л. Карабаткак градиенты в зимние месяцы составили около $-0.1-0.2^{\circ}\text{C}/100$ м (необходимо, разумеется, при этом принять во внимание малость выборки данных в данном случае – 3 года (2017-2019) среднемесячных значений). По более длинному ряду среднесуточных значений на МС Тянь-Шань и АМС на леднике Сары-Тор за 2015-2019 гг. инверсии отчетливо проявились в холодное время года: в январе, феврале и декабре градиенты и вовсе в среднем за месяц оказались положительными и составили $+0.4-0.5^{\circ}\text{C}/100$ м.

В результате для регионализации данных CORDEX для всего рассматриваемого региона были использованы среднемесячные значения температурного градиента, рассчитанные, по данным МС Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена), которые отражают в целом годовой ход (с учетом зимних инверсий). Для более подробной регионализации по отдельным районам более мелкого

масштаба (например, конкретных ледников), необходимо учитывать особенности рельефа и влияние ледниковой поверхности, для чего использовать данные АМС на ледниках.

Таблица 6. Вертикальные градиенты температуры воздуха в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня, °C/100 м, рассчитанные, по данным наблюдений на сетевых МС и АМС (см. табл. 1)

Table 6. Surface air temperature vertical gradients in the Central and the Inner Tian-Shan, calculated from observations at the regular and automatic meteorological stations (see Table 1)

Станции	Период	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кызыл-Суу (1770 м) – Тянь-Шань (3660 м)	2011-2020	-0.79	-0.71	-0.70	-0.65	-0.67	-0.66	-0.66	-0.64	-0.66	-0.65	-0.69	-0.77
Кызыл-Суу (1770 м) – Чон-Кызыл-Суу (2555 м)	2011-2019	-0.88	-0.73	-0.75	-0.83	-0.87	-1.0	-1.0	-0.95	-0.95	-0.83	-0.78	-0.79
Кызыл-Суу (1170 м) – Карабаткак (морена, 3450 м)	2018-2020	-0.58	-0.45	-0.59	-0.61	-0.75	-0.78	-0.78	-0.75	-0.67	-0.65	-0.64	-0.62
Кызыл-Суу (1770 м) – Карабаткак (ледник, 3420 м)	2017-2020	-0.51	-0.43	-0.57	-0.61	-0.67	-0.73	-0.80	-0.68	-0.65	-0.58	-0.52	-0.49
Тянь-Шань (3660 м) – Сары-Тор (ледник, 4080 м)	2015-2019	0.48	0.39	-0.06	-0.47	-0.80	-0.73	-0.90	-0.89	-0.64	-0.53	-0.01	0.49
Чон-Кызыл-Суу (2555 м) – Карабаткак (ледник, 3420 м)*	2017-2019	-0.12	-0.19	-0.33	-0.35	-0.45	-0.50	-0.70	-0.65	-0.34	-0.32	-0.24	-0.15
Чон-Кызыл-Суу (2555 м) – Карабаткак (морена, 3450 м)*	2018-2019	-0.28	-0.49	-0.48	-0.26	-0.66	-0.62	-0.57	-0.58	-0.43	-0.39	-0.62	-0.40

*Значения рассчитаны по среднемесячным данным

Регионализация осадков в горных районах сопряжена с определенными сложностями: как известно, эта характеристика сильно изменчива в пространстве, так как она существенно зависит от особенностей рельефа и характеристик атмосферы в конкретном месте. Подробный обзор различных методов расчета орографической составляющей осадков представлен в работах (Barry, 2008; Торопов и др., 2022). Их условно можно разделить на 4 группы: физико-статистические методы, основанные на регрессионных связях осадков с метеорологическими (например, со снежным покровом (Черкасов, 2004; Муравьев, 1985)) и топографическими параметрами (Daly et al., 1994; Ranhao et al., 2008); аналитический метод, основанный на решении упрощенных уравнений динамики атмосферы; численный подход с применением полных мезомасштабных моделей атмосферы или упрощенных численных моделей (например, Smith et al., 2004); модели наветренного склона, в основе которой лежит

расчет скорости конденсации воздуха, поднимающегося вдоль горного склона (Торопов и др., 2022). В последней работе как раз реализован и успешно применен такой подход для расчета орографических осадков на Эльбрусе. В основном все эти подходы (кроме разве только физико-статистического) требуют большого количества входных метеорологических данных с высоким пространственным разрешением как по вертикали, так и по горизонтали. В данной работе в силу крайней ограниченности исходных данных для расчета высотного распределения осадков нами был использован упрощенный линейный подход – использование плевнометрических градиентов. Очевидно, что простая линейная зависимость количества осадков от высоты для обширного высокогорного района (в нашем случае диапазон высот составляет от 500 м до 4300 м) является весьма грубым упрощением, где-то рост осадков происходит параболически (Dahri et al., 2016), где-то максимум находится на определенной высоте и далее осадки постепенно убывают (например, Zakir et al., 2016). Поэтому одной из задач для будущей работы будет использование одного (или нескольких) методов расчета орографической составляющей осадков отдельно для меньшего по площади региона (например, отдельно для Внутреннего Тянь-Шаня).

В итоге для коррекции были использованы сезонные вертикальные градиенты осадков, рассчитанные по паре МС Кызыл-Суу – Чон-Кызыл-Суу. Эти градиенты составили в холодное время года (октябрь-апрель) 0.3 мм/100м/месяц и в теплое время года (май-сентябрь) 5.4 мм/100м/месяц. Эти градиенты в среднем соответствуют данным, приведенным в монографии (Швер, 1976). В монографии Черкасова (Черкасов, 2004) отмечено, что максимум осадков для ледника Шумского в Казахстане достигается на уровне около 3650 м, и далее происходит их постепенное убывание, а в работе (Van Tricht et al., 2021) 4200-4400 м. В нашей работе мы приняли, что осадки возрастают до высоты 4000 м над у.м. (данные АМС на леднике Сары-Тор показывают большее количество осадков по сравнению с АМС на леднике Карабаткак). Далее, выше отметки 4000 м задано убывание осадков с высотой по степенной зависимости (Van Tricht et al., 2021):

$$P_z = P_{4000} - gradP \cdot (z - 4000)^{0.6} \quad (13)$$

Итоговые прогностические оценки изменений температуры воздуха и количества осадков

Прогностические аномалии, рассчитанные по скорректированным данным CORDEX, представлены на рис. 7-9. В соответствии со сценарием RCP2.6 величина положительной среднемесячной аномалии приземной температуры воздуха в среднем за летний период к концу XXI века не превышает 1.5°C, а по сценарию RCP8.5 достигает 5.5°C относительно исторического периода 1977-2005 гг. (рис. 7а). Если рассматривать аномалии отдельно по

десятилетиям, то по сценарию RCP2.6 вплоть до конца века положительная аномалия температуры сохраняется на уровне 1-1.5°C, а по сценарию RCP8.5 возрастает практически линейно с 1°C в 2021-2030 гг. до 5.5°C в 2091-2100 гг. (рис. 9а). В годовом ходе аномалий для Внутреннего Тянь-Шаня максимум прогнозируется в осенние и зимние месяцы, минимум – в апреле (рис. 8а).

Для осадков как холодного, так и теплого периодов по обоим сценариям прогнозируются практически одни и те же изменения – по сценарию RCP2.6 осадки в регионе Тянь-Шаня практически не меняются (рис. 7б-в, 8б, 9б-в) по сравнению с историческим периодом на протяжении всего XXI века. По сценарию RCP8.5 увеличение осадков составляет не более чем в 1.7 раза, в годовом ходе выделяются максимумы в весенние и зимние месяцы (рис. 8б).

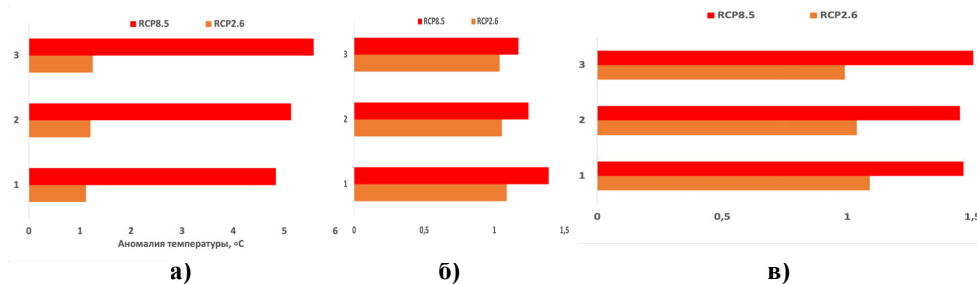


Рисунок 7. Средние по площади прогностические аномалии приземной температуры воздуха за теплый сезон, °С, (май-сентябрь) (а), количества осадков за холодный сезон (октябрь-апрель) (б) и теплый сезон (май-сентябрь) (в), относительные единицы, на период 2091-2100 г. для всего региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (1), для точек с абсолютной высотой более 3000 м (2), для района Внутреннего Тянь-Шаня (41.67°-42.33° с.ш., 77.33°-78.83° в.д.)

Figure 7. Mean regional surface air temperature anomalies for the warm season (May-September, °C) (a), mean regional precipitation anomalies for cold season (October-April) (b) and warm season (May-September) (c), relative units, for the years 2091-2100: for the whole region of the Central and the Inner Tian-Shan (1), for the points above 3000 m a.s.l. (2), for the Inner Tian-Shan (41.67°-42.33° N, 77.33°-78.83° E)

Эти оценки согласуются с полученными в других работах для Центральной Азии. Так, например, в работе (Qiu et al., 2022), по модельным данным, по сценарию RCP4.5 на период 2031-2050 гг. относительно исторического периода 1986-2005 гг. ожидается потепление в регионе до 2.0°C и незначительный рост осадков (до 0.1 мм/день). К концу XXI века по сценарию RCP8.5 рост среднегодовой температуры в регионе по ансамблю моделей CMIP5 составляют 5.3-6.4°C (Didovets et al., 2021). Новые прогностические оценки динамики осадков по 15 моделям CMIP6 по четырем сценариям SSP для среднеазиатского региона (включая оз. Иссык-Куль и его окрестности) представлены в работе (Jiang et al., 2020). По этим данным, для 2081-2100 гг. рост среднегодового количества осадков в среднем по среднеазиатскому региону составит до 14.5% по самому жесткому сценарию SSP5-8.5 относительно периода 1995-2014 гг. Отмечается, что максимальный рост осадков будет наблюдаться в горах Тянь-Шаня. При этом в годовом ходе отмечается рост осадков весной и уменьшение летом. Сходные с полученными в нашей работе

оценки получены в работе (Yu et al., 2018) по четырем лучшим моделям CMIP5 для центральноазиатского региона: к концу XXI в. по сценарию RCP8.5 рост осадков (до 0.5 мм/сутки) будет происходить с ноября по май, и практически без изменений с июня по октябрь; аналогичный сезонный ход аномалий осадков по моделям CMIP5 проекта ISIMIP получены в работе (Didovets et al., 2021).

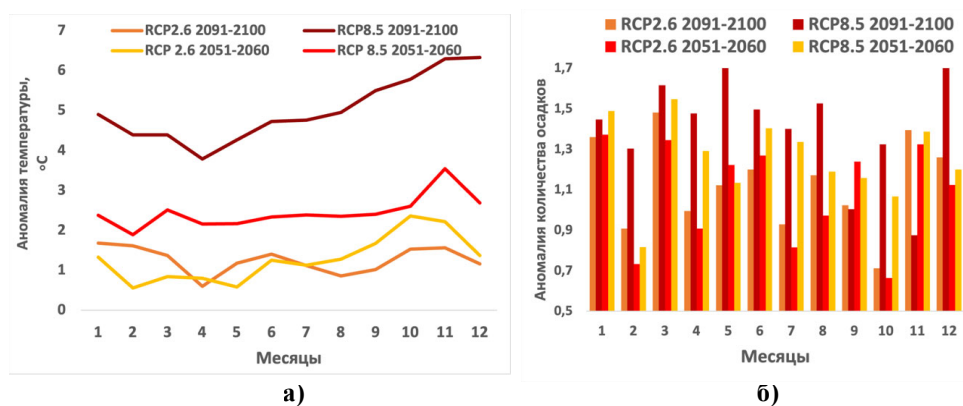


Рисунок 8. Годовой ход аномалий приземной температуры воздуха, °С, (а) и количества осадков, безразмерные единицы, (б) на период 2051-2060 и 2091-2100 гг. для всего региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня

Figure 8. Annual cycle of the surface air temperature anomalies, °C, (a) and precipitation anomalies, relative units, (b) for the periods 2051-2060 and 2091-2100 for the whole region of the Central and the Inner Tian-Shan

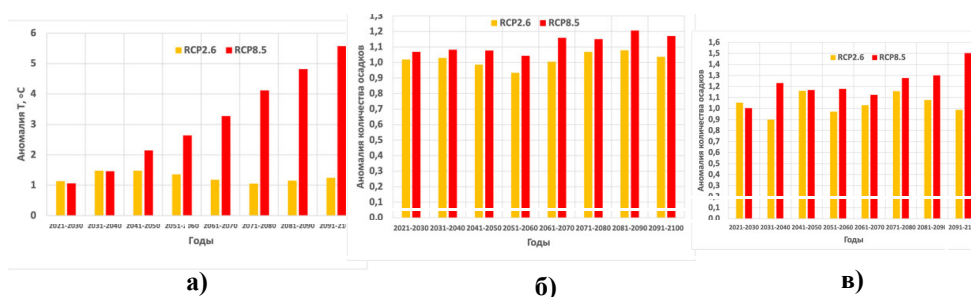


Рисунок 9. Аномалии приземной температуры воздуха, °С, за теплый период (май-сентябрь) (а), суммы атмосферных осадков за холодный период (октябрь-апрель) (б) и теплый период (относительные единицы, май-сентябрь) (в) за период 2021-2100 гг. по десятилетиям для Внутреннего Тянь-Шаня (41.67°- 42.33° с.ш., 77.33°-78.83° в.д.)

Figure 9. Surface air temperature anomalies for warm season (May-September, °C) (a), precipitation anomalies for the cold season (October-April) (b) and for the warm season (May-September) (c), relative units, for the decades 2021-2100 for the Inner Tian-Shan (41.67°-42.33° N, 77.33°-78.83° E)

Заключение

В статье были исследованы долгосрочные климатические проекции на регионы Внутреннего и Центрального Тянь-Шаня. Ожидаемые изменения климата неизбежно скажутся на состоянии горного оледенения – основного

источника пресной воды и стабилизирующего фактора для водных ресурсов на обширной территории с быстрорастущим населением и развивающейся экономикой.

Современные региональные климатические проекции строятся на основе результатов глобального климатического моделирования на МОЦАО, которые в дальнейшем подвергаются процедуре даунскейлинга с использованием РКМ, в результате чего получаются прогностические климатические поля с высоким пространственным и временным разрешением. Полученные поля, как правило, содержат разного рода систематические ошибки и для практического использования нуждаются в процедуре коррекции. В настоящей работе рассмотрены некоторые наиболее распространенные процедуры коррекции и оценена их применимость к результатам проекта мезомасштабного климатического моделирования CORDEX, в рамках которого были построены климатические проекции на нескольких связках МОЦАО-РКМ для различных регионов мира.

Нами было показано, что данные CORDEX требуют значительной коррекции, особенно данные о количестве осадков, которые оказываются завышенными в некоторых районах в несколько раз. Скорректированные модельные поля были подвергнуты дальнейшей статистической регионализации с использованием данных наблюдений до более высокого, чем в РКМ пространственного разрешения. В результате были получены прогностические поля температуры воздуха и количества осадков с пространственным разрешением 1 км и разрешением по времени 1 сутки за каждый год с 1977 по 2100, а также средние многолетние за исторический период 1977-2005 гг. и по прогностическим десятилетиям с 2006 по 2100 гг. Указанные данные доступны по запросу.

Заметим, что полученные в данной работе климатические поля могут быть использованы для гидрологического и гляциологического моделирования только лишь в качестве входных параметров или граничных условий. Т.е. следует учитывать региональные микроклиматические эффекты (которые не были учтены при подготовке этих данных) для конкретного ледника или группы ледников уже непосредственно при моделировании – температурный скачок при переходе на поверхность ледника, особенности рельефа при использовании полей осадков. Кроме того, в данной работе были рассмотрены только 2 основных климатических параметра – температура воздуха и осадки, а для оценки поверхностного баланса массы горных ледников важно также учитывать радиационный баланс (и его прогностические аномалии для будущих проекций) и турбулентные потоки тепла. Это – задачи для отдельной работы.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 20-05-00681 «Эволюция оледенения Внутреннего Тянь-Шаня в условиях климатических изменений и техногенного воздей-

ствия». Авторы выражают благодарность за предоставленные сотрудниками КыргызГидромета данные сетевых метеостанций Кыргызской Республики. Работа О.О. Рыбака получила поддержку в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

Баетов, Б.И., Архангельская, А.В. (2015) Изменение водности рек и ее вызовы гидроэнергетической безопасности, *Вестник КРСУ*, т. 15, № 1, с. 140-143.

Володин, Е.М., Галин, В.Я., Грицун, А.С., Гусев, А.В., Дианский, Н.А., Дымников, В.П., Ибраев, Р.А., Калмыков, В.В., Кострыкин, С.В., Кулямин, Д.В., Лыкосов, В.Н., Мортиков, Е.В., Рыбак, О.О., Толстых, М.А., Фадеев, Р.Ю., Чернов, И.А., Шашкин, В.В., Яковлев, Н.Г. (2016) *Математическое моделирование Земной системы*, под ред. Яковлева Н.Г., М., МАКС Пресс, 328 с.

Гандин, Л.С., Каган, Р.Л. (1976) *Статистические методы интерпретации метеорологических данных*, Л., Гидрометеиздат, 360 с.

Муравьев, Я.Д. (1985) Снежный покров горных районов Камчатки, *Вопросы географии Камчатки*, № 9, с. 30-40.

Поповнин, В.В., Губанов, А.С., Сатылканов, Р.А., Эрменбаев, Б.О. (2021) Реконструкция баланса массы ледника Сары-Тор по метеорологическим данным, *Лёд и Снег*, т. 61, № 1, с. 58-74.

Постникова, Т.Н., Рыбак, О.О. (2021) Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования горного оледенения. Часть 1. Общий подход и архитектура моделей, *Лед и Снег*, т. 61, № 4, с. 620-636.

Постникова, Т.Н., Рыбак, О.О. (2022) Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования горного оледенения. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения, *Лед и Снег*, т. 62, № 2, с. 287-304.

Сатылканов, Р.А. (2016) Современная динамика основных параметров климата Иссык-Кульской котловины, *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*, № 9, с. 23-34.

Черкасов, П.А. (2004) *Расчет составляющих водно-ледового баланса внутриматериковой ледниковой системы*, Алматы, Каганат, 334 с.

Швер, Ц.А. (1976) *Атмосферные осадки на территории СССР*, Ленинград, Гидрометеиздат, 302 с.

Aizen V.B., Aizen E.M. and Melack J.M. (1995) Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tian Shan, Central Asia. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 31, pp. 1113-1129.

Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., Aizen, E. (2006) Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 43, pp. 202-213.

ALOS DEM: Japan Aerospace Exploration Agency (2021) ALOS World 3D 30 meter DEM. V3.2, <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>.

Barry, R. (2008) *Mountain weather and climate*, 3rded., Cambridge, Cambridge University Press, 497 p.

Bernauer, T., Siegfried, T. (2012) Climate change and international water conflict in Central Asia, *Journal of Piece Research*, vol. 49, pp. 227-239.

Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P. (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophysical Research Letter*, vol. 35, L20-709.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, available at: <https://cordex.org/>.

Dahri, Z.H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, B., Khan, A., Kabat, P. (2016) An appraisal of precipitation distribution in the high-altitude catchments of the Indus basin, *Science of The Total Environment*, vol. 548-549, pp. 289-306, ISSN 0048-9697.

Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, pp. 140-158.

Didovets, I., Lobanova, A., Krysanova, V., Menz, C., Babagalieva, Z., Nurbatsina, A., Gavrilenko, N., Khamidov, V., Umirbekov, A., Qodirov, S., Muhyew, D., Hattermann, D.F. (2021) Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 34, 100779, ISSN 2214-5818.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radic, V., Slangen, A. (2019) GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections, *Journal of Glaciology*, vol. 65(251), pp. 453-467.

Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemins, P.J., Higdon, D., Winter, J.M. (2022) Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 149, pp. 863-882.

Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., Chu, X. (2021) Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables, *Journal of Water and Climate Change*, vol. 12, no. 2, pp. 401-419.

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C. (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 2547-2559.

Fowler, H., Blenkinsop, S., Tebaldi C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp. 1547-1578.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, pp. 726-731.

Ibatullin, S. (2009) *The impact of climate change on water resources in Central Asia. Sector report no. 6*, in S. Ibatullin, V. Yasinsky, A. Mironenkov, Almaty, Rep. Kazakhstan, Eurasian Development Bank, 43 p.

Ji, X., Li, Y., Luo, X., He, D., Guo, R., Wang, J., Bai, Y., Yue, C., Liu, C. (2020) Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin, *Atmospheric Research*, vol. 242, 104964, ISSN 0169-8095.

Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. (2020) Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 5, 054009.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., Maeyer, Ph. (2018) 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*, vol. 10, 1046.

Maraun, D. (2016) Bias Correcting Climate Change Simulations – a Critical Review, *Current Climate Change Reports*, vol. 2, pp. 211-220.

Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020) Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica, *Water*, vol. 12, p. 482.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles, *J. Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290

Qiu, Y., Feng, J., Yan, Z., Wang, J. (2022) HCPD-CA: high-resolution climate projection dataset in central Asia, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2195-2208, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-2195-2022>.

Ranhao, S., Baiping, Z., Jing, T. (2008) A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing Mountains, *Mountain Research and Development*, vol. 28, no. 3/4, pp. 318-325.

Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P.L. (2006) Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *International Journal of Climatology*, vol. 26, no. 5, pp. 679-685.

Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N., Zhumabayev, D. (2020) Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia, *Water*, vol. 12, p. 627.

Siegfried, T., Bernauer, T., Guinnet, R., Sellars, S., Robertson, A.W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., Yakovlev, A. (2012) Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, vol. 112, pp. 881-899.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., Beniston, M. (2012) Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 725-731.

Switanek, B.M., Troch, A.P., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., Demaria, E.M.C. (2017) Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 6, pp. 2649-2666.

Terink, W., Hurkmans, R.T.W.L., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R. (2010) Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, pp. 687-703, available at: <https://doi.org/10.5194/hess-14-687-2010>.

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2012) Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, vol. 112, pp. 449-468.

Top, S., Kotova, L., De Cruz, L., Anishevich, 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. (2021) Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain, *Geosci. Model Dev.*, vol. 14, pp. 1267-1293.

Wilks, D.S., Wilby, R.L. (1999) The weather generation game: a rereview of stochastic weather models, *Progr. Phys. Geography*, vol. 23, pp. 329-357.

Van Tricht, L., Paice, C.M., Rybak, O., Satylkanov, R., Popovnin, V., Solomina, O., Huybrechts, P. (2021) Reconstruction of the Historical (1750-2020) Mass Balance of Bordu, Kara-Batkak and Sary-Tor Glaciers in the Inner Tien Shan, Kyrgyzstan, *Front. Earth Sci.*, vol. 9, 734802, doi: 10.3389/feart.2021.734802.

Velasquez, P., Messmer, M., Raible, C.C. (2020) A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 13, pp. 5007-5027.

Xie, Y., Dong, G., Wang, Y., Fan, D., Tian, Z., Tan, J., Wu, W., Zhang, M. (2021) High-Resolution Ensemble Projection of Mean and Extreme Precipitation Over China Based on Multiple Bias-Corrected RCM Simulations, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 771384.

Yu, X., Zhao, Y., Ma, X., Yao, J., Li, H. (2018) Projected changes in the annual cycle of precipitation over central Asia by CMIP5 models, *Int. J. Climatology*, vol. 38, p. 1-16.

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

References

Baetov B.I., Arhangel'skaya A.V. 2015. Izmenenie vodnosti rek i ee vyzovy gidroenergeticheskoy bezopasnosti [Change in the water content of rivers and its challenges to hydropower security], *Vestnik KRSU*, vol. 15, no. 1, pp. 140-143.

Cherkasov, P.A. (2004) *Raschet sostavlyayushchikh vodno-ledovogo balansa vnutrikontinental'noy lednikovoĭ sistemy* [Calculation of the components of the water-ice balance of the intracontinental glacial system], Kaganat, Almaty, Kazakhstan, 334 p.

Volodin, E.M., Galin, V.Ya., Gritsun, A.S., Gusev, A.V., Diansky, N.A., Dymnikov, V.P., Ibraev, R.A., Kalmykov, V.V., Kostrykin, S.V., Kulyamin, D.V., Lykosov, V.N., Mortikov, E.V., Rybak, O.O., Tolstykh, M.A., Fadeev, R.Yu., Chernov, I.A., Shashkin, V.V., Yakovlev, N.G. (2016) *Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy* [Mathematical modeling of the Earth system], in Yakovleva N.G. (ed.), MAKS Press, Moscow, Russia, 328 p.

Gandin, L.S., Kagan, R.L. (1976) *Statisticheskie metody interpretacii meteorologicheskikh dannyh* [Statistical methods of interpretation of meteorological data], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 360 p.

Muravyov, Ya.D. (1985) Snezhnyy pokrov gornyx rayonov Kamchatki [Snow cover of Kamchatka mountain regions], *Voprosy geografii Kamchatki*, no. 9, pp. 30-40.

Postnikova, T.N., Rybak, O.O. (2021) Global'nye glyaciologicheskie modeli: novyj etap v razvitii metodov prognozirovaniya gornogo oledeneniya. Chast' 1. Obshchij podhod i arhitektura modelej [Global glaciological models: a new stage in the development of mountain glaciation prediction methods. Part 1. General Approach and Model Architecture], *Lyod i Sneg*, vol. 61, no. 4, pp. 620-636.

Postnikova, T.N., Rybak, O.O. (2022) Global'nye glyaciologicheskie modeli: novyj etap v razvitii metodov prognozirovaniya gornogo oledeneniya. Chast' 2. Postanovka eksperimentov i prakticheskie prilozheniya [Global glaciological models: a new stage in the development of mountain glaciation prediction methods. Part 2. Setting up experiments and practical applications,], *Lyod i Sneg*, vol. 62, no. 2, pp. 287-304.

Popovnin, V.V., Gubanov, A.S., Satylkanov, R.A., Ermenbaev, B.O. (2021) Rekonstrukciya balansa massy lednika Sary-Tor po meteorologicheskim dannym [Reconstruction of the mass balance of the Sary-Tor Glacier from meteorological data], *Lyod i Sneg*, vol. 61, no. 1, pp. 58-74.

Satylkanov, R.A. (2016) Sovremennaya dinamika osnovnyh parametrov klimata Issyk-Kul'skoj kotloviny [Modern dynamics of the main climate

parameters of the Issyk-Kul basin], *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*, no. 9, pp. 23-34.

Schwer, Ts.A. (1976) *Atmosfernye osadki na territorii SSSR* [Atmospheric precipitation on the territory of the USSR], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 302 p.

Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., Aizen, E. (2006) Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 43, pp. 202-213.

ALOS DEM: Japan Aerospace Exploration Agency (2021) ALOS World 3D 30 meter DEM. V3.2, <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>.

Barry, R. (2008) *Mountain weather and climate*, 3rded., Cambridge, Cambridge University Press, 497 p.

Bernauer, T., Siegfried, T. (2012) Climate change and international water conflict in Central Asia, *Journal of Piece Research*, vol. 49, pp. 227-239.

Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P. (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophysical Research Letter*, vol. 35, L20-709.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, available at: <https://cordex.org/>.

Dahri, Z.H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, B., Khan, A., Kabat, P. (2016) An appraisal of precipitation distribution in the high-altitude catchments of the Indus basin, *Science of The Total Environment*, vol. 548-549, pp. 289-306, ISSN 0048-9697.

Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, pp. 140-158.

Didovets, I., Lobanova, A., Krysanova, V., Menz, C., Babagalieva, Z., Nurbatsina, A., Gavrilenko, N., Khamidov, V., Umirbekov, A., Qodirov, S., Muhyew, D., Hattermann, D.F. (2021) Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 34, 100779, ISSN 2214-5818.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radic, V., Slangen, A. (2019) GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections, *Journal of Glaciology*, vol. 65 (251), pp. 453-467.

Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemins, P.J., Higdon, D., Winter, J.M. (2022) Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 149, pp. 863-882.

Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., Chu, X. (2021) Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and

temperature variables, *Journal of Water and Climate Change*, vol. 12, no. 2, pp. 401-419.

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C. (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 2547-2559.

Fowler, H., Blenkinsop, S., Tebaldi C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp. 1547-1578.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, pp. 726-731.

Ibatullin, S. (2009) *The impact of climate change on water resources in Central Asia. Sector report no. 6*, in S. Ibatullin, V. Yasinsky, A. Mironenkov, Almaty, Rep. Kazakhstan, Eurasian Development Bank, 43 p.

Ji, X., Li, Y., Luo, X., He, D., Guo, R., Wang, J., Bai, Y., Yue, C., Liu, C. (2020) Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin, *Atmospheric Research*, vol. 242, 104964, ISSN 0169-8095.

Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. (2020) Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 5, 054009.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., Maeyer, Ph. (2018) 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*, vol. 10, 1046.

Maraun, D. (2016) Bias Correcting Climate Change Simulations – a Critical Review, *Current Climate Change Reports*, vol. 2, pp. 211-220.

Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020) Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica, *Water*, vol. 12, p. 482.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles, *J. Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.

Qiu, Y., Feng, J., Yan, Z., Wang, J. (2022) HCPD-CA: high-resolution climate projection dataset in central Asia, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2195-2208, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-2195-2022>.

Ranhao, S., Baiping, Z., Jing, T. (2008) A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing Mountains, *Mountain Research and Development*, vol. 28, no. 3/4, pp. 318-325.

Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P.L. (2006) Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *International Journal of Climatology*, vol. 26, no. 5, pp. 679-685.

Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N., Zhumabayev, D. (2020) Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia, *Water*, vol. 12, p. 627.

Siegfried, T., Bernauer, T., Guinnet, R., Sellars, S., Robertson, A.W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., Yakovlev, A. (2012) Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, vol. 112, pp. 881-899.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., Beniston, M. (2012) Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 725-731.

Switanek, B.M., Troch, A.P., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., Demaria, E.M.C. (2017) Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 6, pp. 2649-2666.

Terink, W., Hurkmans, R.T.W.L., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R. (2010) Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, pp. 687-703, available at: <https://doi.org/10.5194/hess-14-687-2010>.

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2012) Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, vol. 112, pp. 449-468.

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. (2021) Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain, *Geosci. Model Dev.*, vol. 14, pp. 1267-1293.

Wilks, D.S., Wilby, R.L. (1999) The weather generation game: a rereview of stochastic weather models, *Progr. Phys. Geography*, vol. 23, pp. 329-357.

Van Tricht, L., Paice, C.M., Rybak, O., Satylkanov, R., Popovnin, V., Solomina, O., Huybrechts, P. (2021) Reconstruction of the Historical (1750-2020) Mass Balance of Bordu, Kara-Batkak and Sary-Tor Glaciers in the Inner Tien Shan, Kyrgyzstan, *Front. Earth Sci*, vol. 9, 734802, doi: 10.3389/feart.2021.734802.

Velasquez, P., Messmer, M., Raible, C.C. (2020) A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 13, pp. 5007-5027.

Xie, Y., Dong, G., Wang, Y., Fan, D., Tian, Z., Tan, J., Wu, W., Zhang, M. (2021) High-Resolution Ensemble Projection of Mean and Extreme Precipitation Over China Based on Multiple Bias-Corrected RCM Simulations, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 771384.

Yu, X., Zhao, Y., Ma, X., Yao, J., Li, H. (2018) Projected changes in the annual cycle of precipitation over central Asia by CMIP5 models, *Int. J. Climatology*, vol. 38, p. 1-16.

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

Статья поступила в редакцию (Received): 04.12.2022 г.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 07.05.2023 г.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Корнева, И.А., Рыбак, О.О., Сатылканов, Р.А. (2023) Климатические проекции для центрального и внутреннего Тянь-Шаня на основе данных CORDEX, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 2, с. 133-164, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-133-164.

Korneva, I.A., Rybak, O.O., Satylkanov, R.A. (2023) Climate projections for Central and Inner Tian Shan based on CORDEX data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 2, pp. 133-164, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-133-164.