



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 8–20

*Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 8–20

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-8-20>, EDN: NBJJYY

Научная статья

УДК 551.583.1



## Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки по сценариям проектов CMIP5 и CMIP6

Мами Магбини Токпа<sup>1</sup>, В. А. Лобанов<sup>1✉</sup>, Н. В. Короткова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Мами Магбини Токпа, аспирант, [mtmamy2013@gmail.com](mailto:mtmamy2013@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2960-6666>

Лобанов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, [lobanov@EL6309.spb.edu](mailto:lobanov@EL6309.spb.edu), <https://orcid.org/0000-0002-9904-1034>

Короткова Надежда Владимировна, кандидат географических наук, доцент, [fonadia@yandex.ru](mailto:fonadia@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4635-0036>

**Аннотация.** По результатам исторического эксперимента проектов CMIP5 и CMIP6 оценивается эффективность сценарных оценок (RCP/SSP1 2.6, RCP/SSP2 4.5 и RCP/SSP5 8.5) будущей температуры воздуха для Центральной Африки для глобальных климатических моделей IPSL и BCC. Результаты моделирования этих проектов сравниваются друг с другом и с наблюдениями метеорологических станций в регионе как для исторического экспериментального периода, так и с наблюдениями последних лет для осуществления будущих климатических прогнозов. На основе исторического эксперимента и будущих оценок за последние 16 лет было установлено, что версии моделей проекта CMIP6 не являются более эффективными, чем результаты CMIP5 при сравнении с данными наблюдений. В связи с тем, что различия между данными наблюдений и моделирования имеют систематический характер, результаты сценарных оценок были скорректированы по принципу сходства темпов роста температуры для исторического периода наблюдений и будущего сценарного периода до конца 21 века, который разделен на 3 интервала для оценки средних значений: 2011–2040, 2041–2070 и 2071–2100 гг. Будущие температуры воздуха в Центральной Африке были оценены как для средних значений по территории, так и для температур отдельных метеостанций на основе скорректированных сценарных значений, которые отличались по CMIP5 и CMIP6 не более чем на 0,1°C. Получено, что среднее по территории повышение температуры во все месяцы к концу XXI века достигает 2,0–2,3°C, а по оценкам на отдельных метеостанциях получены пространственные распределения будущих температур, которые показывают наибольший рост на севере региона вблизи Сахеля.

**Ключевые слова:** проекты CMIP5/CMIP6, Центральная Африка, модели IPSL/BCC, сценарии RCP/SSP, температура воздуха

**Для цитирования:** Мами Магбини Токпа, Лобанов В. А., Короткова Н. В. Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки по сценариям проектов CMIP5 и CMIP6 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 8–20. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-8-20>, EDN: NBJJYY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Assessment of future Central African air temperatures under the CMIP5 and CMIP6 project scenarios

Mami Magbini Tokpa<sup>1</sup>, V. A. Lobanov<sup>1✉</sup>, N. V. Korotkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya St., St. Petersburg 192007, Russia

<sup>2</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Mami Magbini Tokpa<sup>1</sup>, [mtmamy2013@gmail.com](mailto:mtmamy2013@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2960-6666>

Vladimir A. Lobanov<sup>1</sup>, [lobanov@EL6309.spb.edu](mailto:lobanov@EL6309.spb.edu), <https://orcid.org/0000-0002-9904-1034>

Nadezhda V. Korotkova<sup>2</sup>, [fonadia@yandex.ru](mailto:fonadia@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4635-0036>

**Abstract.** Based on the results of the historical experiment of the CMIP5 and CMIP6 projects, the effectiveness of the scenario estimates (RCP/SSP1 2.6, RCP/SSP2 4.5 and RCP/SSP5 8.5) of the future air temperature for Central Africa for the IPSL and BCC global climate models is evaluated and the simulation results of these projects are compared with each other and with the observations of meteorological stations in the region, both for the historical experimental period and with the observations of recent years for the implementation of future climate projections. Based on historical experiment and future evaluations over the past 16 years, it has been determined that the CMIP6 project model versions are no more effective than the CMIP5 results when compared with observational data.

Due to the fact that the differences between observational and modeling data are systematic, the results of scenario estimates were adjusted according to the principle of similarity of temperature growth rates for the historical observation period and the future scenario period until the end of the 21st century, which is divided into 3 intervals for estimating average values: 2011–2040, 2041–2070 and 2071–2100. Future air temperatures in Central Africa were estimated both for the average values for the territory and for the temperatures of individual weather stations based on the adjusted scenario values, which differed in CMIP5 and CMIP6 by no more than 0.1°C. It was found that the average temperature



increase over the territory in all months by the end of the 21st century reaches 2.0–2.3°C, and according to estimates at individual weather stations, spatial distributions of future temperatures were obtained, which show the greatest increase in the north of the region near the Sahel.

**Keywords:** CMIP5/CMIP6 projects, Central Africa, IPSL/BCC models, RCP/SSP scenarios, air temperature

**For citation:** Mami Magbini Tokpa, Lobanov V. A., Korotkova N. V. Study of spatial distribution of elements in the system “water – bottom sediments” of the Uzynbulak creek of the Semipalatinsk test site. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 8–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-8-20>, EDN: NBJJYY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

## Введение

Значительное потепление глобального климата, вызванное выбросами парниковых газов, имеет потенциально катастрофические последствия для окружающей среды в целом. Это привело к временным и пространственным изменениям климатических переменных в глобальном масштабе [1–5]. Адаптация к этим изменениям имеет важное значение, и необходимо количественно оценить будущие риски и уязвимость. Глобальные климатические модели (ГКМ) могут имитировать влияние выбросов парниковых газов (ПГ) на климатические системы и дать оценку будущих параметров климатической системы на основе этой информации [6, 7]. Проект по сопоставлению моделей (CMIP, в свободном доступе) – это основной набор данных, который предоставляет ученым самые современные результаты, полученные по климатическим моделям.

Модели CMIP были значительно усовершенствованы в течение многих лет для устранения неопределенностей, связанных с отсутствием полного прояснения физических процедур для работы с климатической системой и климатическими альтернативами, от CMIP1 до самой последней версии CMIP6 [8–11]. Эксперименты и модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА), включенные в CMIP5, являются более комплексными и сложными, они охватывают более широкий круг научных проблем с использованием нескольких репрезентативных путей концентрации (RCP). Сценарии будущего в CMIP5 имеют начальный год 2005, а начальным годом для CMIP6 является 2015. Новые сценарии в CMIP6, известные как общие социально-экономические пути (SSP), позволяют лучше оценить последствия политики в области изменения климата [12]. Поэтому они являются более точными, чем предыдущие версии. В некоторых исследованиях сообщалось о надежности новых моделей CMIP6 по сравнению с моделями CMIP5 в Америке, Азии, Африке, Канаде, Китае и Корее [12–14, 16–20].

В данном исследовании мы оцениваем с помощью результатов исторического эксперимента проектов CMIP5 и CMIP6 эффективность сценарных оценок будущей температуры воздуха для региона Центральной Африки для двух моделей климата, выбор и обоснование которых были даны в предыдущем исследовании [21]. Целью

также является сравнение результатов моделирования в проектах CMIP5 и CMIP6 между собой и с данными наблюдений на метеостанциях региона как за период исторического эксперимента, так и по данным наблюдений последних лет для начала будущих проекций климата.

## Климатическое описание района исследования

В данной статье рассматривается территория между 13,8° северной широты и 14,4° южной широты и между 6,7° и 33,8° восточной долготы (рис. 1.). Пересекая экватор и омываемая Атлантическим океаном на западе, эта часть африканской межтропической зоны находится в жарком и влажном тропическом климате, характеризующемся высокими температурами в течение всего года со среднегодовой температурой около +26°C.

В этом регионе с климатом, на который влияют движения межтропической зоны конвергенции, в январе отмечаются относительно низкие температуры (до максимальных 25–27°C в районе Гвинейского залива) по всему региону, с самыми низкими значениями на северо-востоке и в горной юго-восточной части территории (20–22°C) по сравнению с центром. Это связано с влиянием зимней фазы африканского муссона, во время которой холодный, сухой воздух из Северной Африки перемещается на юг. Увеличение приходящей радиации нагревает всю территорию, достигая максимальных температур в марте и апреле, особенно в северной части (до 32–33°C). Летом начинается вторая фаза африканского муссона, когда внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) перемещается в сторону северного полушария, за ним следует перемещение влажного воздуха из Атлантики. Присутствие облаков и немного более прохладного воздуха с океана приводит к общему снижению температуры, что особенно заметно в западной и юго-западной частях территории около Гвинейского залива, где температура становится такой же, как в горной юго-восточной части (20–22°C). Осенью происходит естественное радиационное потепление территории между муссонами, с максимальными температурами в северной части вблизи Сахеля (до 27–28°C) и минимальными температурами в горных районах (21–22°C). Температурные колебания в регионе составляют от 7–10°C зимой до 12–13°C в апреле [21].

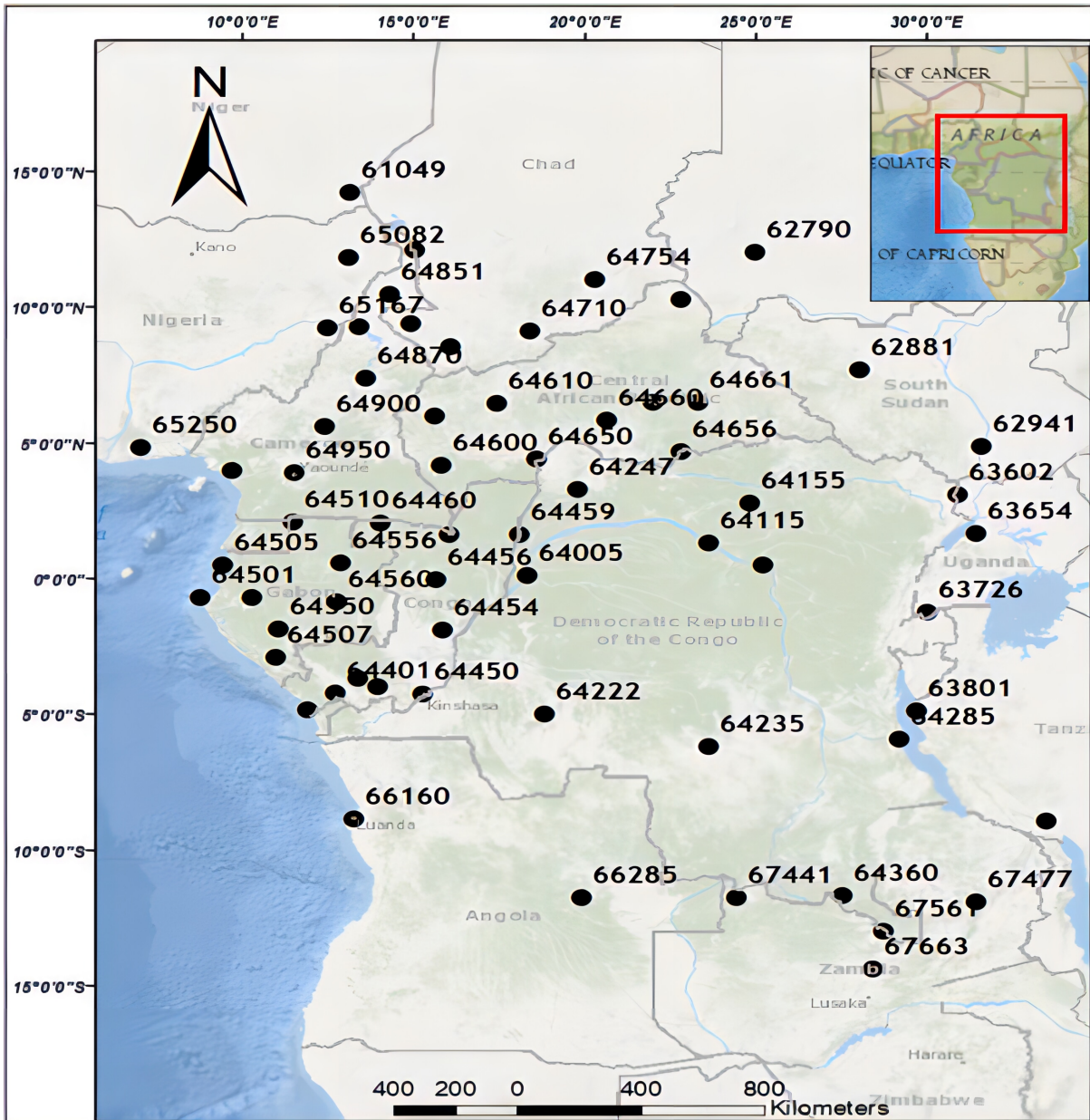


Рис. 1. Схема расположения метеостанций (цвет онлайн)

### Источники данных

Климатические модели наиболее широко используются для оценки будущего климата Земли. В данном исследовании рассматривались отобранные и статистически проанализированные ряды наблюдений среднемесячной температуры воздуха с шестидесяти пяти (65) метеорологических станций в районе исследования, а также исторические и будущие сценарии по проектам CMIP5 и CMIP6 для приземной температуры воздуха. Были выбраны две глобальные климатические модели IPSL и BCC для двух последних стадий проекта CMIP. Результаты исторического эксперимента и будущих проекций климата

были получены с сайта <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/> для трех сценариев будущего климата с уровнями энергетического антропогенного воздействия на конец XXI века в 2.6, 4.5 и 8.5 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Низкие (RCP2.6 и SSP1–2.6) и средний (RCP4.5 и SSP2–4.5) радиационные воздействия, промежуточные стабилизационные сценарии предполагают реализацию инициатив по снижению выбросов. Напротив, сценарии с высоким уровнем радиационного воздействия (RCP8.5 и SSP5–8.5) представляет собой возврат к обычной практике в условиях продолжающейся зависимости от ископаемого топлива [15].



### Методика исследования

Методика, применяемая в данном исследовании, основана на сравнении наблюдений на метеостанциях с результатами исторического эксперимента, который охватывает период 1850–2005 гг. для проекта СМIP5 и 1850–2014 гг. для проекта СМIP6 и с будущими сценарными оценками проектов СМIP5 и СМIP6 двух моделей климата французской (IPSL) и китайской (BCC), которые были признаны наиболее эффективными для данного региона [22], основываясь на результатах исследования [22], показывающих очень низкую корреляцию между наблюдаемыми температурами и результатами исторических экспериментов за совместный многолетний период, можно сравнивать только многолетние средние значения. Для сравнения средних многолетних значений был выбран как весь общий период наблюдений, который различен для разных метеорологических станций, так и отдельные периоды продолжительностью 30 лет, с особым акцентом на соответствие средних значений за самый последний период наблюдений 1976–2005 гг. для проекта СМIP5 и 1981–2010 гг. для проекта СМIP6. Очевидно, что проект, данные которого имеют наибольшую корреляцию со средними многолетними наблюдениями на станциях, является наиболее эффективным. Оценка связи между значениями температуры различных проектов между собой и с наблюдениями на станциях заключается в построении регрессионных зависимостей вида:  $Y = B_1X + B_0$  с оценкой их параметров и остатков (отклонений от линии регрессии), где  $B_1$ ,  $B_0$  – коэффициенты уравнения регрессии,  $R$  – коэффициент корреляции.

При определении наиболее эффективного проекта СМIP оцениваются систематические погрешности, связанные с коэффициентами  $B_1$  и  $B_0$  и затем осуществляется корректировка как данных исторического эксперимента, так и будущих проекций. Для этой цели применяется принцип подобия скорости роста температуры как за исторический период наблюдений, так и за будущий сценарный период до конца XXI века, который делится на 3 интервала для оценки средних значений: 2011–2040, 2041–2070 и 2071–2100 гг. в проекте СМIP6. Скорости роста температуры или градиенты за период в 30 лет ( $\Delta$ ) рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta_1 = \bar{T}_{2_{\text{наб}}} - \bar{T}_{1_{\text{наб}}}, \Delta_2 = \bar{T}_{2_{\text{буд}}} - \bar{T}_{1_{\text{буд}}} \text{ и } \Delta_3 = T_{3_{\text{буд}}} - \bar{T}_{2_{\text{буд}}}, \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{ср}_1} = 1/2(\Delta_3 + \Delta_2) \text{ и } \Delta_{\text{ср}_2} = 1/2(\Delta_{\text{ср}_1} + \Delta_1), \quad (2)$$

где  $\bar{T}_{1_{\text{наб}}}$ ,  $\bar{T}_{2_{\text{наб}}}$  – средние температуры за два последовательных 30-летних периода наблюдений: 1951–1980 гг. и 1981–2010 гг.,  $\Delta_{\text{ср}_1}$  и  $\Delta_{\text{ср}_2}$  – средний градиент за будущий сценарный период 2011–2100 гг. и средний градиент по данным наблюдений и сценариям соответственно.

Корректировка средних сценарных температур за 3 будущих периода XXI века осуществляется по формулам:

$$\bar{T}_{\text{кор}(2011-2040)} = \bar{T}_{2_{\text{наб}}} + \Delta_{\text{ср}_2}, \quad (3)$$

$$\bar{T}_{\text{кор}(2041-2070)} = \bar{T}_{\text{кор}(2011-2040)} + \Delta_2, \quad (4)$$

$$\bar{T}_{\text{кор}(2071-2100)} = \bar{T}_{\text{кор}(2041-2070)} + \Delta_3, \quad (5)$$

где  $\bar{T}_{\text{кор}(2011-2040)}$ ,  $\bar{T}_{\text{кор}(2041-2070)}$ ,  $\bar{T}_{\text{кор}(2071-2100)}$  – откорректированные значения будущих сценарных средних температур соответственно за периоды 2011–2040, 2041–2070 и 2071–2100 гг.

В соответствии с (3) значение первого сценарного среднего ( $\bar{T}_{\text{кор}(2011-2040)}$ ) за период 2011–2040 гг. корректируется по среднему градиенту между средними градиентами наблюдаемых и сценарных данных и уже к этому откорректированному среднему добавляется градиент сценарных средних температур  $\Delta_2$  и определяется откорректированное значение за 2-й будущий период 2041–2070 гг., а затем к откорректированному  $\bar{T}_{\text{кор}(2041-2070)}$  добавляется градиент  $\Delta_3$  и определяется откорректированное значение за 3-й будущий период 2071–2100 гг.

Для объединения результатов исторического эксперимента с будущими сценарными оценками необходимо также корректировать 30-летние средние исторического эксперимента по данным наблюдений по формулам:

$$\bar{T}_{\text{кор}(1951-1980)} = \bar{T}_{\text{ист}(1951-1980)} + (\bar{T}_{1_{\text{наб}}} - \bar{T}_{\text{ист}(1951-1980)}), \quad (6)$$

$$\bar{T}_{\text{кор}(1981-2010)} = \bar{T}_{\text{ист}(1981-2010)} + (\bar{T}_{1_{\text{наб}}} - \bar{T}_{\text{ист}(1981-2010)}), \quad (7)$$

где  $\bar{T}_{\text{ист}(1951-1980)}$ ,  $\bar{T}_{\text{ист}(1981-2010)}$  – средние температуры по данным исторического эксперимента за периоды 1951–1980 гг. и 1981–2010 гг. соответственно;  $\bar{T}_{\text{кор}(1951-1980)}$ ,  $\bar{T}_{\text{кор}(1981-2010)}$  – откорректированные средние температуры по данным исторического эксперимента за периоды 1951–1980 гг. и 1981–2010 гг. соответственно.

### Сравнение результатов исторического эксперимента проектов СМIP5 и СМIP6 между собой и с данными наблюдений

Поскольку два проекта имеют разные годы окончания исторического эксперимента, сравнение проводилось для совместного периода 1950–2005 гг. с учетом года начала ряда наблюдений на метеостанциях. Средние значения смоделированных и наблюдаемых величин за этот общий период рассчитывались для каждой из 65 метеостанций на территории Центральной Африки для характерных месяцев каждого из четырех сезонов года: январь, апрель, июль и октябрь. При этом средние значения температур по СМIP5 и СМIP6 интерполировались в точки пространства с координатами метеостанций. Между средними температурами строилась регрессионная



зависимость для всех 65 точек пространства и рассчитывались ее коэффициенты  $B_1$  и  $B_0$  и коэффициент корреляции  $R$  (коэффициент детерминации  $R^2$ ), а также средняя погрешность ( $\Delta_{\text{ср}}$ ) и погрешности для максимальных ( $\Delta_{\text{макс}}$ ) и минимальных ( $\Delta_{\text{мин}}$ ) значений как разности между данными исторического эксперимента по СМIP5 и СМIP6 и такие же разности между наблюдаемыми и смоделированными средними. Результаты расчетов приведены в табл. 1 для двух климатических моделей – французской IPSL и китайской ВСС.

Из данных табл. 1 следует, что коэффициенты детерминации для зависимостей между средними температурами 1950–2005 гг. проектов СМIP5 и СМIP6 достаточно высокие и находятся в диапазоне  $R^2 = 0,8–0,9$ , а для зависимостей между наблюдениями и результатами моделирования очень низкие и статистически незначимы ( $R^2 = 0,0–0,1$ ). Этот результат свидетельствует о том, что данные исторических экспериментов в проектах СМIP5 и СМIP6 не сильно различаются, а глобальные модели климата не воспроизводят не только временную климатическую изменчивость, но и пространственную неоднородность, связанную с локальными особенностями климата. Поэтому даже средние значения за многолетний период не совпадают с аналогичными средними в пунктах наблюдений по территории.

Средние для территории разности между наблюдаемыми и смоделированными средними температурами ( $\Delta_{\text{ср}}$ ) не превышают в основном

$2^\circ\text{C}$ , причем эти систематические территориальные невязки меньше для осени и зимы (максимум  $1,1–1,3^\circ\text{C}$ ) и больше для весны и лета (максимум  $2,1–2,7^\circ\text{C}$ ), модель IPSL дает несколько меньшие разности, чем ВСС. Разности как для наибольших, так и для наименьших значений, обусловленных влиянием местных особенностей, могут достигать  $4–5,7^\circ\text{C}$  осенью и зимой и быть до  $10–13^\circ\text{C}$  весной и летом. Этот результат как раз и свидетельствует о том, что даже если в среднем для территории климатическая модель и дает небольшую систематическую погрешность, то в отдельных ее частях за счет влияния местных факторов эти погрешности могут быть в несколько раз больше и их пространственное распределение следует строить и анализировать.

Интересны также результаты сопоставления смоделированных средних по двум проектам СМIP5 и СМIP6. Хотя коэффициенты детерминации  $R^2$  между смоделированными данными и высокие, но есть систематические различия. Так, коэффициент  $B_1$  в случае отсутствия систематических различий должен быть равным 1,0, что соответствует тангенсу угла наклона линии регрессии, проходящей под углом  $45^\circ$ . Для французской модели IPSL это практически так, а для китайской ВСС коэффициент  $B_1 = 1,1$ , что приводит к занижению значений ниже среднего территориального и их завышению выше среднего. Коэффициент  $B_0$  характеризует систематическое отклонение в области предельных минимальных значений, и оно практически

Таблица 1

Результаты сравнения данных исторических экспериментов в проектах СМIP5 и СМIP6 и между проектами и данными наблюдений на метеостанциях Центральной Африки за период 1950–2005 гг.

IPSL							ВСС						
СМIP5 И СМIP6							СМIP5 И СМIP6						
Период	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	
Январь	1,0	-0,5	0,9	-0,3	1,2	0,1	1,1	-1,3	0,8	1,0	1,6	0,0	
Апрель	1,0	-0,8	0,9	-1,1	-0,3	-0,8	1,1	-2,2	0,8	1,1	3,2	-1,3	
Июль	0,9	0,5	0,8	-1,2	-0,7	-1,5	1,1	-1,5	0,8	1,0	2,3	-1,0	
Октябрь	1,0	-0,2	0,9	-1,2	-0,4	-1,9	1,1	-1,4	0,8	1,1	3,5	-1,1	
СМIP5 и наблюдения							СМIP5 и наблюдения						
Период	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	
Январь	0,3	16,9	0,1	-0,6	4,6	-4,2	0,2	18,3	0,1	0,0	4,6	-2,7	
Апрель	0,0	25,4	0,0	1,6	7,4	-8,3	-0,1	28,2	0,0	2,0	9,7	-5,2	
Июль	-0,1	24,5	0,0	-1,7	10,2	-9,9	0,0	24,3	0,0	-1,1	10,3	-12,4	
Октябрь	0,2	21,1	0,0	0,1	3,3	-5,7	0,1	22,9	0,0	0,8	5,7	-2,8	
СМIP6 и наблюдения							СМIP6 и наблюдения						
Период	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	
Январь	0,3	17,9	0,1	0,6	5,7	-1,9	0,2	18,9	0,1	-1,1	-3,1	-3,7	
Апрель	0,0	26,4	0,0	2,7	9,2	-6,5	0,0	27,3	0,0	1,0	8,2	-8,4	
Июль	-0,1	24,9	0,0	-0,6	12,0	-9,3	-0,1	26,1	0,0	-2,1	9,6	-13,0	
Октябрь	0,1	22,5	0,0	1,3	5,3	-3,1	0,0	24,6	0,0	-0,3	3,7	-4,3	



во всех случаях отрицательное и для модели ВСС в 1,5 раза больше, чем для IPSL. Аналогичным образом и отклонения между наибольшими и наименьшими значениями для модели ВСС больше и достигают 3,2–3,5°C, а для модели IPSL – 1,5–1,9°C.

По результатам анализа коэффициентов и отклонений можно сделать вывод, что для модели IPSL результаты расчетов по историческому эксперименту в проектах СМIP5 и СМIP6 практически не отличаются, и средние случайные отклонения не превышают 1°C. Для модели ВСС в полученных данных исторического эксперимента по двум проектам есть систематические отклонения: значения выше среднего завышены, ниже среднего – занижены и максимальные отклонения уже составляют 3,0–3,5°C. Сравнение с данными наблюдений показало, что для модели IPSL средние по модулю погрешности равны 1,0°C в проекте СМIP5 и 1,3°C в проекте СМIP6, а наибольшие достигают 8–10°C в проекте СМIP5 и 9–12°C в проекте СМIP6. Поэтому получается, что в проекте СМIP6 данные исторического эксперимента даже менее эффективны, чем в СМIP5. Для модели ВСС средние по модулю погрешности равны 1,0°C в проекте СМIP5 и 1,1°C в проекте СМIP6, а наибольшие достигают 10–12°C в проекте СМIP5 и 10–13°C в проекте СМIP6. Отсюда следует, что данные проекта СМIP6 не уменьшили расхождение с данными наблюдений и даже несколько увеличили их. Поэтому при оценке будущего климата нельзя надеяться только на сценарии

проекта СМIP6, а надо использовать и сценарные оценки проекта СМIP5, так как исторический эксперимент проекта СМIP6 не доказал, что результаты этого проекта эффективнее, чем СМIP5.

Для оценки устойчивости полученных в табл. 1 результатов общий период наблюдений был разделен на две части 1950–1977 гг. и 1978–2005 гг. и проведены такие же сравнения как между двумя полупериодами, так и каждого из них с общим периодом и получены практически такие же выводы. Так, для китайской модели ВСС при сравнении данных моделирования СМIP5 и СМIP6  $R^2 = 0,8$ , коэффициент  $B_1 = 1,1$ , коэффициент  $B_0$  также отрицательный, но уже в 2 раза больше, чем за период 1950–2005 гг., а среднее отклонение на 0,2°C меньше, хотя отклонения при наибольших и наименьших значениях остаются такими же и достигают 3,5°C. При сравнении данных моделирования с данными наблюдений  $R^2 = 0,0–0,1$  и наибольшие отклонения также достигают 10–13°C, хотя средние отклонения несколько большие и равны 1,6°C против 1,1°C за весь период.

#### Сравнение результатов будущих сценариев проектов СМIP5 и СМIP6

Как и в случае с историческими данными, будущие сценарии (2.6, 4.5 и 8.5) RCP/SSP сравнивались для проектов СМIP5 и СМIP6, и полученные результаты представлены в табл. 2 для модели ВСС и в табл. 3 для модели IPSL, где период 1: 2011–2040 гг., период 2: 2041–2070 гг.

Таблица 2

Результаты сравнения будущих сценарных оценок в проектах СМIP5 и СМIP6 для территории Центральной Африки по модели ВСС

Период	Сценарий											
	2,6				4,5				8,5			
	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$
Январь												
1	-2,1	0,9	1,8	-1,3	-1,4	0,9	1,5	-0,6	-1,6	0,7	1,5	-0,8
2	-2,0	1,0	1,7	-0,1	-1,6	1,0	1,7	0,0	-1,7	0,7	1,7	-0,4
3	-1,4	1,1	1,9	-0,2	-2,4	1,2	2,2	0,4	-2,8	0,7	2,1	-3,6
Апрель												
1	-2,5	0,9	3,2	-1,4	-1,8	0,9	2,9	-2,0	-1,9	0,7	2,9	-1,2
2	-2,3	1,0	2,7	-1,1	-2,4	1,0	2,9	-1,6	-2,5	0,7	2,9	-2,4
3	-1,5	1,1	3,1	-0,5	-3,0	1,2	3,6	-0,8	-3,7	0,8	3,6	-2,1
Июль												
1	-1,7	0,9	1,9	-1,7	-1,5	0,8	1,7	-2,2	-1,7	0,7	1,9	-2,1
2	-2,0	1,0	2,2	-1,2	-2,2	0,9	1,8	-1,8	-3,1	0,7	1,5	-3,0
3	-1,1	1,0	2,1	-0,7	-1,9	1,2	2,1	-1,0	-3,8	0,8	1,4	-3,4
Октябрь												
1	-1,6	1,0	3,2	-1,0	-1,4	0,9	3,1	-1,5	-1,5	0,8	3,2	-2,0
2	-1,9	1,1	3,5	-1,0	-1,8	1,0	3,1	-1,1	-2,1	0,8	3,0	-2,5
3	-1,3	1,1	3,8	-1,4	-1,9	1,3	3,5	-0,8	-3,2	0,9	3,5	-2,8



Таблица 3

**Результаты сравнения будущих сценарных оценок в проектах СМIP5 и СМIP6 для территории Центральной Африки по модели IPSL**

Период	Сценарий											
	2,6				4,5				8,5			
	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	$B_0$	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$
Январь												
1	-0,3	-0,4	0,3	1,1	-0,8	-1,3	1,4	0,0	-0,3	-0,5	0,2	0,7
2	-0,2	-0,3	0,6	0,9	-0,6	-1,1	1,4	0,2	-1,0	-0,5	0,0	-0,3
3	-0,6	-0,3	0,4	0,3	-0,9	-1,2	1,7	-0,1	-0,3	-0,1	1,3	0,8
Апрель												
1	-1,1	-0,3	-0,7	-0,2	-0,7	-1,2	-0,5	-1,3	-1,4	-0,4	-0,7	-0,2
2	-1,1	-0,2	-0,6	-0,2	-1,1	-1,0	-0,3	-1,0	-2,5	-0,4	-0,6	-0,4
3	-1,4	-0,2	-0,5	-0,4	-1,3	-1,1	-0,6	-0,9	-2,4	0,0	0,2	0,9
Июль												
1	0,7	-0,3	0,6	-0,5	1,9	-1,1	-0,4	-2,1	0,3	-0,4	0,6	-0,1
2	0,0	-0,2	0,8	-0,3	0,8	-1,0	-0,3	-1,8	0,0	-0,4	1,0	-0,7
3	-0,3	-0,2	0,6	-0,5	0,2	-1,1	-0,8	-1,6	1,5	0,0	1,5	0,7
Октябрь												
1	-0,6	-0,4	0,7	-0,8	0,0	-1,3	-0,7	-1,5	-0,5	-0,4	0,2	-0,8
2	-0,6	-0,3	0,7	-0,2	-0,3	-1,1	-1,7	-0,8	-1,4	-0,5	0,4	-0,5
3	-1,2	-0,3	0,5	-0,9	-0,5	-1,2	-0,7	-1,6	-0,1	-0,1	1,2	0,1

и период 3: 2071–2100 гг. Коэффициенты  $R^2$  и  $B_1$  не приводятся в таблицах, так как они практически одинаковы и равны  $R^2 = 0,8$  для ВСС и  $R^2 = 0,9$  для IPSL, коэффициент  $B_1 = 1,1$  для ВСС и  $B_1 = 1,0$  для IPSL. Поэтому вывод практически такой же, как и по данным исторического эксперимента: модель ВСС в двух проектах имеет большие различия, чем модель IPSL, в которой данные двух проектов больше связаны и систематические отклонения отсутствуют.

Анализ отклонений в табл. 2, 3 также свидетельствует о том, что модель ВСС в проекте СМIP6 больше отличается от такой же модели в проекте СМIP5, чем модель IPSL. Наибольшие отклонения для модели ВСС достигают 3,5–3,8°C, а для модели IPSL – 1,7–2,1°C, а средние отклонения ( $\Delta_{\text{ср}}$ ) для IPSL не превышают 0,5°C за исключением сценария 4.5, где они достигают 1,2–1,3°C. В модели ВСС  $\Delta_{\text{ср}}$  находится в диапазоне 0,7–1,3°C и практически все  $\Delta$  увеличиваются с ростом номера будущего периода. т. е. в проекте СМIP6 даны большие изменения для более дальних интервалов времени. Можно также отметить, что разница между сценарными оценками двух проектов зимой – осенью меньше, чем весной – летом. Общий вывод состоит в том, что так же, как и в случае исторического эксперимента сценарные оценки в проектах СМIP5 и СМIP6 различаются примерно также по тем же показателям.

**Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки до 2100 г.**

Предыдущее сравнение моделей в проектах СМIP5 и СМIP6 между собой и с данными наблюдений приводит к выводу, что для будущих сценарных оценок следует применять модели из двух проектов, так как при сравнении с данными наблюдений модели проекта СМIP6 практически не дают преимуществ по отношению к применению моделей проекта СМIP5. Вместе с тем существует возможность сопоставить результаты сценарной оценки температуры в проекте СМIP5 с данными фактических наблюдений за последний период 15–16 лет, начиная с 2006 г. Для сравнения данных наблюдений со сценарными оценками проекта СМIP6 совместный период 6-7 лет еще недостаточен для получения надежных средних значений. Поэтому сравнивались средние значения, полученные по данным наблюдений за период с 2006 г. со сценарными данными за тот же период. Результаты даны в табл. 4. Показатели сравнения для двух случаев (см. табл. 4) или двух наборов данных: сценарные оценки температуры непосредственно в том виде, в котором они приводятся на сайте в Интернете (СМIP5), и с учетом корректировки по формулам (3)–(5), что обозначено в табл. 4 как «СМIP5 кор». Сценарные значения температур получены для климатической модели ВСС.

По результатам табл. 4 можно сделать следующие выводы:

- осредненные за 15 лет (2006–2020 гг.) данные проекта СМIP5 практически никак



Таблица 4

Результаты оценки эффективности сценарных температур проекта СМIP5 до и после корректировки на основе данных наблюдений для модели ВСС

Сценарий	Месяц	Данные	$B_1$	$B_0$	$R^2$	$\Delta_{ср}$	$\Delta_{макс}$	$\Delta_{мин}$
RCP2.6	Январь	СМIP5	0,6	10,2	0,21	0,4	4,8	-2,1
		СМIP5 кор	0,9	1,6	0,94	0,3	0,3	0,1
	Апрель	СМIP5	-0,5	40,2	0,08	1,9	13,6	-5,0
		СМIP5 кор	1,0	-1,0	0,99	-0,1	-0,2	-0,4
	Июль	СМIP5	0,2	19,9	0,01	-0,8	1,2	-8,9
		СМIP5 кор	1,0	0,5	0,98	0,1	0,3	-0,2
	Октябрь	СМIP5	0,5	13,0	0,15	1,4	2,7	-2,4
		СМIP5 кор	1,0	-0,1	0,96	0,2	0,7	-0,2
RCP4.5	Январь	СМIP5	0,5	11,6	0,18	0,3	4,8	-2,3
		СМIP5 кор	0,9	1,7	0,95	0,2	0,2	0,2
	Апрель	СМIP5	-0,5	40,2	0,08	-0,2	-0,1	-0,3
		СМIP5 кор	1,0	-0,9	0,99	-0,2	-0,1	-0,3
	Июль	СМIP5	0,2	19,4	0,01	-0,9	-9,2	1,0
		СМIP5 кор	1,0	0,7	0,98	0,1	0,3	-0,1
	Октябрь	СМIP5	0,5	13,0	0,14	1,3	2,7	-2,7
		СМIP5 кор	1,0	0,2	0,96	0,2	0,6	-0,1
RCP8.5	Январь	СМIP5	0,6	11,4	0,19	0,3	4,6	-2,4
		СМIP5 кор	0,9	1,7	0,94	0,2	0,1	0,2
	Апрель	СМIP5	-0,5	40	0,07	1,8	13,8	-5,1
		СМIP5 кор	1,0	-1,01	0,99	-0,3	-0,4	-0,5
	Июль	СМIP5	0,1	20,7	0,00	-0,8	1,2	-9,3
		СМIP5 кор	1,0	0,6	0,98	-0,1	-0,2	0,2
	Октябрь	СМIP5	0,5	14,6	0,11	1,3	2,7	-2,7
		СМIP5 кор	1,0	0,1	0,96	0,1	0,5	-0,2

не коррелируют с такими же средними данными наблюдений, на что указывает  $R^2$ , изменяющийся от  $R^2 = 0,00$  до  $R^2 = 0,21$ ;

- средние разности между наблюдаемыми и сценарными значениями в среднем для территории наименьшие в январе ( $\Delta_{ср} = +0,3 - +0,4^{\circ}\text{C}$ ), но достигают  $+1,4 - +1,9^{\circ}\text{C}$  в апреле и октябре, а в июле средние наблюдаемые меньше сценарных и составляют  $-0,8 - -0,9^{\circ}\text{C}$  по всем сценариям;
- разности  $\Delta_{макс}$  для наибольших значений достигают  $-9,2^{\circ}\text{C}$  в июле и  $+13,6 - +13,8^{\circ}\text{C}$  в апреле, в январе они систематически занижены моделью и  $\Delta_{макс} = +4,6 - +4,8^{\circ}\text{C}$ ;
- разности  $\Delta_{мин}$  для наименьших значений достигают  $-8,9 - -9,3^{\circ}\text{C}$  в июле,  $-5,1^{\circ}\text{C}$  в апреле и до  $-2,1 - -2,7$  в январе и октябре.

Таким образом, даже средние как по территории, так и по времени сценарные температуры отклоняются от наблюдаемых средних почти до  $2^{\circ}\text{C}$ , а наибольшие отклонения за счет локальной пространственной климатической неоднородности могут достигать  $9-13^{\circ}\text{C}$ .

После корректировки температур по формулам (3)-(5)  $R^2 = 0,94-0,99$  коэффициент  $B_1$  близок к 1,0,  $\Delta_{ср} = -0,2 - +0,3^{\circ}\text{C}$ , а наибольшие разности не превышали по модулю  $0,4-0,5^{\circ}\text{C}$ .

Оценка будущей температуры воздуха Центральной Африки осуществлялась как для средних территориальных значений, так и для температур на отдельных метеостанциях на основе скорректированных сценарных значений. Пример корректировки средней для территории температуры воздуха для французской модели IPSL и среднего сценария 4.5 показан на рис. 2. Средние 30-летние значения температур воздуха за характерные месяцы всех сезонов года (январь, апрель, июль, октябрь) для средин 5 временных интервалов: двух современных (1951-1980, 1981-2010) и трех будущих (2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 гг.) по наблюдаемым данным и будущим оценкам после корректировки (Ряд 1), а также по данным исторического эксперимента и по будущим оценкам по проектам СМIP5 и СМIP6 без корректировки (Ряд 2 и Ряд 3) (см. рис. 2). Вертикальными стрелками на графиках показаны направления корректировки. В связи с тем, что сценарные оценки по проектам СМIP5 и СМIP6, полученные после корректировки, были одинаковы и иногда только отличались на  $0,1^{\circ}\text{C}$ , они были объединены и показаны на рис.2 в виде одной линии.

Из графиков рис. 2 следует, что температура января для региона Центральной Африки по ис-



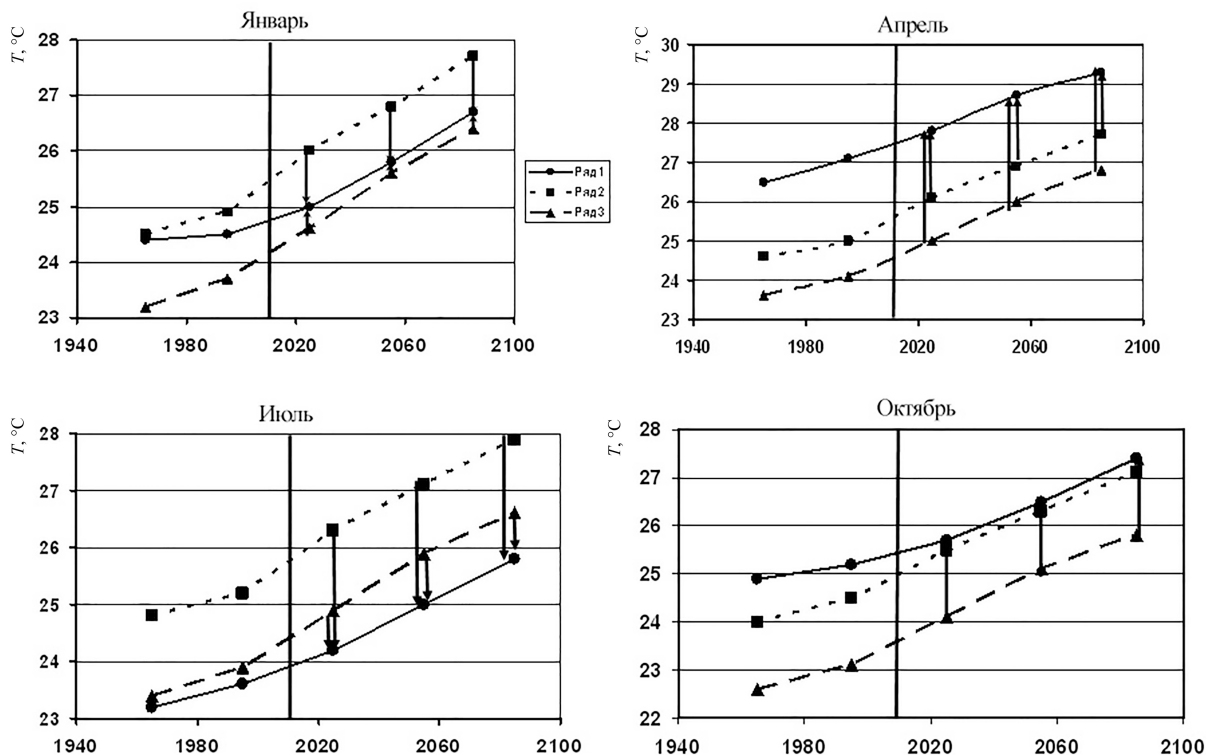


Рис. 2. Пример корректировки сценарных будущих оценок средней температуры воздуха для Центральной Африки по модели IPSL и сценарию  $4,5 \text{ Вт/м}^2$ , где Ряд 1 – наблюдаемые данные и откорректированные будущие сценарии, Ряд 2, Ряд 3 – данные исторического эксперимента и будущих сценарных оценок для проектов СМIP5 и СМIP6 соответственно

торическому эксперименту была несколько завышена в СМIP5 и занижена в СМIP6. Поэтому результаты будущих проекций проекта СМIP5 следует уменьшить, а проекта СМIP6 несколько увеличить. Для апреля данные исторического эксперимента в обоих проектах дают заниженные по сравнению с наблюдаемыми значения температуры (больше для проекта СМIP6), и будущие сценарные значения следует увеличить. В июле, наоборот, все сценарные будущие значения следует уменьшить и больше для проекта СМIP5. В октябре снова обратная ситуация, все модельные оценки следует увеличить и больше для проекта СМIP6. Поэтому если не выполнять корректировку сценарных значений на основе данных наблюдений, то в октябре в середине XXI века по СМIP6 и сценарию 4,5 в среднем по Центральной Африке температура будет  $25,1^\circ\text{C}$ , в то время как еще до 2010 г. она была  $25,2^\circ\text{C}$ . В целом данные исторического эксперимента завышают температуру июля и занижают температуру апреля и октября на  $2\text{--}3^\circ\text{C}$ .

Откорректированные будущие сценарные оценки средней региональной температуры для двух моделей (IPSL и BCC), трех сценариев и трех интервалов времени в будущем приведены в табл. 5. Из результатов табл. 5 следует, что разница между сценарными значениями по СМIP5 и СМIP6 в основном не превышает  $0,1^\circ\text{C}$ , а сред-

ний рост температуры во все месяцы на конец XXI века по сравнению с современным достигает  $0,2\text{--}0,5^\circ\text{C}$  по сценарию 2,6,  $1,2\text{--}1,7^\circ\text{C}$  по сценарию 4,5 и  $2,6\text{--}4,2^\circ\text{C}$  по сценарию 8,5, причем нижний предел диапазона изменений получен по модели BCC, а верхний – по модели IPSL. И если для сценариев 2,6 и 4,5 разница в оценках по двум моделям составляет  $0,3^\circ\text{C}$  и  $0,5^\circ\text{C}$  соответственно, то для сценария 8,5 это различие уже большое и составляет почти  $2^\circ\text{C}$ . Поэтому можно считать, что сценарий 8,5 не только является маловероятным предельным, но еще и ненадежным при оценке на основе его по разным моделям климата.

Следующие результаты оценки будущей температуры воздуха получены уже для каждой из 24 выбранных метеостанций из условий равномерности их размещения по территории для надежной пространственной интерполяции. Пример полученных карт пространственных распределений будущих сценарных температур для средней температуры октября по 30-летним периодам приведен на рис.3 для модели IPSL и двух сценариев 4,5 и 8,5. Как видно из рис. 3, по наиболее вероятному среднему сценарию 4,5 область с температурой выше  $28^\circ\text{C}$  (красным на рис. 3) будет постепенно расширяться от современной на севере рассматриваемой территории к центральной и западной частям и к концу XXI века



Таблица 5

Средние для территории Центральной Африки откорректированные значения будущих сценарных температур по моделям IPSL и BCC и по 3 м сценариям за характерные месяцы года (1 – Январь, 4 – Апрель, 7 – Июль, 10 – Октябрь)

Месяц	Сценарий	Периоды в будущем											
		2011–2040				2041–2070				2070–2100			
		BCC		IPSL		BCC		IPSL		BCC		IPSL	
		5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
1	2,6	24,8	24,8	24,7	24,9	24,9	25,0	24,8	25,1	24,9	25,2	25,0	25,4
	4,5	25,0	25,1	25,0	25,0	25,4	25,7	25,8	25,9	25,9	26,3	26,6	26,7
	8,5	25,4	25,4	25,5	25,6	26,7	26,7	27,4	27,6	28,2	28,0	29,2	29,4
4	2,6	27,4	27,5	27,5	27,5	27,5	27,6	27,7	27,8	27,6	27,8	27,9	28,0
	4,5	27,6	27,7	27,8	27,8	28,1	28,3	28,6	28,7	28,5	28,9	29,5	29,1
	8,5	28,1	28,1	28,3	28,4	29,4	29,4	30,1	30,4	30,7	30,7	32	32,4
7	2,6	23,9	23,9	23,9	23,9	24,0	24,1	24,0	24,1	24,0	24,1	24,2	24,4
	4,5	24,1	24,2	24,2	24,2	24,5	24,8	25,0	25,0	24,9	25,4	25,8	25,9
	8,5	24,5	24,5	24,7	24,7	25,8	25,9	26,5	26,7	27,2	27,2	28,4	28,7
10	2,6	25,4	25,4	25,4	25,4	25,5	25,6	25,6	25,6	25,6	25,8	25,7	25,9
	4,5	25,6	25,7	25,7	25,7	26,1	26,3	26,5	26,6	26,5	26,9	27,3	27,4
	8,5	26,0	26,0	26,2	26,3	27,3	27,4	28,1	28,3	28,7	28,7	29,9	30,3

будет уже занимать больше половины территории Центральной Африки за исключением горных областей на северо-западе и юго-востоке, хотя и там температура достигнет и даже превысит 25°C. Наибольшие по территории тем-

пературы воздуха на севере вблизи Сахеля вырастут с современных 27–28°C до 31°C в последней трети XXI века. В остальной большей части территории, включая и горные районы, температуры вырастут не более чем на 2°C. По сценарию

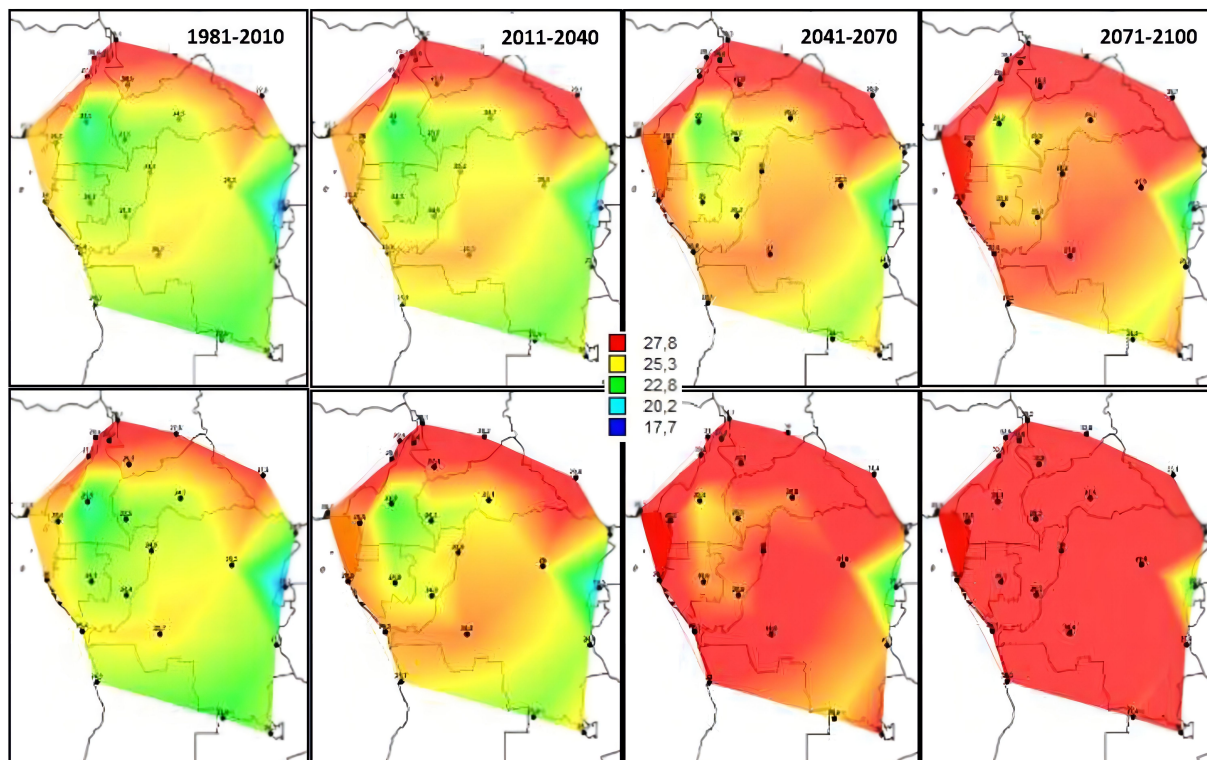


Рис. 3. Пространственные распределения современных и сценарных температур октября для Центральной Африки по модели IPSL и сценариям 4,5 Вт/м<sup>2</sup> (вверху) и 8,5 Вт/м<sup>2</sup> (внизу) (цвет онлайн)



8,5 уже к середине этого столетия практически на всей территории Центральной Африки температура превысит  $28^{\circ}\text{C}$  с максимумами  $31\text{--}32^{\circ}\text{C}$  на севере, а в последней трети столетия небольшая локальная горная область с температурой  $23^{\circ}\text{C}$  останется только на востоке, а на всей территории температуры будут от  $28^{\circ}\text{C}$  в горных районах до  $33^{\circ}\text{C}$  на севере.

Для характерных месяцев остальных сезонов года пространственные распределения приведены на рис. 4 только для сценария 4,5. Из сопоставления изменения пространственных закономерностей от настоящего периода к последней трети XXI века для каждого сезона года можно сделать следующие выводы.

1. Зимний период (январь) обусловлен первой фазой африканского муссона, когда сухой

прохладный воздух перемещается вместе с ВЗК (внутритропической зоной конвергенции) от пустынь Северной Африки и в этот период наибольшие температуры в  $27^{\circ}\text{C}$  имеют место вблизи Гвинейского залива и на востоке внутри континента, а наименьшие в горных районах могут быть  $20^{\circ}\text{C}$  и меньше, а на севере региона температуры составляют  $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ . В конце 21 столетия ожидается увеличение температур на  $2^{\circ}\text{--}3^{\circ}\text{C}$ , а температуры выше  $27^{\circ}\text{--}28^{\circ}\text{C}$  будут наблюдаться в западной и центральной частях.

2. Динамика пространственных распределений температур апреля практически повторяет пространственные изменения температур октября. Потепление также вначале охватывает северную часть территории, а затем запад и восток и к последней трети XXI века температуры

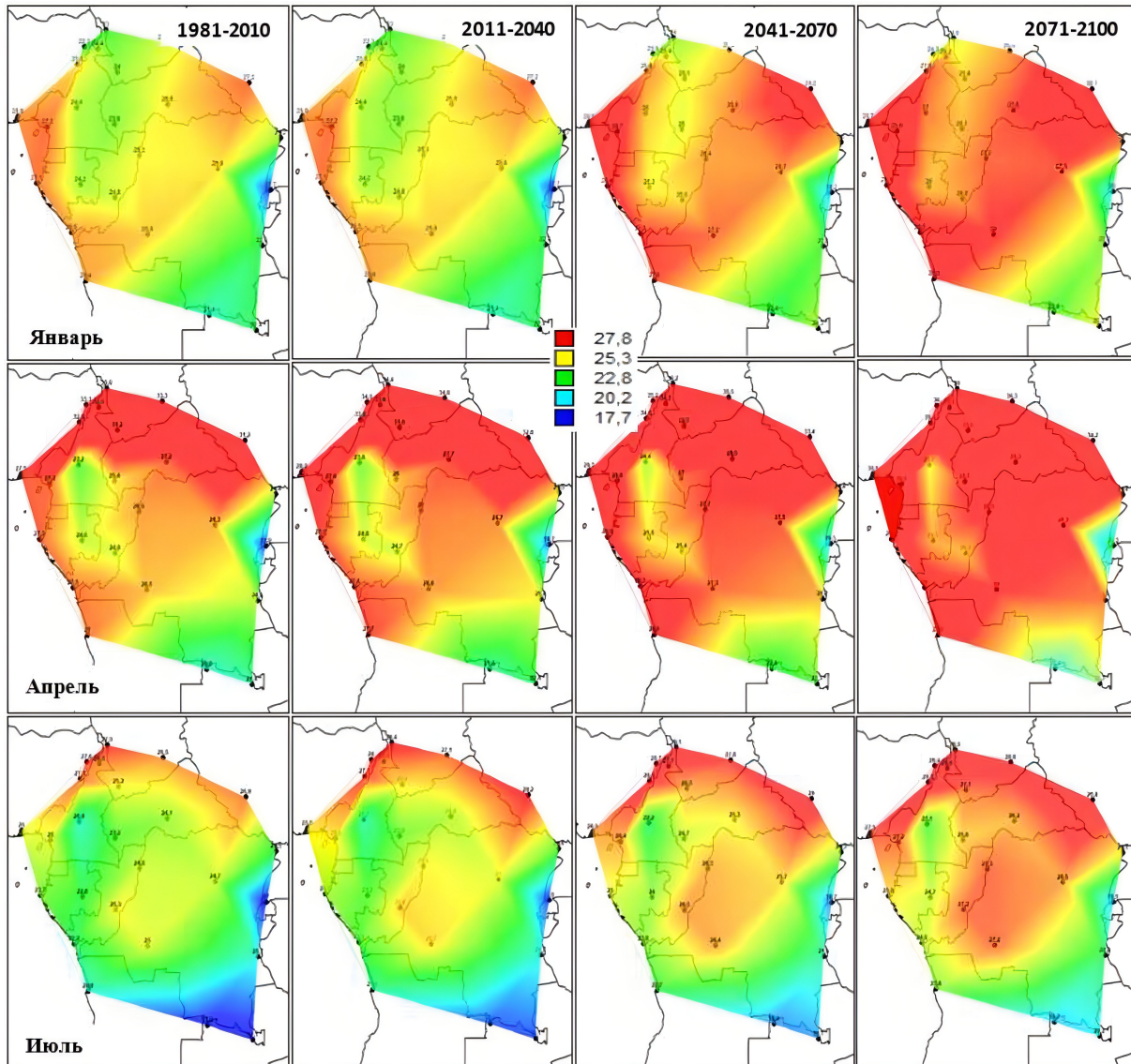


Рис. 4. Пространственные распределения современных и сценарных температур января, апреля и июля для Центральной Африки по модели IPSL и сценариям  $4,5 \text{ Вт/м}^2$  (цвет онлайн)



от 28°C и выше (до 36°C на севере) будут иметь место практически на всей территории Центральной Африки с исключением отдельных горных районов в центре и на юго-востоке. Общий по территории рост температуры за 21 столетие может составить от 2 до 3°C.

3. В летний сезон (июль), во второй фазе Африканского муссона, когда влажный воздух поступает с Атлантики, высокие температуры (выше 27°C), которые в настоящее время наблюдаются только на самом севере региона, к концу 21 столетия будут иметь место на всей северной половине территории, за исключением горных областей. Диапазон роста температур к концу столетия составляет 2° – 2,5°C, что несколько меньше, чем в другие сезоны года.

### Заключение

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Сравнение результатов исторического эксперимента проектов CMIP5 и CMIP6 между собой и с данными наблюдений показало, что для модели IPSL средние случайные отклонения в версиях CMIP5 и CMIP6 не превышают 1°C, но при сравнении с данными наблюдений получено, что погрешности CMIP6 больше, чем в CMIP5 и составляют 1,0°C и 1,3°C соответственно. Поэтому модель IPSL проекта CMIP6 даже менее эффективна, чем в проекте CMIP5.

2. Для модели ВСС в полученных данных исторического эксперимента по двум проектам есть систематические отклонения: значения выше среднего завышены, ниже среднего занижены и максимальные отклонения уже составляют 3,0–3,5 °C. При сравнении с данными наблюдений средние по модулю погрешности равны 1,0°C в проекте CMIP5 и 1,1°C в проекте CMIP6, а наибольшие достигают 10–12°C в проекте CMIP5 и 10–13°C в проекте CMIP6.

3. В связи с тем, что при сравнении результатов исторического эксперимента с данными наблюдений модели проекта CMIP6 не дали преимуществ по сравнению с моделями CMIP5, то при оценке будущего климата следует использовать сценарии обоих проектов.

4. При сравнении результатов будущих сценарных оценок по проектам CMIP5 и CMIP6 получены практически такие же выводы, как и в случае их сравнения по данным исторического эксперимента: модель ВСС в двух проектах имеет большие различия, чем модель IPSL, в которой данные двух проектов больше связаны и систематические отклонения отсутствуют.

5. При сравнении сценарных оценок проекта CMIP5 с данными наблюдений за совместный период последних 15–16 лет начиная с 2006 года получено, что даже средние как по территории, так и по времени сценарные температуры отклоняются от наблюдаемых средних почти

до 2°C, а наибольшие отличия за счет локальной пространственной климатической неоднородности могут достигать 9–13°C. Поэтому сценарные оценки необходимо было корректировать, и после корректировки получена высокая связанность средних модельных и наблюдаемых данных ( $R^2 = 0,94–0,99$ ), отсутствие систематических погрешностей, а средние отклонения составляли  $\Delta_{\text{ср}} = -0,2 - +0,3^\circ\text{C}$  и наибольшие разности не превышали по модулю 0,4–0,5°C.

6. Для средней по территории температуры Центральной Африки на последнюю треть XXI века получен ее рост от 0,2–0,5°C до 2,6–4,2°C по предельным сценариям и 1,2–1,7°C по сценарию 4,5. При этом модель IPSL дает верхние пределы этого диапазона температур, а модель ВСС – нижние. Наибольшие различия по двум моделям почти в 2 раза имеют место для сценария 8,5, который можно считать и маловероятным, и ненадежным для оценок.

7. Полученные пространственные распределения на основе будущих сценарных температур по станциям показывают, что в межмуссонный период (весна и осень) те наибольшие температуры, которые наблюдаются в настоящее время только на севере территории вблизи Сахеля и превышают 28°C к середине последней трети XXI века, будут практически уже во всей Центральной Африке, а на севере вырастут с современных 27–28°C до 31°C по среднему сценарию 4,5. В зимний муссон температуры выше 27°–28°C будут наблюдаться к концу столетия в западной и центральной частях, а в летний муссон – в северной половине территории за исключением горных областей. Общее увеличение температуры к концу столетия ожидается в 2–3°C и несколько меньше летом 1,5–2,5°C.

### Библиографический список

1. Salman S. A., Shahid S., Afan H. A., Shiru M. S., Al-Ansari N., Yaseen Z. M. Changes in climatic water availability and crop water demand for Iraq region // Sustainability. 2020. Vol. 12. P. 3437. <https://doi.org/10.3390/su12083437>
2. Nashwan M. S., Shahid S. Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0°C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble // Atmospheric Research. 2022. Vol. 265. Article number 105908. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105908>
3. Hamed M. M., Nashwan M. S., Shahid S. A novel selection method of CMIP6 GCMs for robust climate projection // International Journal of Climatology. 2022. Vol. 42. P. 4258–4272. <https://doi.org/10.1002/joc.7461>
4. Salehie O.; Ismail T. B., Hamed M. M., Shahid S., Idran Muhammad M. K. Projection of Hot and Cold Extremes in the Amu River Basin of Central Asia using GCMs CMIP6 // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2022. Vol. 36, iss. 10. P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02201-6>
5. Salehie O., Ismail T. B., Hamed M. M., Shahid S., Idran Muhammad M. K. Selection of CMIP6 GCM with projection



- of climate over the Amu Darya River Basin // *Theoretical and Applied Climatology*. 2022. № 2. P. 1–19. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1031530/v1>
6. *Hartmann D. L.* Chapter 11-Global Climate Models // *Global physical climatology*. 2nd ed. Boston : Elsevier, 2016. P. 325–360.
7. *Taylor K. E., Balaji V., Hankin S., Juckes M., Lawrence B., Pascoe S.* CMIP5 data reference syntax (DRS) and controlled vocabularies. PCMDI: San Francisco Bay Area, 2011. [https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/docs/cmip5\\_data\\_reference\\_syntax\\_v1-01\\_clean.pdf](https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax_v1-01_clean.pdf) (дата обращения: 10.05.2022).
8. *Hamed M. M., Nashwan M. S., Shahid S., Ismail T. B., Wang X. J., Dewan A., Asaduzzaman M.* Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia // *Atmospheric Research*. 2022. Vol. 265. P. 105927. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105927>
9. *Weigel A. P., Knutti R., Liniger M. A., Appenzeller C.* Risks of model weighting in multimodel climate projections // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. P. 4175–4191. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3594.1>
10. *Hamed M. M., Nashwan M. S., Shahid S.* Inter-comparison of Historical Simulation and Future Projection of Rainfall and Temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs Over Egypt // *International Journal of Climatology*. 2022. Vol. 42. P. 4316–4332. <https://doi.org/10.1002/joc.7468>
11. *Song Y. H., Nashwan M. S., Chung E. S., Shahid S.* Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea // *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 247. Article number 105261. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105261>
12. *Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
13. *Shiru M. S., Chung E. S., Shahid S., Wang X.-J.* Comparison of precipitation projections of CMIP5 and CMIP6 global climate models over Yulin China // *Theoretical and Applied Climatology*. 2022. Vol. 147. P. 535–548. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-628014/v1>
14. *Song Y. H., Chung E. S., Shahid S.* Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models // *International Journal of Climatology*. 2021. Vol. 41. P. 5899–5919. <https://doi.org/10.1002/joc.7159>
15. *Ortega G., Arias P. A., Villegas J. C., Marquet P. A., Nobre P.* Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models // *International Journal of Climatology*. 2021. Vol. 41. P. 6713–6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
16. *Zamani Y., Hashemi Monfared S. A., Azhdari Moghaddam M., Hamidianpour M.* A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: The case of Northeastern Iran // *Theoretical and Applied Climatology*. 2020. Vol. 142. P. 1613–1623. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03406-x>
17. *Chen C.-A., Hsu H.-H., Liang H.-C.* Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the Western North Pacific and East Asia // *Weather and Climate Extremes*. 2021. Vol. 31. Article number 100303. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100303>
18. *Ayugi B., Jiang Z., Zhu H., Ngoma H., Babaousmail H., Karim R., Dike V.* Comparison of CMIP6 and CMIP5 models insimulating mean and extreme precipitation over East Africa // *International Journal of Climatology*. 2021. Vol. 41. P. 6474–6496. <https://doi.org/10.1002/joc.7207>
19. *Bourdeau-Goulet S. C., Hassanzadeh E.* Comparisons Between CMIP5 and CMIP6 Models: Simulations of Climate Indices Influencing Food Security, Infrastructure Resilience, and Human Health in Canada // *Earth’s Future*. 2021. Vol. 9. Article number e2021EF001995. <https://doi.org/10.1029/2021EF001995>
20. *Lun Y., Liu L., Cheng L., Li X., Li H., Xu Z.* Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau // *International Journal of Climatology*. 2021. Vol. 41. P. 3994–4018. <https://doi.org/10.1002/joc.7055>
21. Наука и инновации – современные концепции: сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума / ответственный редактор Д. Р. Хисматуллин. Москва : Инфинити, 2022. 236 с.
22. *Лобанов В. А., Кириллина К. С.* Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Санкт-Петербург : Издательство РГГМУ, 2019. 157 с.

Поступила в редакцию 16.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 16.12.2022  
The article was submitted 16.11.2022; approved after reviewing 05.12.2022; accepted for publication 16.12.2022