

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Мами Магбини Токпа

КЛИМАТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

Специальность 1.6.18. – Науки об атмосфере и климате

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Лобанов Владимир Алексеевич

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ	13
1.1 Особенности климатических условий Центральной Африки	13
1.2 Общие климатические условия	15
1.3 Краткий обзор результатов исследований современных климатических изменений в Центральной Африке.....	19
1.3.1 Обзор библиографии.....	19
1.3.2 Показатели изменения климата.....	23
1.3.3 Причины глобального потепления климата.....	25
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ	29
2.1 ВВЕДЕНИЕ	29
2.2 Исходные данные и оценка их качества	30
2.3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	34
2.3.1 Статистическая модель временного ряда	34
2.3.2 Оценка эффективности модели.....	36
2.3.3 Оценка устойчивости модели	39
2.3.4 Алгоритм реализации методики	40
2.4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	41
2.4.1 Полученные закономерности на основе продолжительных рядов ..	41
2.4.2 Пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей.....	42
2.4.3 Районирование территории по типу климатических изменений	44
2.4.4 Количественная оценка роста температур	48
2.5 ВЫВОДЫ ПО 2-ОЙ ГЛАВЕ	51
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ	53
3.1 ВВЕДЕНИЕ	53
3.2 Исходные данные и оценка их качества	54
3.3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ.....	57
3.4 КЛИМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВНУТРИГОДОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСАДКОВ.....	58
3.5 ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЯДАХ ОСАДКОВ ВЛАЖНОГО ПЕРИОДА	62
3.6 ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЯДАХ ОСАДКОВ СУХОГО ПЕРИОДА	67
3.7 ВЫВОДЫ ПО 3-ЕЙ ГЛАВОЙ	69

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА БУДУЩИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ	70
4.1 ВВЕДЕНИЕ	70
4.2 ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТА ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ	72
4.2.1 Методика выбора эффективной модели	73
4.2.2 Сравнение данных моделирования и наблюдений за разные периоды времени	75
4.2.3 Оценка погрешностей по территории	77
4.2.4 Заключение по выбору эффективной модели	80
4.3 ОЦЕНКА БУДУЩИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ ПО СЦЕНАРИЯМ ПРОЕКТОВ СМIP5 И СМIP6	81
4.3.1 Источники данных	81
4.3.2 Методика оценки будущих температур	82
4.3.3 Сравнение результатов исторического эксперимента проектов СМIP5 и СМIP6 между собой и с данными наблюдений	84
4.3.4 Сравнение результатов будущих сценариев проектов СМIP5 и СМIP6	88
4.3.5 Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки до 2100г.	90
4.4 ВЫВОДЫ ПО 4-ОЙ ГЛАВЫ	97
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА БУДУЩИХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ	100
5.1 ВВЕДЕНИЕ	100
5.2 ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	101
5.3 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСАДКОВ	103
5.4 ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СМIP ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ	104
5.4.1 Оценка погрешностей модели по территории	106
5.5 ОЦЕНКА БУДУЩИХ ОСАДКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ ДО 2100 Г.	107
5.6 ВЫВОДЫ ПО 5-ОЙ ГЛАВЕ	110
6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
7 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113

ВВЕДЕНИЕ

Климат меняется и развивается уже долгое время, и это важная часть истории нашей планеты. То, как виды растений и животных развиваются с течением времени, а некоторые исчезают навсегда, отчасти связано с изменением климатической системы. Иногда климат подходит для процветания некоторых существ, но иногда он бывает слишком жарким или слишком холодным, слишком сухим или слишком влажным. В результате некоторым видам становится трудно выжить, и они могут вымереть. Климатическая система состоит из набора компонентов, которые взаимодействуют друг с другом с помощью энергии солнца: атмосферы, литосферы, криосферы, биосферы и гидросферы. Климат Земли меняется под воздействием различных факторов, которые влияют на количество получаемого ею излучения. Это может быть воздух вокруг нас (атмосфера) или внешний вид поверхности Земли. Они нарушают энергетический баланс Земли и вызывают его изменение.

Существует один сравнительно новый фактор, влияющий на климатический баланс. Это технология, которая существует с 1800-х годов. По сути, человек начал использовать машины и устройства, чтобы сделать все быстрее и проще. Раньше все человечество занималось сельским хозяйством и ремеслами. Сегодня это постепенно переросло в массовое производство и в модели потребления. И дело не только в том, что у нас появились новые технологии, а в том, что они развиваются очень быстро. Например, паровым машинам потребовалось много времени, чтобы заменить лошадей, а интернет изменил все всего за 20 лет! Все это оказало неожиданное влияние на наш мир и наш образ жизни. Первое из этих последствий - выброс в атмосферу слишком большого количества парниковых газов. Это заставляет атмосферу удерживать больше энергии и нарушает баланс климатической системы. Главный результат - потепление всей планеты. Научное сообщество совершенно уверено, что это происходит из-за всех парниковых газов,

которые мы выбрасываем в атмосферу со времен промышленной революции [38, 93, 94]. Эти изменения в составе атмосферы также влияют на циркуляцию атмосферы и океана, рост растительности и кислотность океана. Все эти изменения вызваны деятельностью человека, что мы называем "антропогенным изменением климата"; именно с ним нужно бороться.

Ученые давно изучают, как человек изменяет климат. Они используют математические модели, чтобы определить, что может произойти в будущем в зависимости от принимаемых нами решений и поведения. Парниковые газы и крошечные частицы в атмосфере (аэрозоли) являются основными причинами изменения климата. Если мы ничего не сделаем, чтобы остановить это явление или сократить их выбросы, Земля продолжит нагреваться, и некоторые места пострадают больше, чем другие. Это может привести к таким проблемам, как таяние льдов и повышение уровня моря, что нанесет большой ущерб людям, живущим на островах или вблизи побережья [93]. Ученые проводят эксперименты, чтобы помочь нам сделать правильный выбор, как управлять изменением климата [48]

Вопросы изменения и изменчивости климата уже некоторое время находятся в центре внимания ученых и политиков во всем мире в связи с их непосредственным и долгосрочным воздействием на природную среду и человека [67, 33]. Сценарии будущего изменения климата поднимают множество вопросов, связанных с реализацией политики устойчивого развития.

Данная диссертация посвящена оценке текущего состояния климата и того, как изменение климата повлияет на Центральную Африку в будущем.

Актуальность темы исследования. Климат Центральной Африки, включающей территорию от экватора до 15° широты в обоих полушариях и относящийся к экваториальному и тропическому типам климатов, оказывает большое влияние на климатологию остальных частей планеты в связи с переносом его тепла воздушными и океаническими течениями в более высокие широты. По образному определению В.В.Шулейкина «Лучистое

солнечное тепло нагревает паровой котел – воздух экватора, который поднимается и течет к холодильникам (полюсам), там остывает и, опускаясь, течет понизу к экватору. Так над Землей вращается огромное воздушное колесо, которое приводит в ход Солнце». Но экваториальные области не только делятся теплом с остальной частью Земли, но и являются «легкими планеты» из-за обилия тропических лесов, которые с одной стороны перекачивают влагу с океана, а с другой поглощают из атмосферы большое количество CO₂, что является естественным вкладом в снижение современного глобального потепления.

Однако, изучение климата Африки сопряжено со множеством проблем, таких как: ненадежность и недостаточность многолетних наблюдений как во времени, так и по территории, неоднородность наблюдений из-за смены регистрирующих приборов, переноса метеостанций, а также сложность и множественность видов атмосферной циркуляции в этом регионе, включая динамику внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), африканский муссон, пассаты, тропические циклоны. Поэтому не смотря на большой интерес к этой части планеты, исследований динамики климата все еще недостаточно и в докладах МГЭИК (международной группы экспертов по изменению климата) часто при оценке современного и будущего климата эти области представлены как недостаточно надежные или даже как «белые пятна».

Хотя и считается, что температура воздуха Центральной Африки имеет значительно меньшую естественную изменчивость, как внутри года, так и за многолетний период, но существенные климатические изменения здесь также происходят. Одним из таких климатических вызовов явилась Сахельская засуха 1969-74 гг., которая дала толчок для последующего продвижения Сахары на юг.

Поэтому актуальность темы исследования не вызывает сомнений как с научной, так и с практической точек зрения, т.к. основой экономики всех стран Центральной Африки является сельское хозяйство, напрямую зависящее от климата и его изменения.

Объектом исследования являются территория Центральной Африки и ряды многолетних наблюдений на метеорологических станциях.

Предмет исследования — влияние современных и будущих изменений климата на динамику многолетних колебаний основных климатических характеристик таких как среднемесячная температура воздуха и суммы осадков за каждый месяц.

Целью исследования является оценка современных и будущих изменений температур воздуха и осадков на территории Центральной Африки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать региональные базы данных по температуре воздуха и осадкам. выполнить оценку их качества и однородности, восстановить пропуски наблюдений и привести непродолжительные ряды к единому многолетнему периоду с целью получения непрерывных и качественных данных.

2. Осуществить моделирование многолетних временных рядов климатических характеристик и дать оценку проявления в них современных изменений климата в виде рассчитанных показателей нестационарности.

3. Выполнить пространственное обобщение показателей нестационарности по территории и установить их закономерности.

4. Выбрать наиболее подходящую физико-математическую модель климата для территории Центральной Африки.

5. Оценить будущие климатические характеристики на основе установленных современных тенденций и климатических сценариев для выбранной климатической модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Современные климатические изменения температуры воздуха Центральной Африки.

2. Современные климатические изменения осадков на территории Центральной Африки.

3. Будущие климатические изменения температуры воздуха Центральной Африки до конца XXI -го века.

4. Будущие климатические изменения осадков на территории Центральной Африки до конца XXI -го века.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые получены количественные оценки современных климатических изменений температур воздуха в Центральной Африке на основе проверенной на качество и однородность информации, установлены их закономерности по территории и выделены однородные районы по типу изменений во времени на основе проведенного статистического моделирования среднемесячных температур воздуха за многолетний период.

2. Получены количественные оценки современных климатических изменений осадков влажного и сухого периодов года с использованием проверенной на качество и однородность информации и установлены закономерности этих изменений по территории Центральной Африки на основе классификации осадков по типу внутригодовых изменений и моделирования их многолетних рядов наблюдений.

3. Разработана методика оценки будущих температур воздуха и осадков на основе совместного применения результатов статистического и физико-математического моделирования, включая выбор наиболее подходящей для Центральной Африки модели климата и корректировки сценарных оценок на основе подобия скоростей изменения трендов в настоящем и будущем.

4. Впервые даны оценки будущих температур и осадков Центральной Африки за 3 периода времени до конца 21 века в пунктах наблюдений и в виде

обобщений по территории на основе наиболее подходящей модели климата и откорректированных сценарных значений.

Методы исследования. Статистические критерии оценки однородности и стационарности, обобщенные на особенности гидрометеорологической информации, статистические модели многолетних рядов с оценкой их статистической значимости и эффективности, результаты численных экспериментов по физико-математическим моделям климата, включая результаты исторического эксперимента и сценариев будущего климата, ГИС-технологии и методы пространственной интерполяции.

Исходные данные. В работе использовались данные многолетних наблюдений по температуре приземного воздуха и осадкам, а также результаты исторического эксперимента и будущие сценарии проектов CMIP5 и CMIP6 с сайтов: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>, <http://www.pogodsiklimat.ru>, <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>.

Достоверность и надежность результатов обоснованы применением как объективных современных статистических методов и моделей, так и сопоставлением результатов, полученных на основе больших объемов информации, а также объединением результатов статистического и физико-математического моделирования динамики климата.

Теоретическая и научная значимость результатов состоит:

- в разработанной методике, которая может служить научно-методической основой для проведения любых исследований по оценке регионального изменения климата в настоящем и будущем в условиях разной надежности и продолжительности данных наблюдений;
- в выявленных закономерностях пространственно-временных изменений в многолетних рядах температур воздуха и осадков за последний 80-летний период;
- в выборе наиболее эффективной модели климата для региона Центральной Африки и получении на ее основе будущих сценарных температур воздуха и осадков до конца 21 века.

Практическая значимость проведенного исследования состоит:

- в сформированной региональной климатической базе данных, которая проверена на однородность и может быть использована для проведения любых других исследований в рассматриваемом регионе;

- в полученных количественных оценках изменений климатических характеристик в настоящем и будущем, которые могут быть применены при разработке программ и планов развития сельского, лесного, водного хозяйства и других отраслей экономики, региональных стратегий по борьбе с изменением климата и адаптации к ним и для охраны окружающей среды;

- внедрением методики выбора наиболее подходящей для региона климатической модели и результатов исследования в учебный процесс РГГМУ по направлению подготовки «Прикладная гидрометеорология» для бакалавров и магистров.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

1. Методика исследования, представленная в работе, может служить научно-методической основой для проведения любых исследований по оценке регионального изменения климата в настоящем и будущем в условиях разной надежности и продолжительности данных наблюдений.

2. Полученные результаты могут быть применены при разработке программ и планов развития сельского, лесного, водного хозяйства и других отраслей экономики, региональных стратегий по борьбе с изменением климата и адаптации к ним и для охраны окружающей среды.

3. Полученные результаты внедрены в учебный процесс РГГМУ по направлению подготовки «Прикладная гидрометеорология» для бакалавров и магистров.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 1.16.18 – Науки об атмосфере и климате по следующим пунктам: п.1 «Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе», п.2 «Вычислительные

методы и технологии систем анализа и усвоения данных наблюдений. Геоинформационные системы в метеорологии, климатологии и агрометеорологии», п.16 «Теоретическая климатология. Модели земной системы и их компоненты. Модельные оценки изменений климата и их воздействий на хозяйственную и экономическую деятельность», п.17 «Региональная климатология. Мезо- и микроклиматология. Изменения климата. Климатические проекции. Исследование формирования климатообусловленных угроз и рисков для природных и хозяйственных систем, здоровья населения».

Личный вклад автора. Все положения, выносимые на защиту, содержат результаты, полученные автором самостоятельно. Личный вклад автора заключается в формировании региональных баз данных и архивов результатов физико-математического моделирования, в оценке качества и однородности данных наблюдений, в проведении статистического моделирования и обобщении полученных результатов.

Апробация работы. Основные и промежуточные результаты исследований по теме диссертации докладывались автором на международных и отечественных конференциях, включая конференцию СНО (21-22 апреля 2022, РГГМУ); IV-ую Международную научную конференцию «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды», 23 -25 мая 2022 г. в Северо-Кавказском федеральном университете; VI-ую Международную конференцию "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022, Санкт-Петербург; Всероссийскую междисциплинарную молодежную научную конференцию «Азимут ГЕОнаука» 6 – 9 Декабря 2022; Всероссийскую научно-практическую конференцию «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 20-23 марта 2023 г.; Всероссийскую научно-практическую конференцию «Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях» г. Санкт-Петербург 7 апреля 2023

года; Международную научно-практическую конференцию «Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки», 12 мая 2023 и он-лайн конференции с Ганой и Китаем в 2022 г., доклады и тезисы выступлений на которых опубликованы в трудах конференций, имеющих статус E-library, ВАК и Скопус.

Публикации: результаты исследования представлены в 12 публикациях, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и 1 статья в издании в SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 124 страниц, в том числе 31 рисунок и 13 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 141 наименование, 19 из которых на русском языке.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ

1.1 Особенности климатических условий Центральной Африки

Центральная Африка — это регион Африки, включающий южную Сахару, восточную часть Западно-Африканского щита и западную часть Великой рифтовой долины. Его площадь составляет примерно 5.366.300 км².

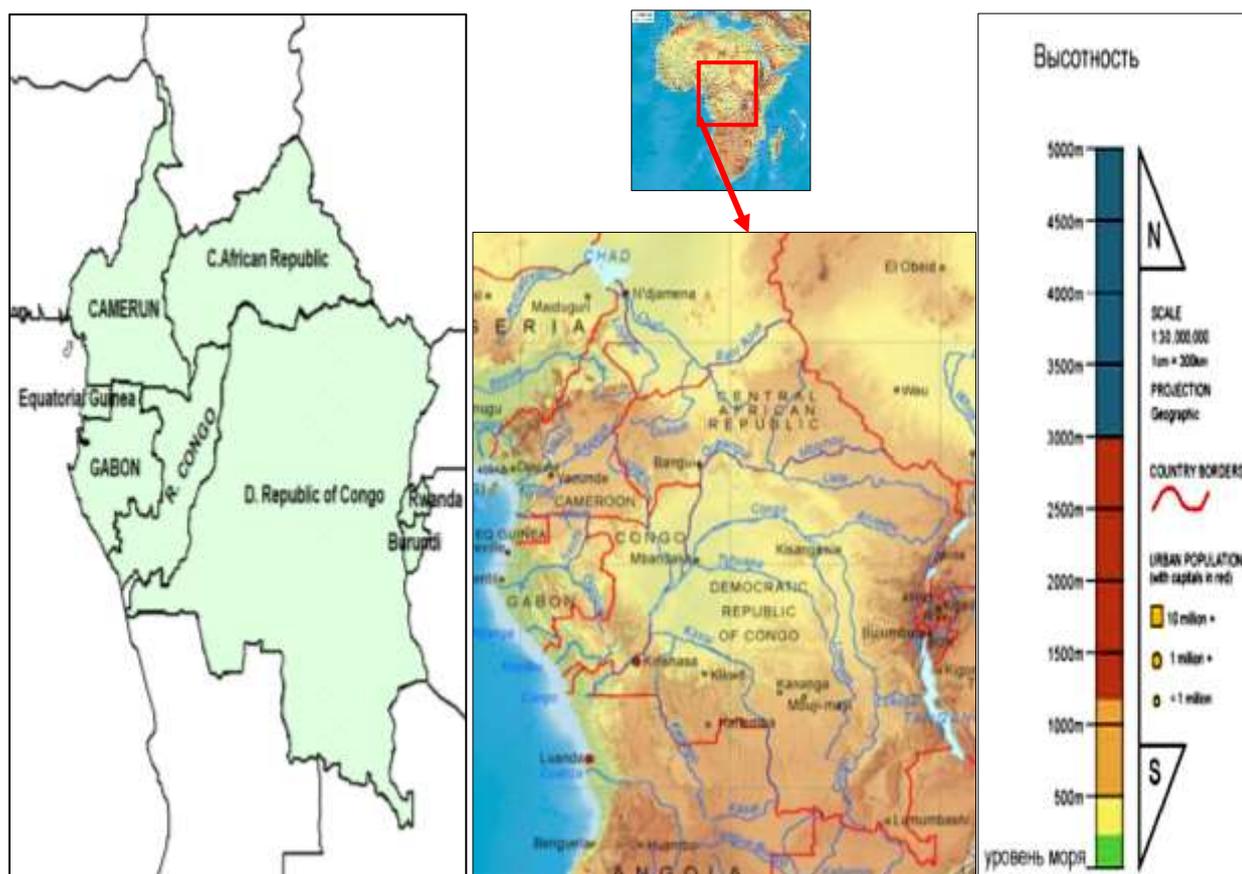


Рисунок 1.1. Политическая карта и карта рельефа Центральной Африки

По данным Обсерватории лесов Центральной Африки (ОЛЦА), в 2016 году общая численность населения стран Центральной Африки, Бурунди и Руанды составляла около 150 миллионов человек, из которых, по оценкам, 20-30 миллионов населяют леса или их ближайшие окрестности. Ежегодные показатели роста изменяются от 1,98% в ЦАР до 3,29% в Бурунди. В то время как самый низкий показатель роста приближается к 2% в ЦАР, он превышает 3% в ДРК, Чаде и Бурунди. По данным Справочно-информационного бюро по

народонаселению, "прогнозируемая" численность населения мира на 2050 год составит 384 миллиона человек для данной территории.

Внутренний валовый продукт (ВВП) на человека изменяется от US\$ 584 (ЦАР) до US\$ 32 685 (Экваториальная Гвинея). В Бурунди, ДРК и ЦАР он составляет менее 1 000 долларов США. В Габоне и Экваториальной Гвинее он превышает 10 000 долларов США. Таким образом, различия между странами в этом регионе очень велики и основаны, в том числе, на наличии или отсутствии горнодобывающих или нефтяных ресурсов.

В рельефе Центральноафриканского региона на севере и западе преобладают равнины и плато различной высоты (Адамауа, Убанги, цепь Вирунга), а в центре - Конголезская впадина и Хрустальные горы на востоке.

Гидрография Центральной Африки в основном состоит из трех крупных водосборов (80% территории региона): Конго (занимает 55% территории), Санага (река, расположенная в центральном Камеруне) и Огоуэ (Главная река в Габоне) [113]. В геологическом отношении регион Центральной Африки характеризуется разнообразием природных условий и ресурсов, что определяет горнодобывающую промышленность и сельскохозяйственную деятельность в экстремальных климатических условиях.

По своим климатическим и природным условиям Центральная Африка считается чувствительным регионом из-за зависимости экономики страны от климата и ее распространения на несколько климатических зон. Леса бассейна реки Конго, второго по величине массива на планете после Амазонки, представляют собой значительный потенциал для поглощения атмосферного углерода, ответственного за глобальное потепление.

Экономическое положение региона в основном основано на сельском хозяйстве, животноводстве и горнодобывающей промышленности.

Однако Центральная Африка, как правило, занимает самые низкие места в глобальных индексах развития. Это результат десятилетий отсутствия безопасности в этом регионе, что сохраняется и сегодня. Постоянное отсутствие безопасности, связанное, среди прочих факторов, с

неспособностью установить прочный мир, обрекает регион на непрекращающиеся периоды конфликтов, вызванных распространением конфликта "Боко Харам" из Нигерии в Чад, Камерун и Нигер; постоянное отсутствие безопасности в районе Великих озер; злоупотребления военными группировками в Демократической Республике Конго, Центральноафриканской Республике, Судане и Южном Судане, связанные с незаконной разработкой природных ресурсов, угрожают еще больше уменьшить эти показатели, причем существует большой риск, что Центральная Африка определенно будет отставать от других африканских субрегионов. Страны Центральной Африки также имеют очень низкие оценки по показателям управления и нестабильности. Камерун, Центральноафриканская Республика, Чад, Демократическая Республика Конго, Экваториальная Гвинея и Республика Конго находятся в нижней части индексов управления Economist Intelligence Unit¹, Transparency International и Фонда Мо Ибрагима. [111].

1.2 Общие климатические условия

Состояние знаний остается относительно неполным в области диагностики изменчивости климата в Центральной Африке.

В связи с географическим положением Центральная Африка отличается разнообразием климатов, которые можно разделить на жаркий и влажный экваториальный климат с температурой от 22°C до 30°C, годовым количеством осадков около 1 500 - 1 800 мм, и тропический суданский, судано-сахельский и сахельский климат. В некоторых регионах с ограниченной высотой над уровнем моря также наблюдается горный климат, вдоль Альбертского разлома (к востоку от ДРК) или вдоль вулканической линии Камеруна. [132].

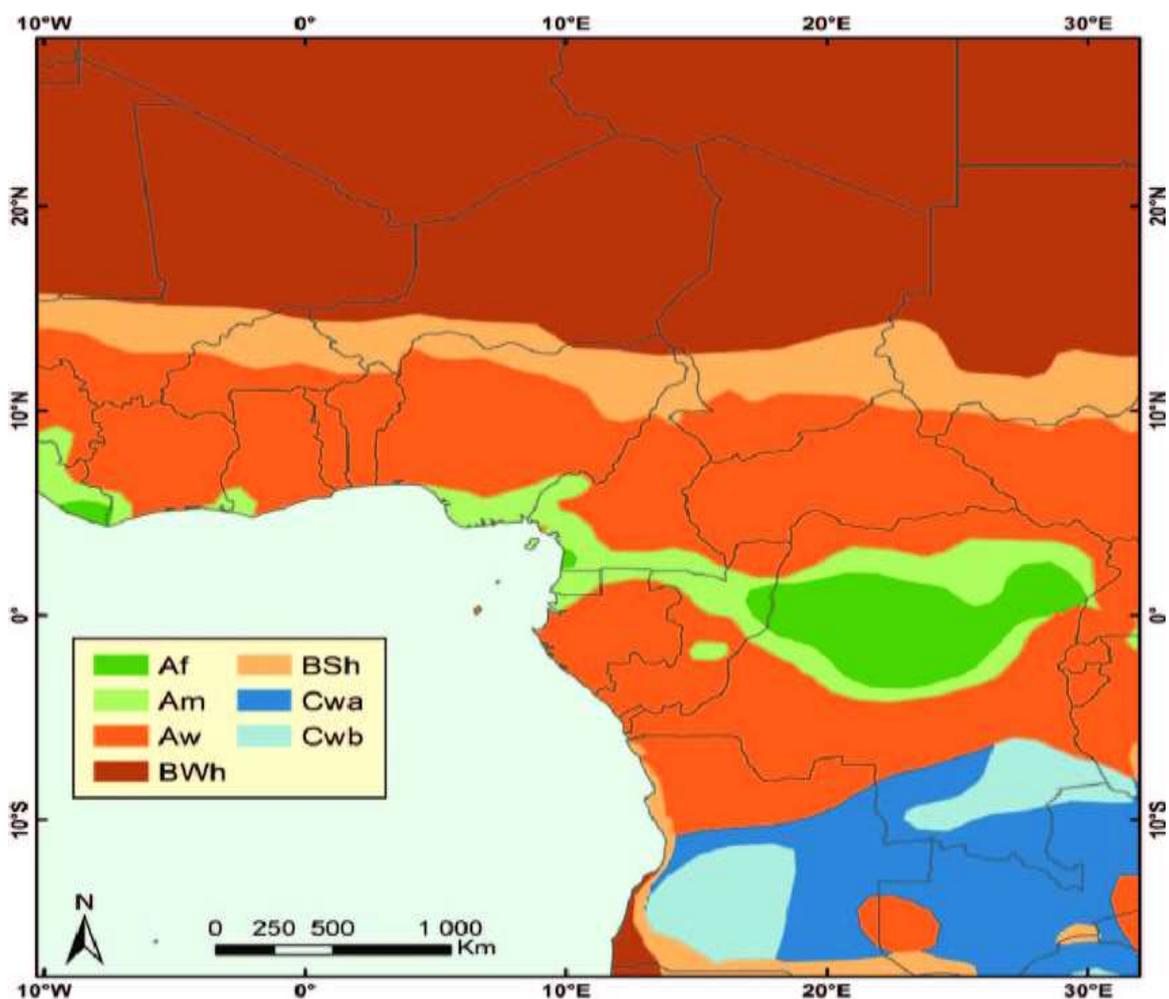


Рисунок 1.2. Климатическая классификация Кёппена-Гейгера [107] для бассейна Конго, где типы климатов: Af - экваториальный/влажный, Am - тропический/ муссонный, Aw - тропическая/сухая зима, BSh - полусухая/ жаркая, BWh - засушливая/ жаркая, Cwa - умеренный климат. теплая/сухая зима/жаркое лето, и Cwb - умеренно теплая/сухая зима/темпераментное лето (от Tsalefac, M. et al., 2015).

Экваториальный и тропический климат Северного полушария характеризуется очень сухим и солнечным основным сухим сезоном (с декабря по февраль), в то время как климат Южного полушария, особенно в районе Атлантического побережья, характеризуется облачным сухим сезоном с очень высокой атмосферной влажностью (с июня по август). Эти климатические различия по обе стороны от климатической линии, разделяющей климаты Северного и Южного полушарий, оказывают влияние на состояние окружающей среды и имеют важное значение, которое пока еще

слишком часто оставляют без внимания перед лицом будущего изменения климата [132].

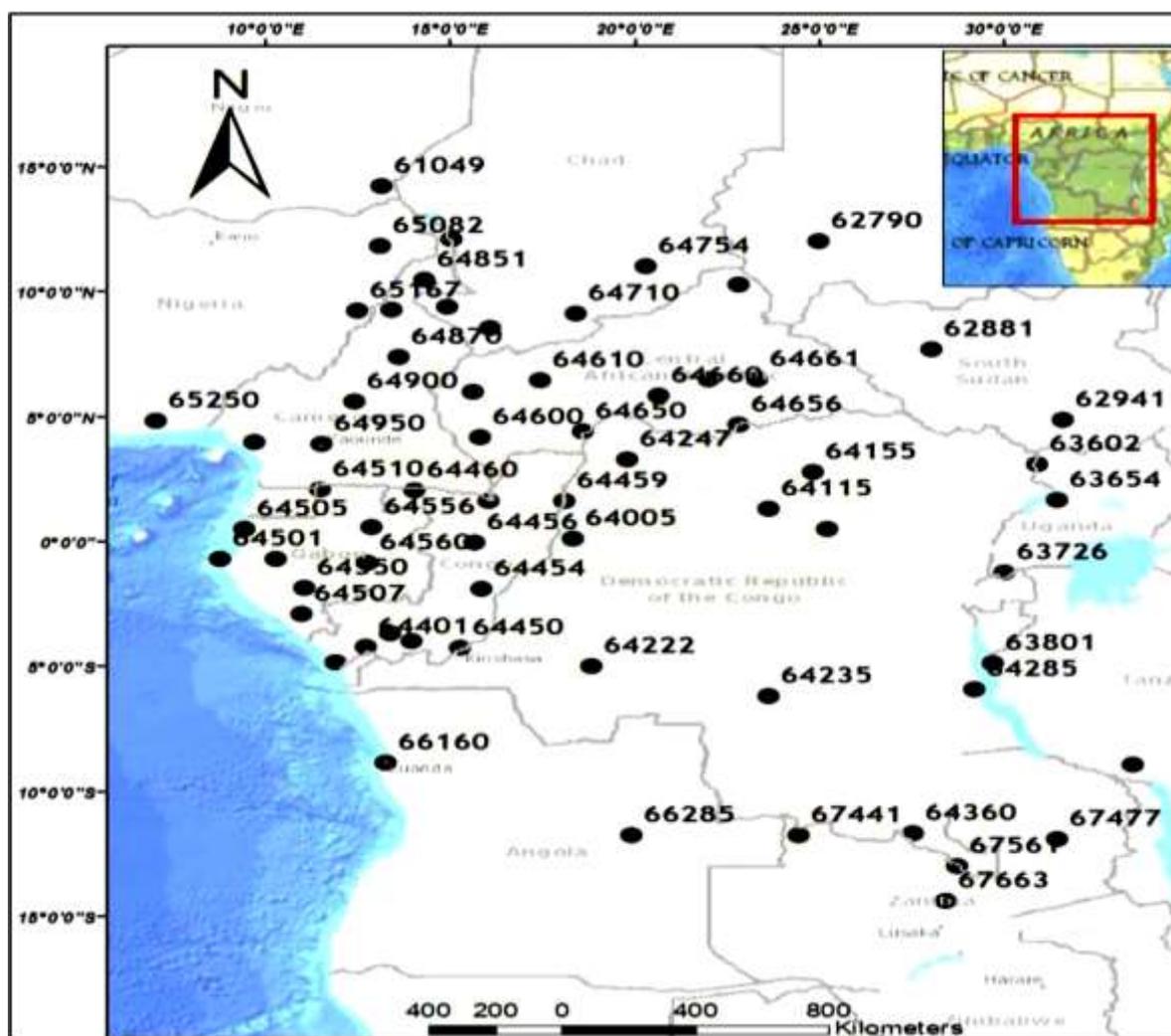


Рисунок 1.3. Распределение метеостанций по территории

Анализ пространственных изменений температуры в течение года для рассматриваемой территории показывает следующие основные ситуации ее динамики (рис.1.4). В январе во всем регионе наблюдаются относительно низкие температуры (максимум до 25—27°C около Гвинейского залива) с их наименьшими значениями на северо-востоке и в горной юго-восточной части (20°C —22°C) территории по сравнению с центром. Такая ситуация обусловлена влиянием зимней фазы Африканского муссона, в котором

прохладный и сухой воздух Северной Африки смещается на юг вслед за движением ВЗК (внутритропической зоны конвергенции).

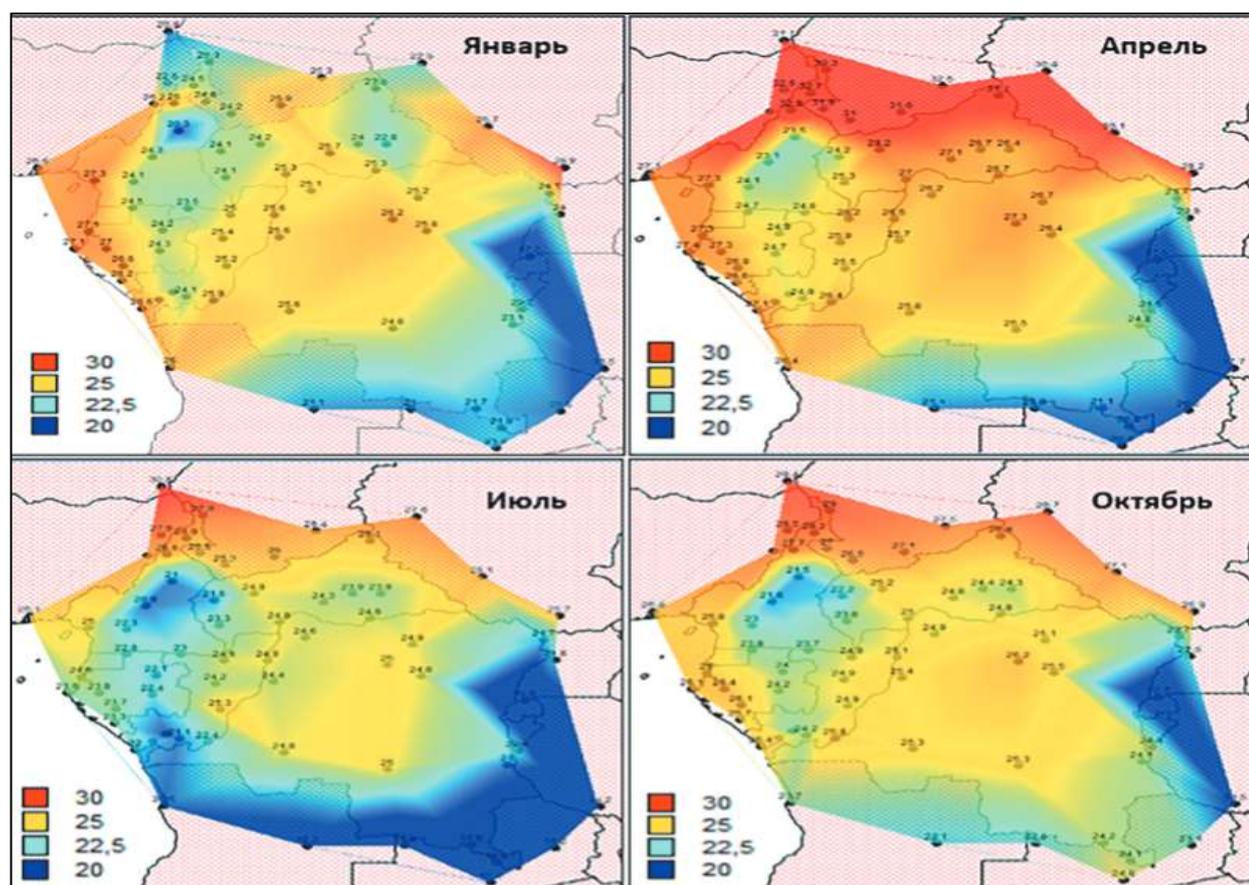


Рисунок 1.4. Пространственные распределения средних многолетних температур в характерные месяцы сезонов года

Затем за счет роста приходящей радиации вся территория прогревается, достигая максимальных значений температур в марте-апреле, особенно в северной части (до 32—33°C). К лету начинается вторая фаза африканского муссона со смещением ВЗК в Северное полушарие и перемещение вслед за ней влажного атлантического воздуха. Наличие облачности и несколько более прохладного воздуха с океана приводит к общему уменьшению температур, что особенно заметно в западной и юго-западной частях территории около Гвинейского залива, где температуры становятся такими же как в горной юго-восточной части (20—22°C). Осенью в межмуссонный период наблюдается естественный радиационный нагрев территории с максимальными

температурами в северной части ближе к Сахели (до 27—28°C) и минимальными в горных районах (21—22°C). Изменения температур по территории составляют от 7-10°C зимой до 12—13 °C в апреле.

В целом следует отметить, что в течение года зима, весна и лето холоднее в горных районах и на морском побережье, а весна и лето теплее больше на севере, чем в других частях региона. Естественная изменчивость (среднее квадратическое отклонение - СКО) на всей территории менее 1°C, за исключением севера территории зимой и весной и юга летом и осенью, где СКО несколько больше 1°C.

1.3 Краткий обзор результатов исследований современных климатических изменений в Центральной Африки

1.3.1 Обзор библиографии

Изменение климата — актуальная тема, которая в настоящее время волнует весь мир. Уже несколько десятилетий ученые в этой области работают над тем, чтобы понять его современные изменения и информировать общество. Например, в результате нескольких исследований климата Центральной Африки был сделан вывод о том, что средняя температура в этом регионе будет повышаться выше среднемировой [47, 81].

Согласно средним сценариям, представленным в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в этом столетии (21 век) большие территории Африки потеплеют более чем на 2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем [47], как показано на рис.1.5.

Ожидается, что повышение температуры в регионах Африки, включая Центральную Африку, будет выше, чем среднее глобальное повышение температуры (на 1,5°C и 2°C), а волны жары будут более частыми и продолжительными [30, 98, 99, 115]. По прогнозам, экстремальные значения температуры в этом регионе будут выше, чем среднее глобальное повышение

температуры, причем наиболее интенсивное потепление будет наблюдаться над Сахелем. [26, 95, 117].

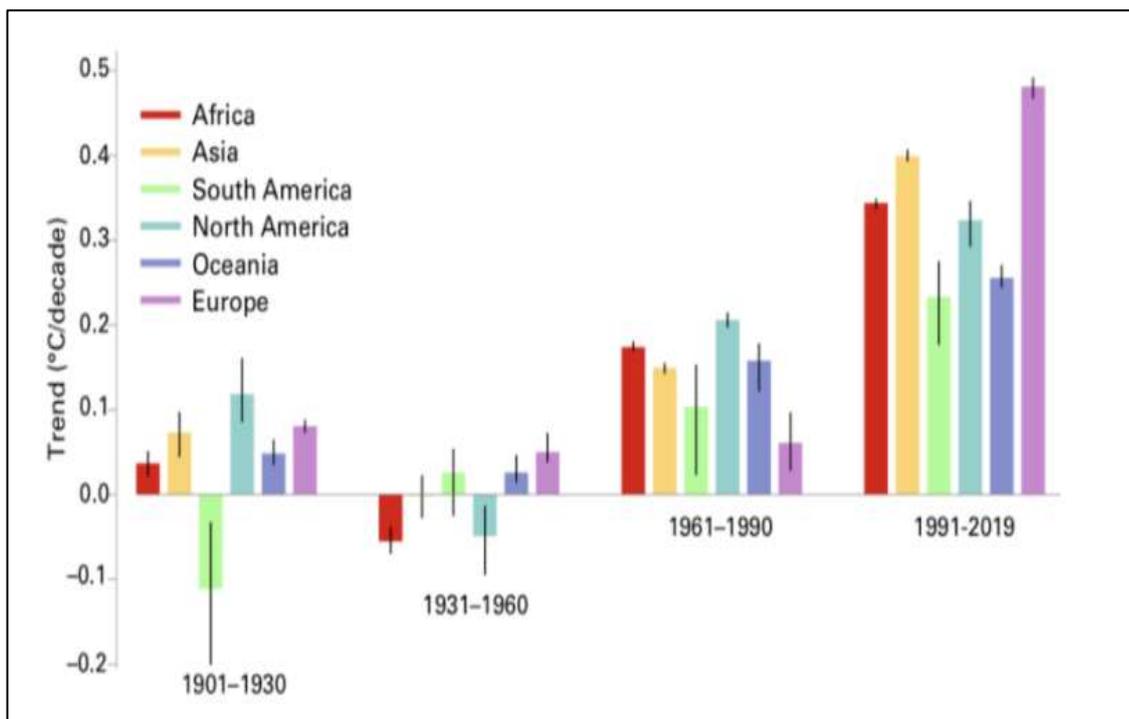


Рисунок 1.5. Тенденции средней приземной температуры воздуха за четыре периода с использованием наборов данных HadCRUT4, NOAA GlobalTemp и GISTEMP. Столбики показывают тенденцию среднего значения трех наборов данных, а черные линии - диапазон между наибольшими и наименьшими тенденциями в трех отдельных наборах данных. [47]

Ученые заметили, что деревья в бассейне реки Конго в Центральной Африке теряют свою способность поглощать углекислый газ, что вызывает опасения относительно их способности накапливать парниковые газы, связанные с изменением климата. [108, 42].

Grossman, Daniel (4 марта 2020 г.) сообщает в статье "The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change", что усиливающаяся жара и засуха подавляют рост деревьев в африканских тропических лесах, и это явление уже наблюдается в Амазонии. Это явление является крупномасштабным свидетельством того, что тропические дождевые леса, которые не пострадали от вырубки или другой деятельности человека,

теряют свою способность бороться с изменением климата, что может способствовать повышению температуры, добавляет он.

Это исследование предсказывает, что к 2030 году африканские джунгли будут поглощать на 14% меньше углекислого газа, чем 10-15 лет назад. [56, 63, 110, 130].

По данным ряда других недавних исследований, за последние 50-100 лет в большинстве районов Африки приповерхностные температуры повысились на 0,5°C и более, причем минимальные температуры повышались быстрее, чем максимальные. [22, 36, 37, 51, 55, 62, 66, 71, 75, 81, 96, 102, 105, 114, 116, 124, 131]. Аномалии приземной температуры воздуха в Африке были значительно выше в период 1995-2010 гг. по сравнению с периодом 1979-1994 гг. [37].

По данным исследований [23,57], среднегодовая температура в Центральной Африке с 1960 года увеличилась на 0,75°C - 1,2°C. Это увеличение сопровождалось ростом числа жарких дней, волн жары и дней жары в период с 1979 по 2016 год, как отмечают [64]. Напротив, экстремальные холодные дни уменьшились, как показали [22, 117]. Однако неопределенности, связанные с ненадежностью наземных сетей наблюдения в регионе, а также связанные с ними неопределенности наблюдений, приводят к средней доверительной оценке увеличения экстремальных температур в регионе.

Согласно последней информации из 6-го Доклада МГЭИК по Африке, глобальное потепление на 1,5°C, 2°C и 3°C выше доиндустриального уровня приведет к повышению среднегодовой температуры в Центральной Африке на 0,6°C, 1,1°C и 2,1°C выше среднего значения за 1994-2005 годы (Рисунок 9.16а в Докладе). Как отмечается в работах [23,50, 44, 95, 127.], к концу столетия (2070-2099) в регионе прогнозируется потепление на 2°C (RCP4.5) - 4°C (RCP8.5). В работах [57, 111] заявлено, что количество дней с максимальной температурой выше 35°C, как ожидается, увеличится на 150 дней или более при уровне глобального потепления 4,4°C. Согласно недавнему исследованию [129], дети, родившиеся в 2020 году при температурном сценарии,

соответствующем повышению температуры на $1,5^{\circ}\text{C}$, за свою жизнь испытают в 6-8 раз больше тепловых волн, чем люди, родившиеся в 1960 году. В случае повышения температуры до $2,4^{\circ}\text{C}$ это воздействие увеличится до 7-9 раз. Кроме того, [97] утверждают, что количество потенциально смертельных тепловых дней в году значительно возрастет с менее 50 дней в период 1995-2005 годов до 50-75 дней при температуре $1,6^{\circ}\text{C}$, 100-150 дней при температуре $2,5^{\circ}\text{C}$ и 200-350 дней при температуре $4,4^{\circ}\text{C}$.

В шестом оценочном отчете МГЭИК (AR6), в главе 9 (IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09_AFRICA), упоминаются результаты нескольких других исследований будущих осадков в Центральной Африке. Среди прочего, прогнозы изменения среднего количества осадков в регионе ненадежны при сценариях с низким уровнем выбросов и при уровнях $1,5^{\circ}\text{C}$ и 2°C . Однако для уровней глобального потепления 3°C и $4,4^{\circ}\text{C}$ региональные климатические модели прогнозируют увеличение среднегодового количества осадков на 10-25% [39, 105, 136], а также усиление экстремальных явлений, связанных с осадками [122, 43, 46, 56, 108, 114]. Это увеличит вероятность широкомасштабных наводнений до и во время, а также и после сезона муссонов, что весьма вероятно. Моделирование конвекции с пространственным разрешением 4,5 км показывает увеличение продолжительности засушливых периодов, что не заметно при более грубом разрешении. Это позволяет предположить, что высыхание связано с более интенсивными экстремальными осадками [121]. Хотя на рисунке 1.6 показано снижение частоты засух, это не учитывает повышение температуры, которое может вызвать увеличение дефицита влаги. Измерения, которые учитывают этот фактор, показывают незначительное увеличение частоты засух или отсутствие изменений [118]. Таким образом, доверие к прогнозируемым изменениям частоты засух в регионе низкое.

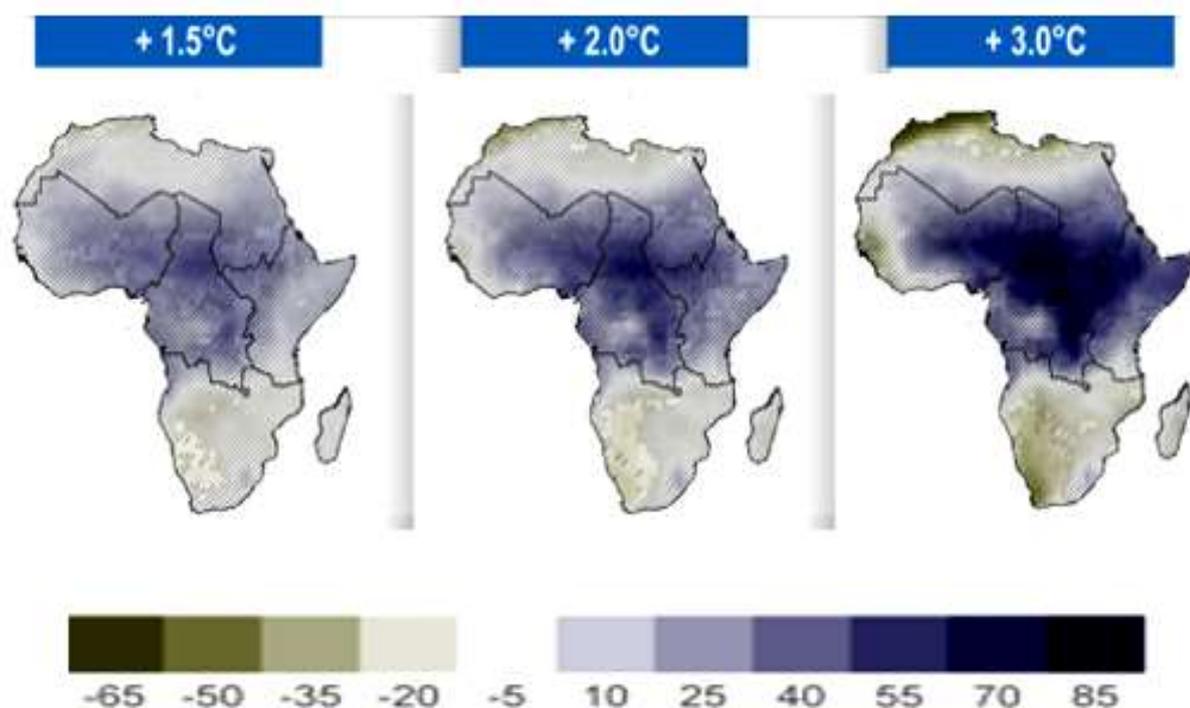


Рисунок 1.6. Прогнозируемые изменения засухи при глобальном потеплении на 1,5°C, 2°C и 3°C по сравнению с доиндустриальным периодом (1850 — 1900гг.), представленные шестимесячным стандартизированным индексом осадков (SPI,%): отрицательные изменения указывают на области, где прогнозируется увеличение частоты, интенсивности и/или продолжительности засухи, а положительные изменения показывают обратное. Показанные здесь изменения относятся к периоду 1995-2014 гг. [74]

1.3.2 Показатели изменения климата.

Климат — статистический ансамбль состояний, которые проходит система океан – суша – атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий. А погода — мгновенное состояние системы океан-суша-атмосфера, которое характеризуется некоторым набором глобальных полей характеристик гидросферы, воздуха и почвы.

Существует множество показателей изменения параметров климата. Они включают физические процессы, такие как изменения температуры поверхности, атмосферного водяного пара, осадков, экстремальных явлений, ледников, океанического и материкового льда и уровня моря (МГЭИК).

Пример температуры, представленный в пятом докладе МГЭИК (рис.1.7), отражает наблюдаемые изменения глобальной средней температуры приземного воздуха с 1950 года (по данным четырех основных баз данных, в виде аномалий относительно периода 1961-1990 годов).

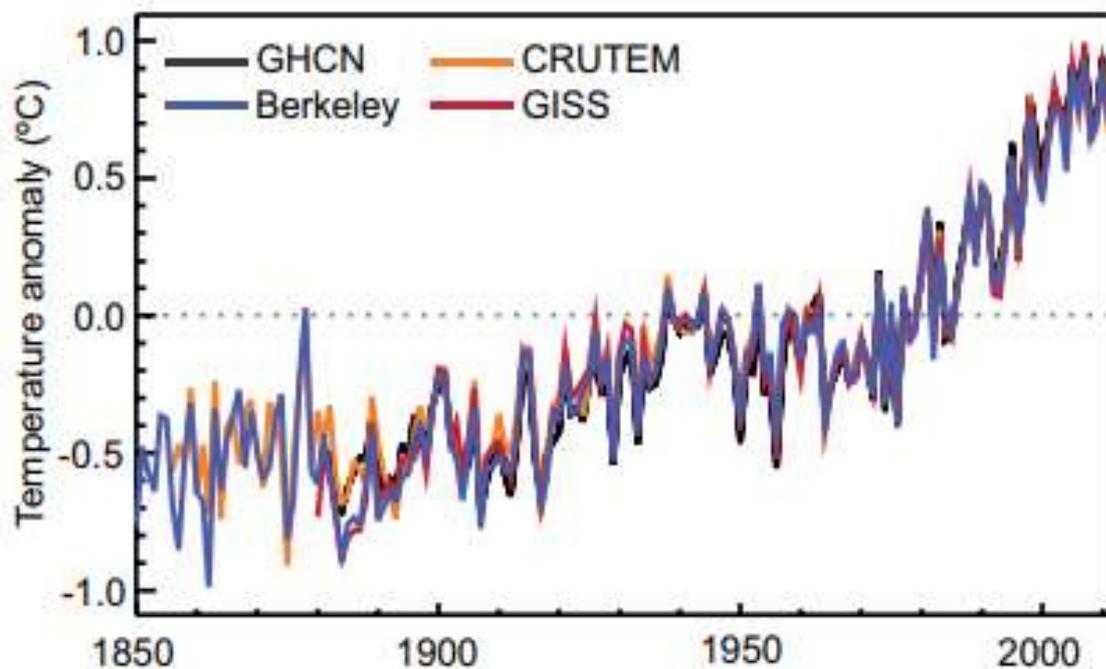


Рисунок 1.7. Глобальные среднегодовые аномалии температуры воздуха на поверхности суши (LSAT) по отношению к периоду 1961-1990 гг. на основе последних версий четырех различных наборов данных (Berkeley, CRUTEM, GHCN и GISS). [68]

Анализ, представленный на рис. 1.7, показывает, что, несмотря на различные подходы в четырех разных наборах данных, долгосрочные изменения и тенденции в целом согласуются между этими различными оценками температуры воздуха у поверхности суши, особенно после 1900 года. Глобальная температура воздуха у поверхности суши увеличилась.

Рис. 1.8. показывает изменение наблюдаемой средней глобальной поверхностной температуры (GMST) относительно периода 1850-1900 годов и иллюстрирует наблюдаемые уровни потепления для ряда базовых периодов, использованных в AR6 или в предыдущих отчетах МГЭИК. Это позволяет рассчитать изменения между периодами и сравнить их с предыдущими оценками.

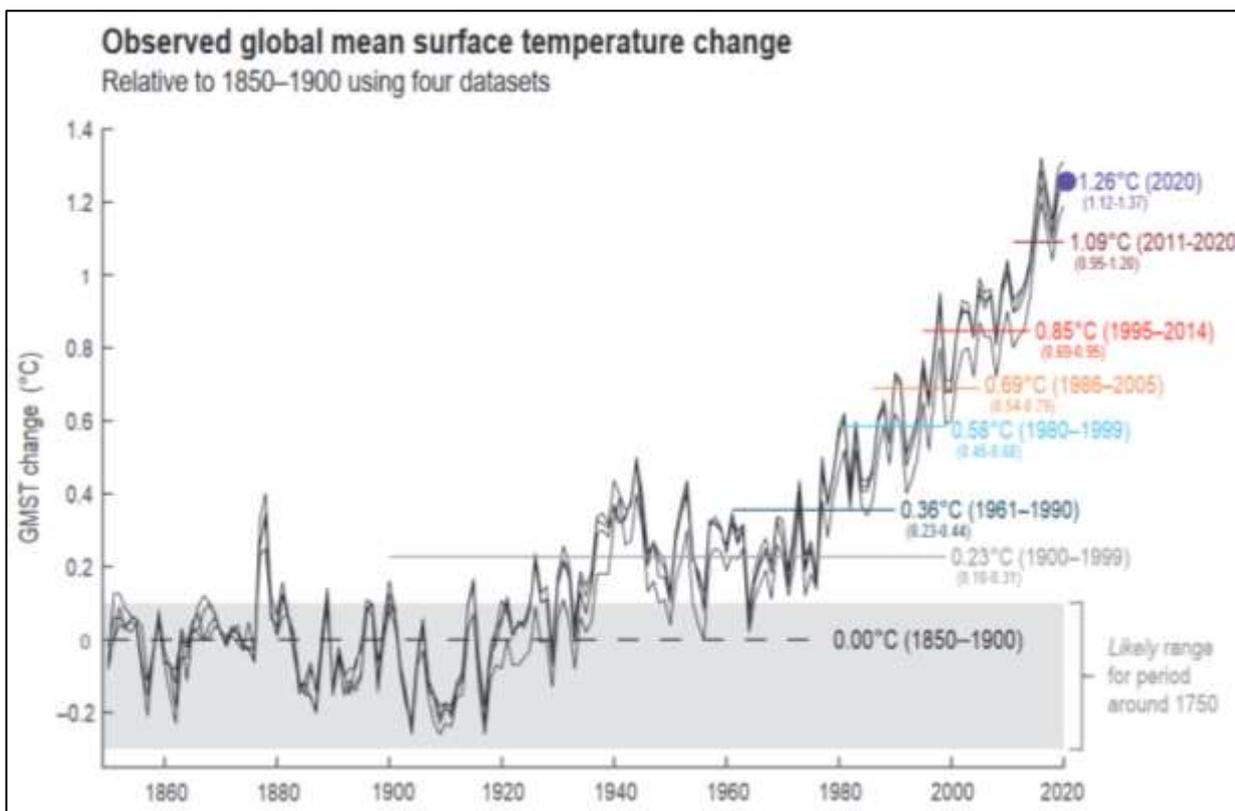


Рисунок 1.8. Глобальное потепление за инструментальный период. Наблюдаемая средняя глобальная поверхностная температура (СГТП) из четырех наборов данных, относительно средней температуры 1850-1900 гг. в каждом наборе данных [73].

Например, в AR5 изменение СГТП между базовым периодом 1850-1900 гг. и базовым периодом 1986-2005 гг. оценивалось в 0,61 [0,55-0,67] °С, тогда как сейчас оно оценивается в 0,69 [0,52-0,82] °С с использованием улучшенных наборов данных SST (вставка 2.3 в главе с перекрестными ссылками, доклад МГЭИК).

1.3.3 Причины глобального потепления климата

В настоящее время проведено и продолжает проводиться множество исследований в области изменения климата, в которых, среди прочих причин, упоминается изменение концентрации парниковых газов в атмосфере. Согласно этим исследованиям, так называемые парниковые газы (углекислый

газ, водяной пар, метан, фреоны и т.д.) препятствуют уходу инфракрасного излучения с поверхности Земли в космос, тем самым вызывая потепление Земли. Появляется все больше доказательств того, что причиной этих явлений является деятельность человека.

В заявлении ООН от 9 августа 2021 года о вкладе Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) под названием "Изменение климата в 2021 году: физические научные основы" дается подтверждение, что антропогенное воздействие привело к потеплению климатической системы, повысив температуру поверхности планеты, и недавнее изменение климата является широко распространенным, быстрым и интенсивным, а его последствия затрагивают все регионы Земли, включая океаны. Многие экстремальные метеорологические и климатические явления, такие как волны тепла, ливневые дожди, засухи и тропические циклоны, стали более частыми и серьезными.

В изменении климата участвуют несколько факторов, в том числе:

а) Повышение концентраций парниковых газов, в частности CO_2 , концентрация которого в атмосфере Земли увеличивалась, а скорость этого увеличения также ускорилась в течение 20-го века.

б) Разрушения растительного покрова. Растительность играет важную роль в связывании углерода, а характер поверхности Земли оказывает значительное влияние на земную радиацию (на альбедо поверхности). Поэтому в результате лесных пожаров, сельского хозяйства, разведения животных, урбанизации и других видов деятельности происходит негативное изменение природного рельефа, что влияет на климат.

с) Радиационный баланс Земли является центральным компонентом климатической системы. В среднем радиационные процессы нагревают поверхность и приводят к охлаждению атмосферы, что в свою очередь достигается за счет гидрологического цикла и скрытого тепла. Пространственный и временной дефицит энергии, обусловленный радиацией

и скрытым нагревом, создает общую циркуляцию атмосферы и океанов. Антропогенное влияние на климат проявляется в основном через нарушения компонентов радиационного баланса Земли, поскольку колебания количества энергии от Солнца в настоящее время уменьшились (около 0,1%).

г) Океанические течения. Результаты различных независимых и последовательных методов наблюдений, полученные в ходе нескольких исследований, показали, что почти наверняка океан потеплел на разных уровнях; в среднем на 0,11°C за десятилетие в 75-метровой зоне. Весьма вероятно, что поверхностная интенсификация сигнала потепления увеличила термическую стратификацию верхнего слоя океана примерно на 4% (между 0 и 200 м глубины) в период с 1971 по 2010 год. Все это потепление, от поверхности до глубин океана, а также другие факторы, такие как соленость, могут вызвать изменения в океанических течениях, которые играют важную роль в распределении тепла от тропических поясов Земли к умеренным и полярным поясам.

е) Из-за динамики прецессии расстояние Земли от Солнца меняется (от 147,3 до 152,1 млн км) в зависимости от времени года и влияет на изменение притока солнечной радиации к Земле. Изменение наклона земной оси относительно плоскости орбиты также влияет на количество тепла между различными широтами. [4].

ф) Влияние вулканов. В верхних слоях атмосферы аэрозоли, образующиеся при извержениях вулканов и ядерных взрывах, уменьшают поступление солнечного тепла к Земле, в то время как пыль, образующаяся в результате той же деятельности, опускается в тропосферу и помогает отражать солнечный свет обратно в космос; вместе эти эффекты могут привести к глобальному и длительному охлаждению климата Земли.

Помимо этих факторов, существует множество других, не перечисленных здесь, которые по-разному вносят свой вклад в изменение климата и в разных масштабах колебаний, формируя, таким образом,

изменение климата, его межгодовую изменчивость и циклические колебания [116, 95].

В 5-м докладе МГЭИК [68] также представлен вклад основных климатических факторов в изменчивость климата, как показано на рисунке 1.9 Температурные аномалии (°C) показаны для наблюдаемой глобальной атмосферной температуры с 1890 по 2010 год по данным реанализа Центра Хэдли [128] (черная линия) и его сглаживания по Lean [82, 83, 84] (красная линия), Lockwood [86, 87, 88, 89] (розовая линия), Folland [49] (зеленая линия), Kaufmann [77, 78, 79] (синяя линия). Другие факторы, такие как Эль-Ниньо-Южное колебание (ENSO), вулканическая активность, вариации поступающей солнечной радиации, антропогенное воздействие и Атлантическое межгодовое колебание (Folland [49]), 17,5-летние и полугодовые колебания, индекс Арктического колебания (Lean [82], Lockwood [88]),

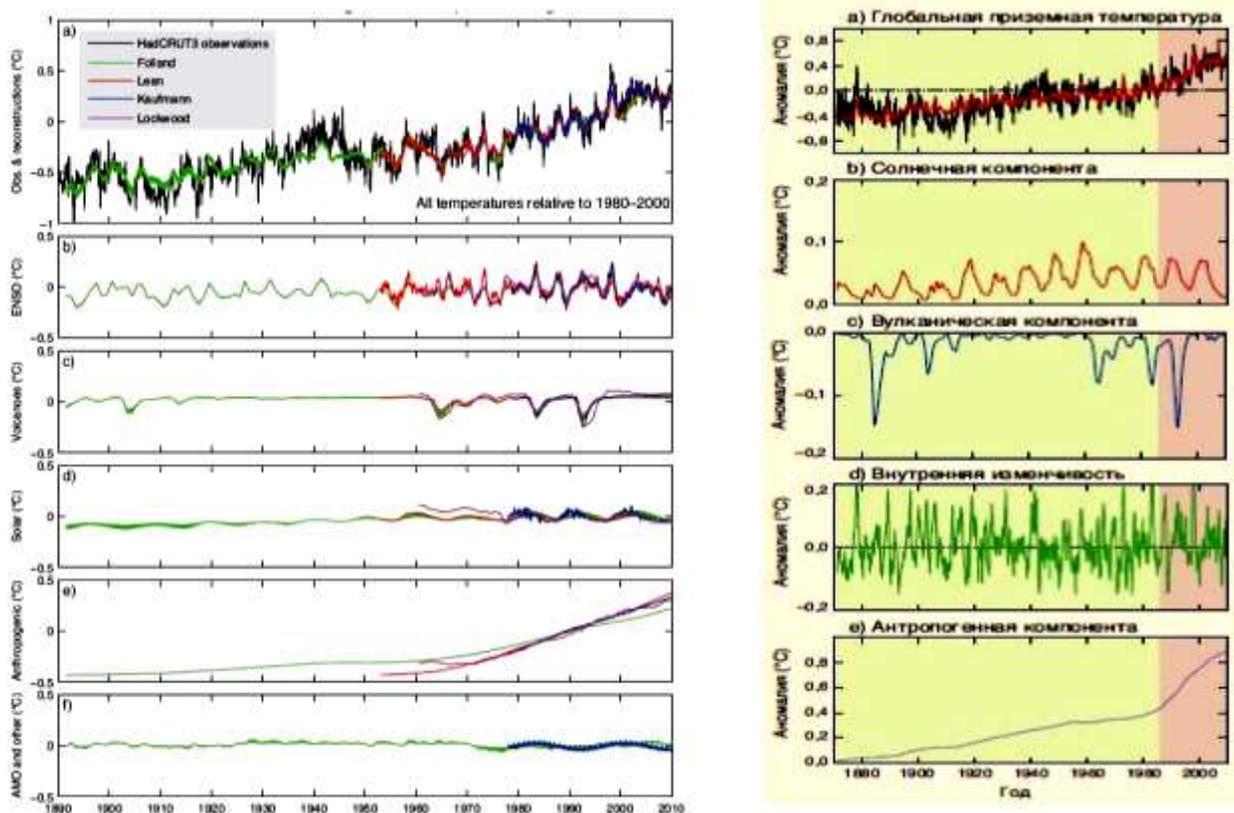


Рисунок 1.9. Аномалии колебания глобальной температуры и основных формирующих ее факторов [68].

На основе компонентного анализа можно выделить циклические колебания глобальной температуры и отдельные понижения, которые вызваны природными факторами, такими как Эль-Ниньо, извержения вулканов и приходящая солнечная радиация. Напротив, направленное блокирование обусловлено антропогенными факторами. Кроме того, на рисунке 1.10. показано, что в последние годы глобальная температура стабилизировалась из-за снижения поступающей солнечной радиации и эффекта ENSO.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ

2.1 Введение

Изменение климата — одна из основных проблем, с которыми сталкивается человечество в XXI веке [25, 133]. Его воздействие сегодня проявляется во все секторах государственной и частной деятельности [73]. МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) в 5-ом оценочном докладе утверждает, что глобальное потепление однозначно характеризуется повышением средней температуры атмосферы и океанов [72]. Причем температура воздуха в разных широтах повышается по-разному и наибольшее повышение температуры наблюдалось в умеренных широтах и на юге Сибири [2]. На основании физико-математических моделей климата при современном потеплении следует ожидать наибольшего прироста температуры в высоких широтах и наименьшего в низких или экваториальных, к которым относится рассматриваемая в данной работе территория Центральной Африки.

Вместе с тем в докладах МГЭИК рост температур в экваториальных районах Африки имеет большую неопределенность и составляет от 0,2 до 2°C, что в основном обусловлено низкой надежностью данных наблюдений [29, 21, 24, 32].

Согласно средним сценариям, представленным в 5-ом докладе МГЭИК и подтвержденным различными другими климатическими исследованиями, в этом столетии большие территории Африки потеплеют более чем на 2°C выше доиндустриального уровня [35, 45, 47, 60, 81]. Ожидается, что повышение температуры в регионах Африки, включая Центральную Африку, будет даже выше, чем повышение среднемировой температуры (на 1,5°C и 2°C), а волны жары будут более частыми и продолжительными. Ожидается, что экстремальные значения температуры в этом регионе будут выше, чем в среднем по планете, причем наиболее интенсивное потепление будет наблюдаться в Сахеле [44, 66, 22, 117, 74].

В связи с большой неопределенностью полученных результатов по региону Центральной Африки целью данной главы является комплексная оценка всесторонняя оценка как качества данных наблюдений, так и оценок изменения температуры в этом регионе статистическими методами и моделями.

2.2 Исходные данные и оценка их качества

Данные, используемые для исследования, представляют собой многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха с начала наблюдений по 2021 г. включительно на 65 метеостанциях, полученные из архивов с сайта метеорологического института Королевства Нидерланды и с сайта «Погода и климат» [139, 140].

Расположение станций с указанием 5-значного кода ВМО показано на рис. 1.3. В целом, распределение станций по территории недостаточно равномерно, и особенно мало пунктов наблюдений в Демократической Республике Конго (9 пунктов), площадь которой составляет практически половину от всей рассматриваемой территории Центральной Африки. На получение более полной информации по отдельным странам Африки влияет отсутствие доступа к ней, как отмечается, например, в работе [40].

Продолжительность рядов наблюдений на метеостанциях также разная и их распределение по продолжительности показано на рис.2.1.

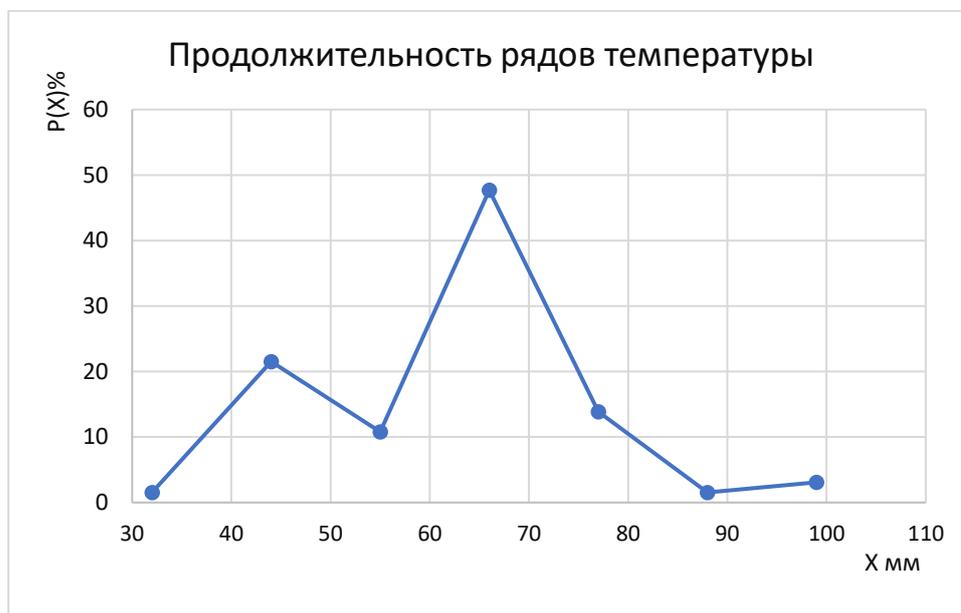


Рисунок 2.1. Распределение станций по продолжительности рядов наблюдений температуры воздуха

Из графика приведённого на рис. 2.1, следует, что модальное значение равно 66 лет, а медиана равна 70 лет, что свидетельствует об асимметричности эмпирического распределения. Высоты метеостанций изменяют от 100 до 1800 м (рис. 1.1).

Для формализованной оценки однородности и качества данных были применены статистические критерии Диксона и Смирнова—Граббса для оценки однородности экстремумов эмпирических распределений и статистические критерии Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух одинаковых частей временного ряда [3, 14, 17]. Помимо 65 метеостанций на территории Центральной Африки также была дополнительно оценена однородность рядов температур в 22 ближайших пунктах за ее пределами, имеющих продолжительные ряды наблюдений, которые могут быть привлечены в качестве аналогов при приведении к многолетнему периоду. В результате полученные статистически значимые

неоднородные экстремумы при уровне значимости 5 % были исключены из рядов наблюдений. Результаты оценки стационарности на тех же 87 станциях по критериям Фишера и Стьюдента показали, что процент выявленных случаев нестационарности составляет 22,5 %, что свидетельствует о том, что даже при такой предварительной оценке имеются изменения параметров временных рядов. Установлено также, что наиболее неоднородная и некачественная информация существует в Демократической Республике Конго, где большая площадь и всего 9 пунктов наблюдений.

В результате пункты наблюдений по качеству информации и продолжительности рядов были разделены на две группы: 30 пунктов с продолжительными и непрерывными рядами наблюдений и остальные пункты, в которых ряды наблюдений непродолжительные, имеются ненадежные и неоднородные данные и пропуски наблюдений. Метеостанции с наиболее продолжительными рядами расположены в основном в восточной и северо-восточной частях исследуемой территории, т. е. в Республике Конго, Габоне, Экваториальной Гвинее, Камеруне и в юго-восточной части Центральноафриканской Республики. По остальной территории (север и запад Центральноафриканской Республики, и вся территория Демократической Республики Конго) данных крайне не хватает, или ряды наблюдений не продолжительны и содержат ненадежную информацию.

Для приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду и восстановления пропусков наблюдений применена методика, основанная на построении регрессионных зависимостей за совместный период между короткими рядами наблюдений и более продолжительными в пунктах-аналогах [18, 8]. При этом минимальный совместный период наблюдений был установлен в 10 лет, минимальное количество аналогов в уравнении 3, минимально допустимое значение коэффициента корреляции $R=0,85$ для уравнений связи между непродолжительным рядом наблюдений и продолжительными рядами в пунктах-аналогах, среднее отношение коэффициента уравнения регрессии к его средней квадратической

ошибке 2,0, что соответствует 95%-ному доверительному интервалу. Полученные результаты представлены в таблице 2.1, где n — среднее по всем станциям число лет наблюдений, N — среднее число лет после восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов, σ_{ε} — средняя квадратическая погрешность восстановленных значений в °С, R — среднее значение коэффициента корреляции уравнений, полученных для восстановления и m — среднее число пунктов-аналогов, использованных для восстановления.

Таблица 2.1.

Результаты восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов среднемесячных температур на метеостанциях Центральной Африки

Месяц	n	N	σ_{ε}	R	m
1	51	87	0,2	0,94	24
2	51	87	0,3	0,95	25
3	52	84	0,2	0,92	22
4	51	83	0,2	0,93	21
5	51	82	0,2	0,92	23
6	51	84	0,2	0,92	24
7	52	85	0,2	0,93	22
8	52	83	0,2	0,91	23
9	51	83	0,2	0,94	24
10	52	80	0,2	0,93	21
11	51	84	0,2	0,93	24
12	52	86	0,2	0,94	23

Результаты, представленные в табл. 2.1 свидетельствуют, что показатели приведения к многолетнему периоду достаточно хорошие: количество восстановленных лет в среднем изменяется от 28 в октябре до 36 в январе и феврале, средняя стандартная погрешность восстановленных данных небольшая и составляет всего 0,2—0,3 °С, среднее значение коэффициента корреляции высокое — от 0,91 в августе до 0,95 в феврале. В результате средняя продолжительность многолетних рядов температур была доведена до 86—87 лет для зимних месяцев и до 80—85 лет в другие месяцы. Вместе с тем качество восстановления в отдельные годы и на отдельных метеостанциях было не столь высоким, что составляло всего 5% от общего числа восстановленных данных, как показал повторный анализ однородности и

стационарности. Как правило, эта ситуация происходила, когда период наблюдений на станциях был менее 15—20 лет, что характерно для метеостанций на территории Демократической Республики Конго. В итоге некачественные восстановленные данные были исключены.

2.3 Методика исследований

2.3.1 Статистическая модель временного ряда

Многолетние колебания климатических характеристик представляют собой композицию или сумму процессов разных временных масштабов. Существует несколько классификаций масштабов изменений климатических характеристик. Наиболее развернутая и детальная — классификация А.С.Монина, где приведены процессы от мелкомасштабных колебаний с периодами секунды – минуты до изменений геологических эпох с периодами десятки и сотни миллионы лет, а также недавняя классификация проекта CLIVAR, где на интервале инструментальных наблюдений рассматриваются обобщенные процессы внутригодовой изменчивости, а на межгодовой оси — процессы межгодовой и десятилетней изменчивости и столетних изменений [9].

Для временного интервала инструментальных наблюдений в 100—150 лет число процессов может быть уменьшено до трех — это процессы межгодового, десятилетнего масштабов и часть цикла процесса столетнего масштаба. Вклад этих процессов от тысячелетнего масштаба колебаний и выше будет крайне незначителен:

$$Y_i = Y_{1i} + Y_{2i} + Y_{3i}, \quad (2.1)$$

где Y_{1i} , Y_{2i} , Y_{3i} — процессы межгодового, десятилетнего и столетнего масштабов. Существующая модель такого временного ряда, как правило, представляет его в виде следующих составляющих:

$$Y_i = f(t) + \sin(t) \pm \varepsilon_i, \quad (2.2)$$

где $f(t)$ — регулярная составляющая, которая обусловлена частью процесса столетнего масштаба Y_{3i} ; $\sin(t)$ — гармоническая функция, обусловленная колебаниями процесса десятилетнего масштаба Y_{2i} и $\pm \varepsilon_i$ — случайная составляющая, обусловленная процессом межгодового масштаба Y_{1i} , обычно связанным с «быстрыми» колебаниями атмосферы.

Если принять, что циклические колебания десятилетнего масштабов также носят случайный характер, то уравнение можно упростить:

$$Y_i = f(t) \pm \varepsilon''_i, \quad (2.3)$$

где $\pm \varepsilon''_i$ — обобщенная случайная составляющая, обусловленная процессами межгодового и десятилетнего масштабов. На уровне рассмотрения простых моделей типа (2.3) проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть в двух вариантах:

- монотонные изменения в виде тренда,
- ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые изменения имеются в слабо инерционной или равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия и сопротивляться им до тех пор, пока эти воздействия не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, обычно также квазистационарный, уровень [10, 11]. Фактически этот переход от одних стационарных условий к

другим может происходить не за один год, а за несколько лет, и он также представлен в виде тренда между двумя стационарными состояниями.

Эффективность модели (2.3) проверяется по отношению к базовой стационарной модели, в которой среднее не изменяется во времени.

2.3.2 Оценка эффективности модели

Чтобы оценить какая модель из трех (стационарная, линейного тренда или ступенчатых изменений) эффективнее, необходимо выбрать показатель качества модели. Такими эффективными показателями являются коэффициент детерминации R^2 и обратная ему величина дисперсии (σ_ε^2) или стандартного отклонения (σ_ε) остатков, которые связаны между собой следующим уравнением:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (2.4)$$

где σ_y — стандартное отклонение ряда наблюдений; σ_ε — стандартное отклонение остатков относительно модели временного ряда.

При аппроксимации временных рядов климатических характеристик во времени не следует ожидать высоких значений R^2 , и поэтому сложно оценить по этому показателю насколько статистически отличаются R^2 одной и другой модели. В качестве показателя эффективности лучше выбрать дисперсию остатков σ_ε^2 , и для оценки статистического отличия этих дисперсий при разных моделях вполне применим известный критерий Фишера. В качестве базовой или «нулевой» модели следует принять модель стационарной выборки, которая характеризуется неизменностью во времени основных параметров ряда (среднего значения и среднего квадратического отклонения), что выражается условиями:

$$Y_{cp}(t) = const, \quad \sigma_y(t) = const.$$

Для стационарной модели стандартное отклонение остатков равно естественной изменчивости — среднему квадратическому отклонению ряда (СКО), т. е. $\sigma_\varepsilon = \sigma_y$, потому что стационарная модель является стохастической и не имеет никакой связанности со временем. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков определяется по (2.4), а для модели ступенчатых изменений — как СКО от двух стационарных средних:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (2.5)$$

где n_1, n_2 — продолжительности первой и второй стационарных частей ряда.

Год перехода от одного стационарного среднего к другому ($T_{\text{ст}}$) в модели ступенчатых изменений определяется итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2 (n_1 - 1) + \sigma_2^2 (n_2 - 1) = \min. \quad (2.6)$$

При этом следует задать минимальный объем первой части ряда, например, $n_1=10$, при котором $n_2 = n - n_1$, и затем последовательно увеличивать n_1 до $m=n-10$, при котором $n_2 = 10$, т. е. $n_1 = 11, 12, \dots, m$. Иначе эту процедуру можно назвать методом расширяющегося окна [19, 5].

Очевидно, что стандарт остатков модели стационарного среднего должен быть наибольшим или, по крайней мере, равен стандарту остатков нестационарных моделей, если они практически ничего не объясняют. Чем больше разность между стандартами остатков стационарной и нестационарной модели, тем нестационарная модель эффективнее стационарной. В качестве меры отличия можно рассмотреть относительные отклонения Δ в %, рассчитываемые по формуле:

$$\Delta = \frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} 100\% \quad (2.7)$$

В первом приближении можно принять, что любая нестационарная модель будет эффективнее модели стационарной выборки, если $\Delta \geq 10\%$, т. е. отличие между моделями гарантированно превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики. Для оценки статистически значимого отличия остаточных дисперсий стационарной и нестационарной модели можно применить критерий Фишера:

$$F_{\text{ТР}} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (2.8)$$

На основе критических значений статистик Фишера можно определить и критическое значение $\Delta_{\text{кр}}\%$, которое получается при подстановке (2.8) в (2.7):

$$\Delta_{\text{кр}} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{F^*}}\right) 100\%, \quad (2.9)$$

где F^* — критическое значение статистики критерия Фишера при уровне значимости α и степенях свободы ν_1 и ν_2 , где $\nu_1 = n_1 - 1$ и $\nu_2 = n_2 - 1$, а n_1, n_2 — объемы выборок.

Принимая, что уровень значимости $\alpha = 5\%$, а временной ряд один и тот же, т. е. $n_1 = n_2 = n$, и для средней продолжительности ряда, равной $n = 61$ год, из таблиц критических значений получим $F^* = 1,53$, а из (2.9) $\Delta_{\text{кр}} = 19,4\%$. Если же продолжительность ряда равна $n = 31$ год, то $F^* = 1,84$ и $\Delta_{\text{кр}} = 26,5\%$, если $n = 120$, то $F^* = 1,35$ и $\Delta_{\text{кр}} = 13,8\%$, и т.д. Можно также найти, что $\Delta_{\text{кр}} = 10\%$ соответствует $F^* = 1,235$ и n примерно равно 500, т. е. выбранное $\Delta = 10\%$ соответствует предельному критическому при очень большой продолжительности ряда.

2.3.3 Оценка устойчивости модели

Установленный год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) применим не только для модели ступенчатых изменений, но и модели тренда, для которой он характеризует изменение скорости тренда или его направления.

Фактически этот год позволяет проверить устойчивость вида и параметров модели во времени. Условие стационарности или нестационарности каждой части ряда до и после $T_{ст}$ можно проверить с помощью оценки статистической значимости коэффициента корреляции климатической характеристики со временем. При этом возможны следующие варианты:

— коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически незначимы и это означает, что временному ряду соответствует модель ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому; — коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически значимы и это означает, что выявленный год $T_{ст}$ является годом перехода от одной скорости тренда к другой;

— один из коэффициентов корреляции со временем статистически значим, а другой не значим, и это означает, в одной части ряда тренд имеет место, а в другой нет.

Поэтому установленный год $T_{ст}$ позволяет оценить устойчивость параметров модели временного ряда. При этом нулевая гипотеза об одинаковости типа модели для двух частей временного ряда также может отклоняться, и одна часть ряда может больше соответствовать стационарной модели, а вторая — модели тренда.

2.3.4 Алгоритм реализации методики

Алгоритм данного исследования включает следующие основные пункты.

1. На основе данных 30 пунктов наблюдений, выбранных в качестве наиболее продолжительных с достоверной информацией, осуществляется аппроксимация временных рядов моделями нестационарного среднего и рассчитываются показатели эффективности этих моделей (r — коэффициент корреляции со временем, $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ — отличия от модели стационарной выборки моделей линейного тренда и ступенчатых изменений соответственно) и год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$).

2. Оценивается устойчивость показателей эффективности моделей нестационарного среднего (r , $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$) и $T_{ст}$ во времени путем задания разных лет начала наблюдений (1900, 1920, 1940, 1960, 1980, 2000 гг.) и определяется год наиболее вероятного перехода от одних стационарных или квазистационарных условий к другим ($T_{стр}$).

3. Устанавливаются предварительные пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей по результатам моделирования данных 30 метеостанций с наиболее надежной и достоверной информацией.

4. Осуществляется моделирование временных рядов на остальных метеостанциях и новые результаты дополняют и уточняют полученные ранее пространственно-временные закономерности.

5. Выделяются однородные районы с одинаковым видом изменений средних значений во времени и годом этих изменений ($T_{стр}$), при этом статистическое отличие средних значений двух частей временного ряда ($x_{ср1}$, $x_{ср2}$) оценивается по критерию Стьюдента [14].

6. В полученных однородных районах оценивается вид модели до и после $T_{стр}$ на основе оценки коэффициентов корреляции со временем для каждой части временного ряда (r_1 и r_2).

7. Рассчитывается разность между средними значениями ($\Delta_{\text{хср}} = \text{хср2} - \text{хср1}$) и сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда (σ_y), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

8. Устанавливаются пространственные закономерности $\Delta_{\text{хср}}$ в °С и в долях σ_y .

2.4 Результаты и их обсуждение

2.4.1 Полученные закономерности на основе продолжительных рядов

Прежде всего, было проведено моделирование и выполнена оценка устойчивости параметров моделей для 30 наиболее продолжительных рядов с надежными данными наблюдений. Результаты в виде средних значений параметров эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ст}}$, а также $T_{\text{ст}}$ приведены в таблице 2.2 для двух частей продолжительных временных рядов: с начала наблюдений до 1960 года и с 1961 по 2021 гг.

Таблица 2.2

Результаты оценки устойчивости параметров моделей
для 30 наиболее продолжительных рядов

Месяцы	$\Delta_{\text{тр}}$		$\Delta_{\text{ст}}$		r		$T_{\text{ст}}$	
	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960
1	7,0	10,0	1,1	13,2	0,06	0,29	1948	1994
2	8,8	10,9	0,8	14,3	0,13	0,35	1946	1995
3	9,9	11	1,5	15,1	0,08	0,39	1948	1995
4	8,9	10,6	1,1	14,7	0,13	0,33	1947	1988
5	7,2	10,3	1,3	15,9	0,09	0,33	1947	1987
6	9,2	11,9	0,1	15,7	0,24	0,4	1946	1991
7	7,0	16,6	0,5	20,4	0,18	0,48	1948	1992
8	6,2	13,9	1,0	18,2	0,08	0,41	1946	1991
9	5,7	12,4	0,3	18,0	0,03	0,35	1945	1991
10	7,2	11,0	0,2	17,6	0,04	0,31	1941	1988
11	9,1	13,0	1,1	18,1	0,02	0,38	1945	1994
12	7,8	10	1,0	15,2	0,1	0,3	1948	1992
Среднее		11,8		16,4				

Из данных таблицы 2.2 следует, что показатели нестационарности $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ за период наблюдений до 1960 г. для температуры всех месяцев менее 10%, а коэффициенты корреляции со временем r статистически незначимы. Поэтому период до 1960 г. можно считать стационарным. Вся нестационарность в рядах температур имеет место после 1960 г., т. е. в последний период времени со второй половины XX века. Показатели нестационарности $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ в среднем для температур всех месяцев года $> 10\%$ с максимальными значениями 18—20 % в июле – сентябре. При этом во всех случаях $\Delta_{ст} > \Delta_{тр}$ (в среднем после 1960 г. $\Delta_{тр} = 11,8\%$, $\Delta_{ст} = 16,4\%$), что свидетельствует о большей эффективности нестационарной модели ступенчатых изменений среднего, чем модели линейного тренда при аппроксимации временных рядов. В среднем, год таких ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим относится к концу 1980х — началу 1990-х. Коэффициенты корреляции r температуры воздуха со временем для всех месяцев статистически незначимы.

2.4.2 Пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей

По наиболее продолжительным рядам наблюдений было установлено, что все изменения имеют место во второй половине XX века и, в среднем, в конце 1980-х — начале 1990-х. Поэтому для моделирования в остальных пунктах рассматривались ряды наблюдений только с 1960 г. В результате были рассчитаны параметры эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ст}$ и годы перехода от одного квазистационарного режима к другому $T_{ст}$ для всех пунктов наблюдений и для всех среднемесячных температур года. На рис. 2.2 приведены пространственные распределения коэффициентов корреляции r среднемесячных температур со временем для всех месяцев года, которые позволяют оценить эволюцию областей нестационарных моделей. При продолжительности рядов в 61 года (1961—2021 гг.) статистически значимые

r начинаются с $r=0,32$, и поэтому вторая и третья градации r на рисунке 2.2 будут представлять области моделей нестационарного среднего.

Анализ динамики таких областей нестационарных моделей в течение года позволяет сделать следующие выводы. В период зимнего муссона области нестационарных моделей имеют место по границам территории, занимая примерно 50% от ее общей площади с максимумом нестационарности в феврале на востоке.

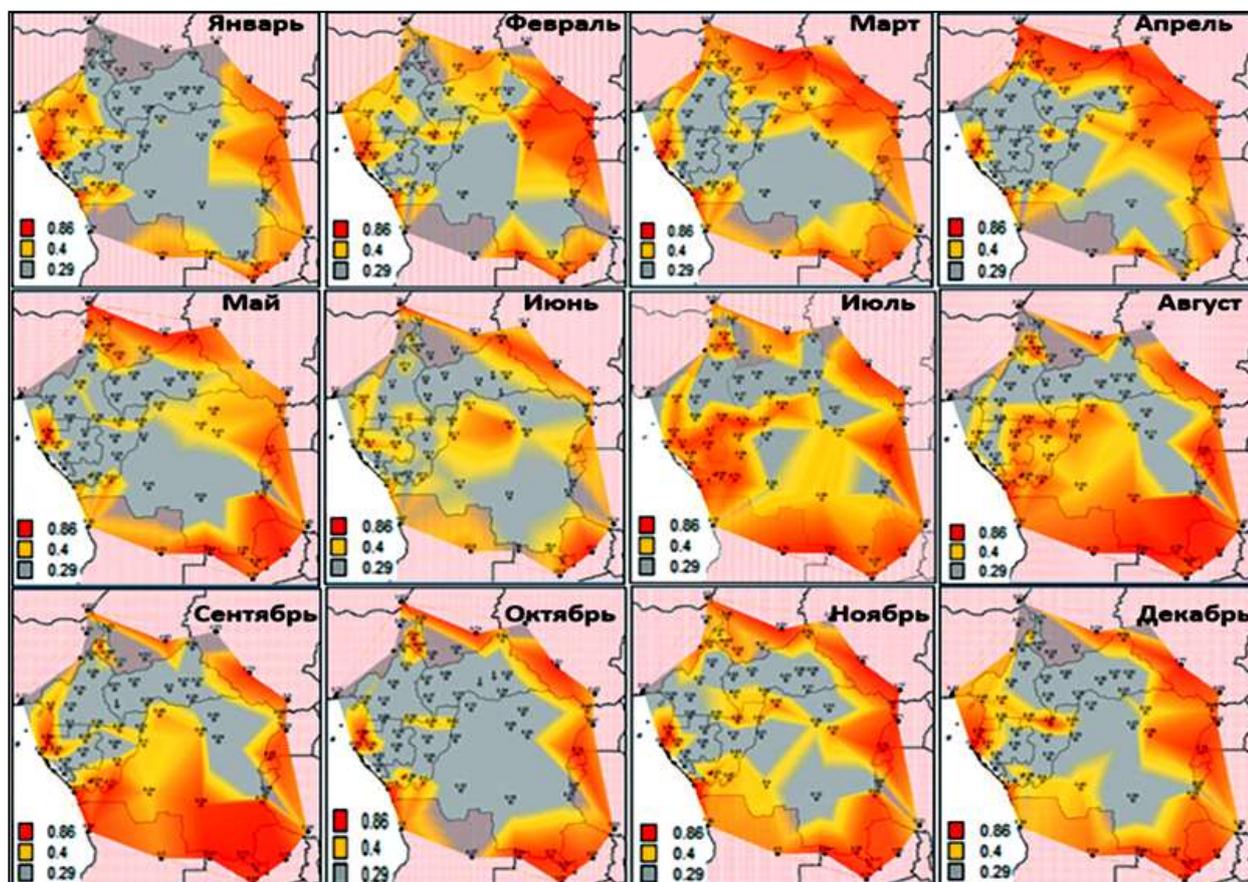


Рисунок 2.2. Пространственные распределения коэффициентов корреляции (r) температуры воздуха со временем в течение года.

В межмуссонный жаркий весенний период область нестационарных моделей несколько увеличивается и смещается в восточную часть территории, занимая в апреле половину всей площади от северо-востока до юго-востока. В период летнего муссона, когда влажные теплые воздушные массы поступают с Атлантики, территория нестационарных моделей, особенно в июле и августе,

покрывает уже до $2/3$ всей рассматриваемой площади и охватывает также и западные прибрежные районы. Отсюда можно предположить, что рост температуры в прибрежных западных частях связан с повышением температуры в прилегающей акватории Атлантики. Области стационарных моделей локализованы в основном в центральной и северных частях территории. В осенний межмуссонный период область нестационарных моделей постепенно уменьшается и смещается с запада на восток, составляя в октябре всего 36 % от всей площади. В целом же, в течение всего года нестационарные модели имеют место в восточной и юго-восточной частях территории и, как правило, в горных районах. Стационарные же модели в течение всего года наблюдаются во внутренних областях экваториальных лесов. Поэтому потепление на всей территории неоднородно и площадь, занятая нестационарными моделями, изменяется от $1/3$ в октябре до $2/3$ в июле и августе.

2.4.3 Районирование территории по типу климатических изменений

Поскольку модель ступенчатых изменений средних значений температуры оказалась эффективнее, чем модель тренда, необходимо установить годы ступенчатого роста температур и дать количественную оценку изменений средних значений. Как следует из данных табл.2.2, годы ступенчатых изменений могут изменяться в зависимости от месяца и по территории. В качестве примера на рис. 2.3 приведено пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) для многолетних рядов температур июля, как самого нестационарного месяца.

Из рис. 2.3 видно, что эти годы изменяются в широких пределах: от середины 1970-х до начала 2000-х. Вместе с тем они группируются по территории и позволяют выделить районы однородные по типу изменений климата. Если сопоставить эти районы с областями нестационарности на

рис.2.2, то для достаточно высоких коэффициентов r в горных южных территориях год перехода относится к началу 2000-х, аналогичные существенные изменения на севере вблизи Сахели относятся к середине - концу 1990-х. Незначительная нестационарность в центральных областях тропических лесов проявляется в конце 1970-х — начале 1980-х гг. Кроме того, установлено, что в одних случаях во многолетних рядах температур может быть один ступенчатый переход, а в других два.

В качестве дополнительных признаков районирования помимо $T_{ст}$ применялся также радиус корреляции, полученный на основе построенных пространственных корреляционных функций температур воздуха каждого месяца [6, 14].

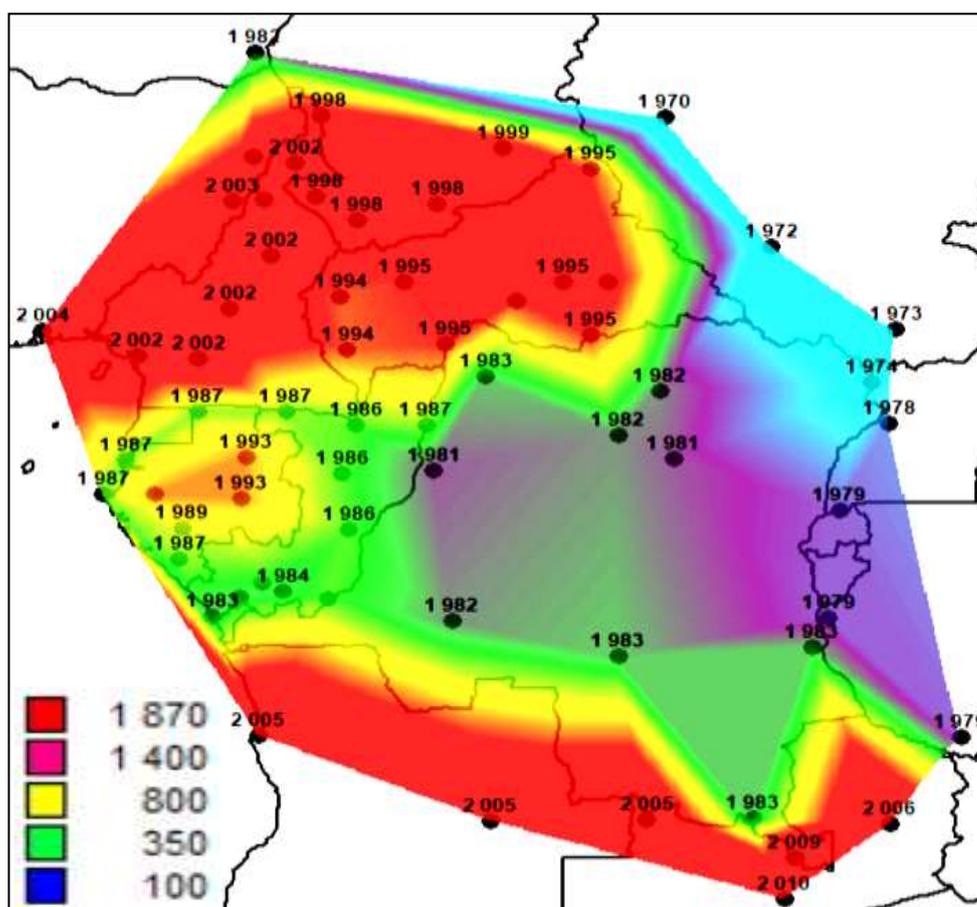


Рисунок 2.3. Пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим

В результате выделены 4 однородных района по динамике изменений среднего значения температуры воздуха, как показано на рис. 2.4. Так, в западном прибрежном районе №1 имеет место одно ступенчатое повышение средней температуры в 2002 г. и среднее изменение $\Delta_{\text{ср}}=0,7^{\circ}\text{C}$. В южном горном районе №2 имеют место два ступенчатых роста температуры в 1984 г. и в 2002 г. и каждый подъем температур составил примерно $0,5^{\circ}\text{C}$. В районе №3, охватывающем центральную и восточную части территории, также имеют место два прироста средних температур в 1977 г. и 1997 г. в сумме составившее $0,7^{\circ}\text{C}$. В северном районе №4 наблюдается только одно ступенчатое изменение среднего значения в 1996 г., составляющее $0,7^{\circ}\text{C}$.

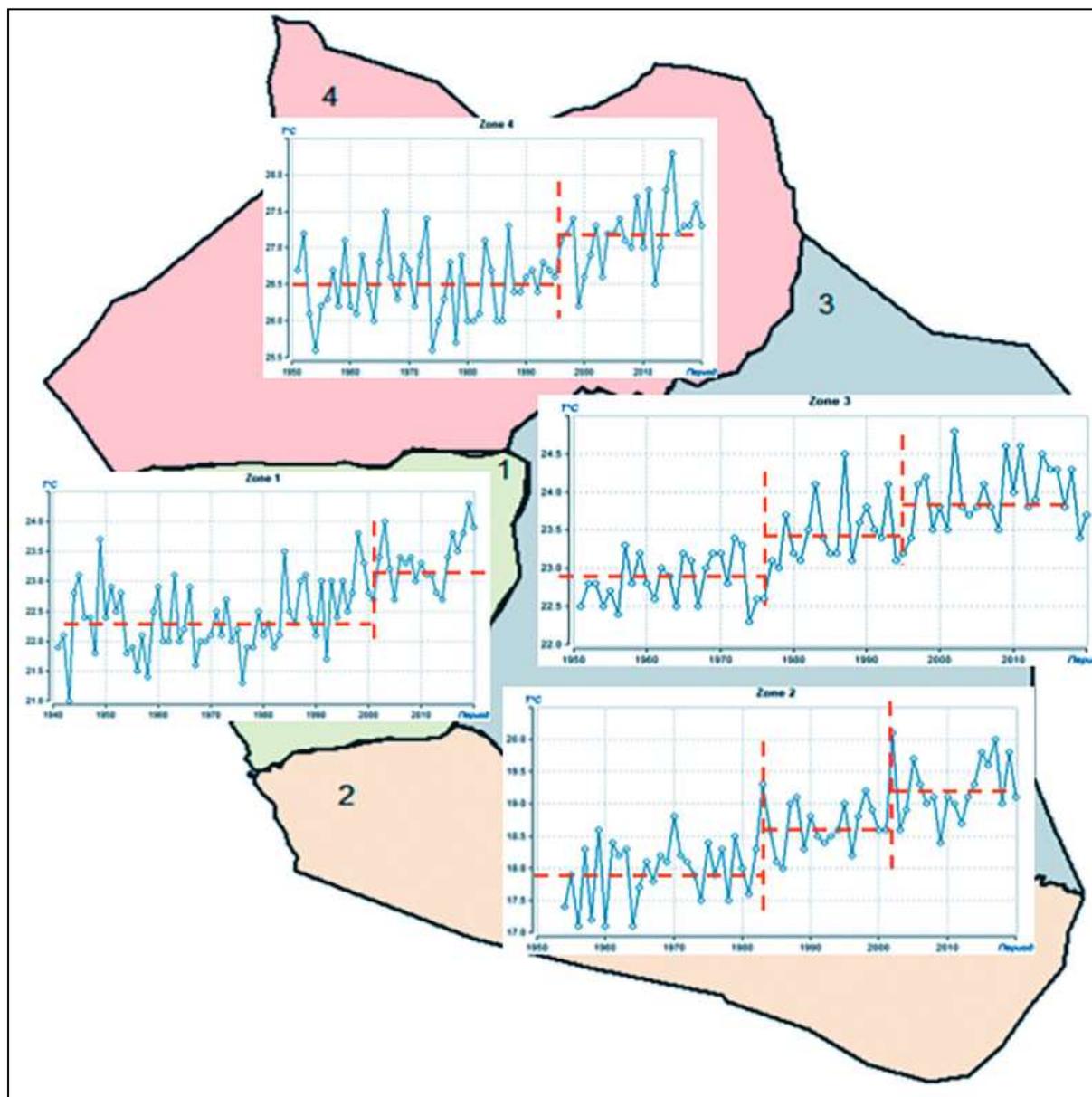


Рисунок 2.4. Изменения средних температур воздуха в однородных районах

После разработки классификации следует оценить ее эффективность, например, путем расчета и сравнения коэффициентов корреляции между средним рядом в каждом районе и рядами наблюдений во всех метеостанциях рассматриваемой территории [7]. В табл. 2.3 приведены средние значения коэффициентов парной корреляции R_{cp} для средних рядов каждого района с многолетними рядами внутри данного района и с многолетними рядами за его пределами. Прочерк в табл. 2.3 означает, что в данный конкретный месяц в этом районе преобладала модель стационарного среднего.

Как следует из данных табл.2.3, R_{cp} с рядами наблюдений на станциях внутри однородного района обычно больше 0,8, а с рядами за пределами района меньше 0,6—0,5. Так, в среднем за все месяцы в 1-ом районе $R_{cp} = 0,84$ с рядами внутри района и $R_{cp} = 0,40$ с рядами за его пределами.

Таблица 2.3.

Средние коэффициенты корреляции между средними рядами в районе и многолетними рядами на метеостанциях внутри и за пределами каждого района

Месяц	Номера районов							
	1		2		3		4	
	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами
1	-	-	-	-	-	-	0,82	0,36
2	-	-	-	-	-	-	0,83	0,42
3	-	-	-	-	-	-	0,81	0,39
4	-	-	-	-	0,79	0,43	0,83	0,45
5	-	-	0,92	0,4	0,8	0,47	0,86	0,36
6	0,9	0,41	0,87	0,5	0,82	0,39	-	-
7	0,89	0,43	0,9	0,44	0,76	0,44	0,77	0,52
8	0,81	0,44	0,86	0,51	0,85	0,4	-	-
9	-	-	0,83	0,6	0,85	0,44	0,9	0,4
10	-	-	0,8	0,47	-	-	0,79	0,38
11	-	-	0,87	0,41	0,88	0,45	0,83	0,4
12	-	-	-	-	-	-	0,84	0,39

2.4.4 Количественная оценка роста температур

Количественная оценка роста температур основывается на виде модели за каждый период до и после установленного года ступенчатых изменений $T_{ст}$. Если для каждой части временного ряда имеет место модель стационарного среднего, то количественная оценка роста температур определяется как разность средних двух частей временного ряда: $\Delta_{тср} = t_{ср2} - t_{ср1}$, где $t_{ср1}$, $t_{ср2}$ — средние температуры первой и второй частей ряда. Если же моделью каждой части временного ряда являются тренды, то для каждого тренда определяется разность расчетных температур в последний и первый год рассматриваемого отрезка временного ряда.

Для оценки стационарности каждой из двух частей временного ряда были рассчитаны коэффициенты корреляции r со временем, которые оказались в подавляющем большинстве случаев статистически незначимы. Поэтому как для средних рядов в однородных районах, так и для каждого ряда температур на метеостанциях были определены $\Delta_{тср}$. Для средних рядов в однородных районах было установлено, что $\Delta_{тср}$ изменяется на $0,7^{\circ}\text{C}$ зимой, на $1,2^{\circ}\text{C}$ весной, от $0,8$ до $1,0^{\circ}\text{C}$ летом и от $0,8$ до $1,2^{\circ}\text{C}$ осенью. Однако, существенны эти изменения или нет можно оценить только, если сравнить их с естественной климатической изменчивостью, которая количественно выражается средним квадратическим отклонением (СКО) всего многолетнего ряда. В том случае, если изменения среднего значения превышают СКО, можно считать, что они существенны. В соответствии с правилом трех сигм для нормального закона распределения, двухкратное превышение СКО соответствует достоверности принятия вывода о статистической значимости полученных изменений с вероятностью 95 %. Если полученные изменения средних значений в районах за разные сезоны года представить в долях СКО, то они будут равны $0,6$ зимой, $0,9$ — $1,1$ весной, $1,0$ — $1,3$ летом и $1,1$ — $1,4$ осенью. Таким образом, изменения средних многолетних температур летом и

осенью более существенны, чем весной и, тем более, зимой по отношению к их естественной климатической изменчивости.

Конечно, наибольший интерес представляют полученные пространственные изменения как самих $\Delta_{\text{ср}}$ на станциях, так и по отношению к СКО. Примеры таких пространственных изменений средних многолетних температур приведены на рис. 2.5. для температур средних месяцев всех сезонов года, а по отношению к СКО на рис. 2.6.

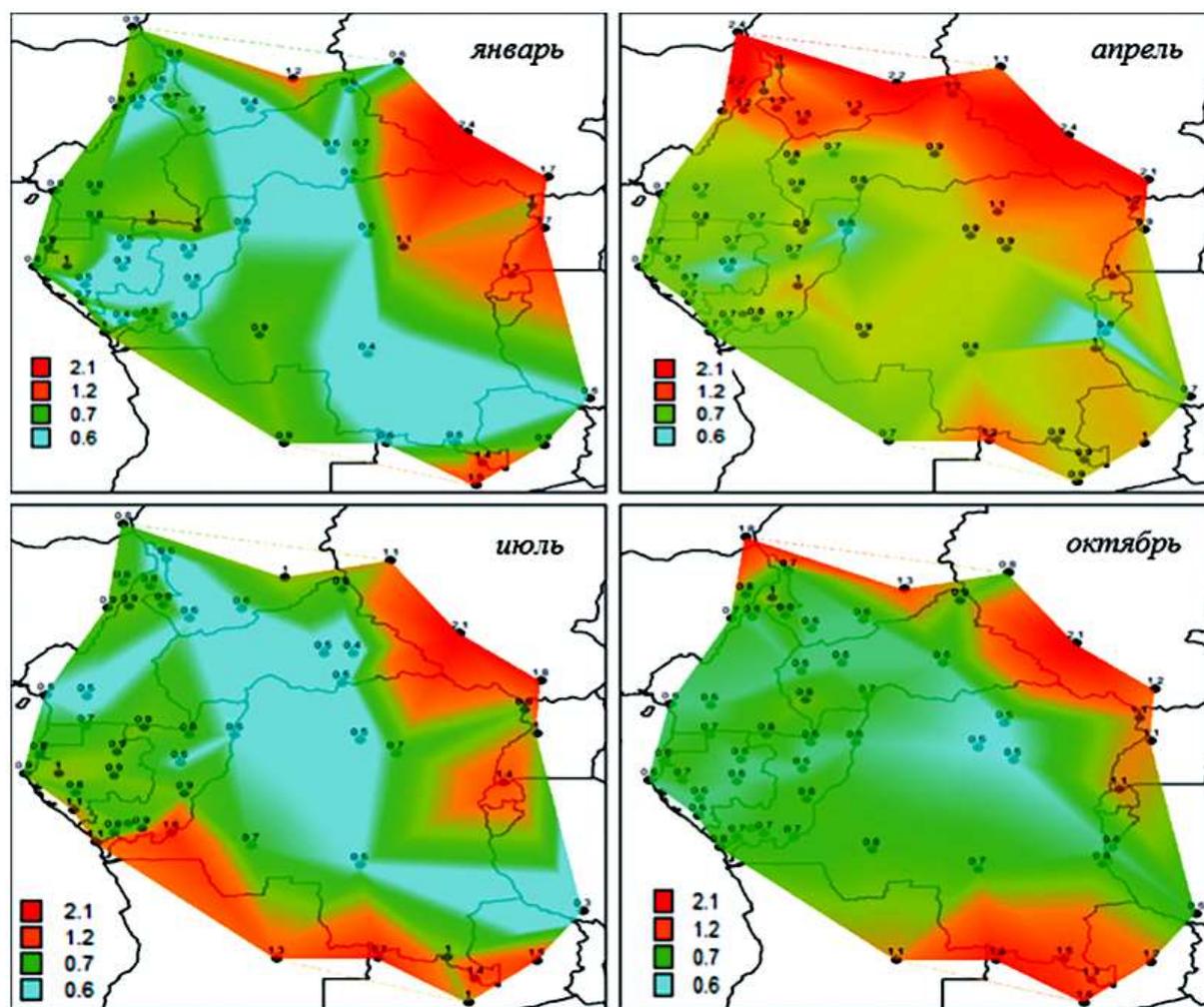


Рисунок 2.5. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года

Из пространственных распределений $\Delta_{\text{ср}}$ следует, что в период зимнего муссона (январь) наибольший прирост температур в 1—2 °С имелся на востоке рассматриваемой территории и на юге в горах, наименьшее увеличение

температур на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалось в центральной части, а на севере и в западной прибрежной областях увеличение температуры было $0,6\text{—}1,2^{\circ}\text{C}$. В межмуссонный весенний период (апрель) наибольший прирост средних многолетних температур до $2,2\text{—}2,4^{\circ}\text{C}$ наблюдался на севере и связан с ростом опустынивания и расширением Сахары и смещением Сахели на юг. На всей остальной территории прирост температур примерно одинаковый и составил от $0,6$ до $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ с несколько большими значениями до $1,2^{\circ}\text{C}$ в южной горной части.

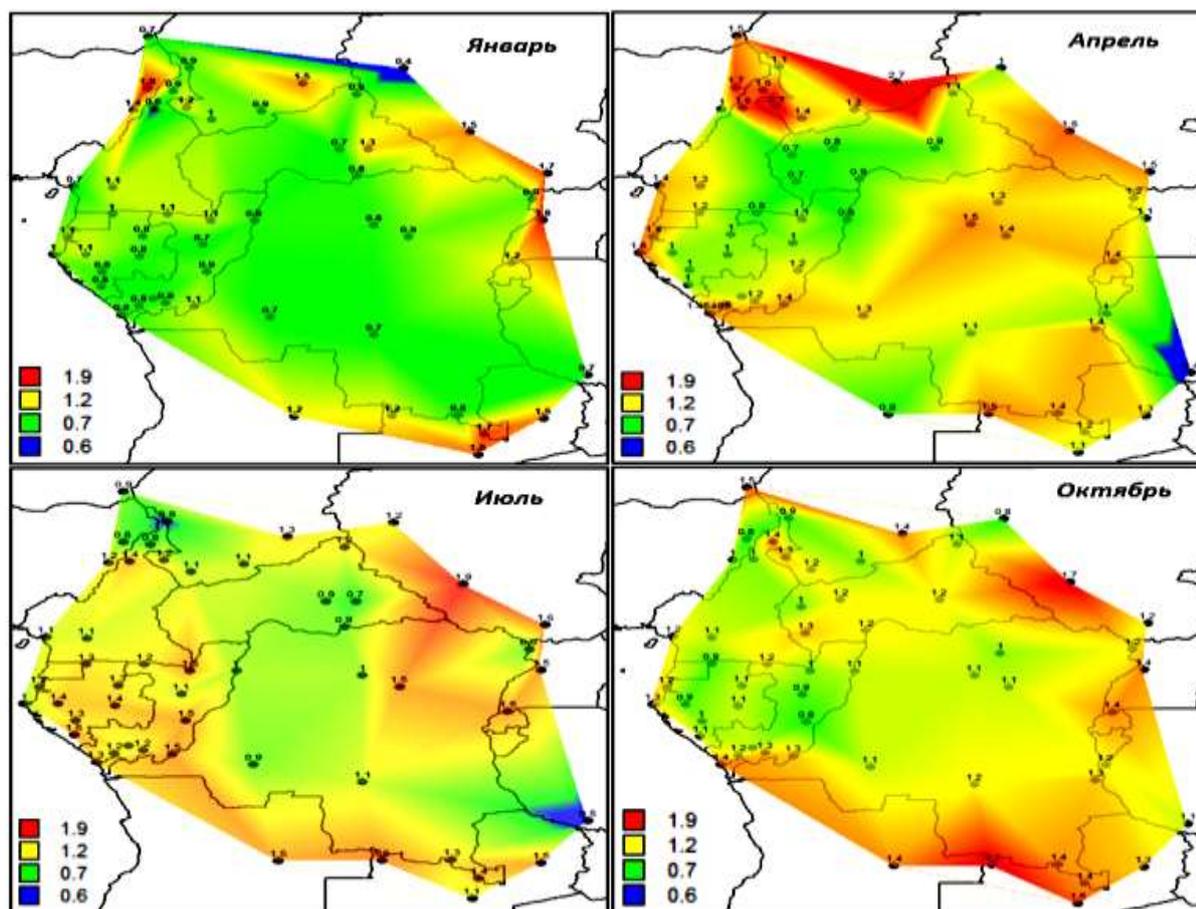


Рисунок 2.6. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года в долях СКО

В период летнего муссона (июль) наибольший рост температур до $1,8\text{—}2,2^{\circ}\text{C}$ наблюдается на востоке и еще одна полоса существенного роста температур до $1,0\text{—}1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеется в южной горной части и в западной прибрежной. В центральной же части тропических лесов прирост составил не

более 0,5—0,6 °С. В осенний межмуссонный период (октябрь) наибольшее повышение средней температуры наблюдалось от 1,1 до 2,1°С на северо-востоке и в южных горных районах. В центральной части повышение также было небольшое — до 0,5—0,6°С.

Таким образом, во все сезоны годы выделяются две части территории с высоким ростом температур (южные горные и восточные районы) и центральная область тропических лесов, где рост температуры практически всегда (за исключением весеннего жаркого сезона) небольшой. В летний муссон к области высокого прироста температур добавляется также прибрежная территория за счет воздушных масс с центральной Атлантики, где температура поверхности океана (ТПО) увеличивается. А в жаркий весенний межмуссонный период добавляется северная часть, где уже ощущается влияние движущейся с севера Сахары.

Если рассматривать Δ_{tcp} по отношению к СКО (рис. 2.6.), то наибольшее превышение СКО от 1,1 до 1,7—2,1 имеется в межмуссонные периоды (весной и осенью) и охватывает до 90 % территории с максимумами также на севере и в горной южной области. В январе в период зимнего муссона многолетняя изменчивость большая, и отношение $\Delta_{\text{tcp}}/\text{СКО}$ достигает максимум 1,7—1,8, причем для половины территории $\Delta_{\text{tcp}}/\text{СКО} < 1$, а в центральной области $< 0,5—0,6$. В июле, в период летнего муссона отношение $\Delta_{\text{tcp}}/\text{СКО}$ примерно одинаково для всей территории и в среднем составляет 1,2—1,3.

2.5 Выводы по 2-ой главе

Выполненное исследование климатических изменений температуры воздуха в Центральной Африке позволило восполнить пробелы и исключить неоднозначность результатов по оценке влияния современного потепления климата в этой части планеты. В частности, получены следующие выводы.

1. Данные наблюдений крайне неоднородны во времени и по пространству, и самые ненадежные наблюдения имеются на территории

Демократической Республики Конго, которая занимает почти половину Центральной Африки.

2. Разработана и применена методика оценки климатических изменений температур воздуха в Центральной Африке, основанная на последовательном переходе от более надежной к менее надежной информации, на оценке устойчивости показателей нестационарности, на выделении районов однородных по динамике изменений климата и на количественной оценке произошедших изменений в зависимости от вида модели изменения среднего значения.

3. Установлено, что изменения среднего значения происходили во второй половине XX века в период от середины 1970-х до начала 2000-х и модель ступенчатых изменений среднего значения более эффективна, чем модель тренда.

4. На территории Центральной Африки выделено 4 района однородных по динамике изменений среднего значения, причем в двух из них ступенчатый подъем температур происходил 2 раза: первый в конце 1970-х — начале 1980-х и второй в конце 1990-х — начале 2000-х, а в остальных двух 1 раз: в середине 1990х или в начале 2000х.

5. Во все сезоны года в южных горных и восточных районах территории был наибольший подъем температур до 2,0—2,2 °С, СКО, что составляет 1,7—2,1 СКО. В летний муссон к области высокого роста температур до 1,5—1,7 °С добавляется также прибрежная западная полоса за счет влажных и теплых воздушных масс с Атлантики, где ТПО растет. Еще одна область высокого роста температур на севере до 2,2—2,4 °С имела в наиболее жаркий весенний межмуссонный период и, видимо, связана с продвижением Сахары на юг. В центральной части территории, где тропические леса, прирост температуры практически во все сезоны (за исключением весеннего) небольшой и не превышает 0,5—0,6 °С, что меньше СКО.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКЕ

3.1 Введение

В предыдущей главе были смоделированы и количественно оценены изменения температуры воздуха в течение 20-го века. Эти изменения являются ответом на процесс радиационного форсинга. Чем больше форсинг, тем больше изменения. Гидрологический цикл сильно связан с изменениями атмосферной температуры и радиационным балансом. Изменения в количестве осадков очень неоднородны на пространственном масштабе и от одного десятилетия к другому, а также в зависимости от широты.

Динамика осадков в Центральной Африке, в отличие от субтропиков и вне тропических областей, все еще слабо изучена в свете современных изменений климата [76, 66, 103, 70]. Немногочисленные существующие исследования показывают, что на межгодовом временном интервале имеет место не такое существенное изменение осадков как в других регионах планеты с аналогичным их количеством. Исследование пространственных закономерностей осадков также немногочисленны и показывают их низкую пространственную согласованность [132]. В целом результаты исследований показывают низкую чувствительность тропического климата к глобальным климатическим изменениям в связи с низкими внутригодовыми и межгодовыми колебаниями температуры поверхности океана в его экваториальном секторе.

Однако проблема количественной оценки изменения осадков вблизи экватора остается и особенно важна в связи с наличием как влажных, так и сухих сезонов внутри года, что обуславливает политику внутри годового перераспределения влагозапасов для нужд сельского хозяйства и других отраслей экономики.

Среднее количество осадков в этой части Центральной Африки, расположенной по обе стороны экватора и ограниченной Атлантическим океаном на западе, составляет от 1500 до 1800 мм в центре региона и на

экваторе, от 300 до 1500 мм на юге Демократической Республики Конго, где имеет место повышение рельефа и менее 300 мм на севере Чада [132]. Воздействие современного изменения климата на осадки связано как с температурным режимом, так и с переносом влаги с Атлантического океана, и с динамикой внутритропической зоны конвергенции, что приводит к увеличению сезонной и межгодовой изменчивости, засухам в некоторых районах и увеличением частоты сильных осадков [74].

Вместе с тем, отсутствие надежных данных наблюдений приводит к высокой неопределенности в оценке наблюдаемых тенденций осадков и низкой уверенности в изменениях экстремальных осадков [41, 57, 112]. Некоторые исследования указывают на засуху, длящуюся с середины двадцатого века, связанную с уменьшением среднего количества осадков и увеличением их дефицита [57], а также на увеличение метеорологических, сельскохозяйственных и экологических засух [118]. В то же время в [91] было показано, что в период 1983-2010 гг. наблюдается пространственная неоднородность в тенденциях годового количества осадков, варьирующая от -10 мм до +39 мм в год с уменьшением среднего сезонного количества осадков с апреля по июнь на -69 мм в год в большинстве районов Центральной Африки, за исключением северо-западной части [64, 65, 104, 138]. Южная и восточная части Центральной Африки были определены как "горячие точки" засухи в период с 1991 по 2010 годы [123].

Поэтому целью настоящей главы является климатическое районирование осадков по типу их внутригодового распределения на территории Центральной Африки и количественная оценка их многолетних изменений во влажные и сухие сезоны года.

3.2 Исходные данные и оценка их качества

Данные, используемые для настоящей оценки, представляют собой многолетние ряды сумм осадков каждого месяца с начала наблюдений по 2022 год включительно на 57 метеостанциях в пределах и за пределами вблизи

границ региона, полученные из архивов сайтов Метеорологического института Королевства Нидерландов и "Погода и климат" [138, 139]. Распределение метеостанций по продолжительности наблюдений показано на рис. 1.3.

Статистические критерии Диксона и Смирнова-Граббса применялись для формализованной оценки однородности экстремальных значений эмпирических распределений, а статистические критерии Фишера и Стьюдента - для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух одинаковых частей временного ряда [3, 17, 15]. В результате статистически значимые неоднородные экстремумы, полученные на 5% уровне значимости, были исключены из ряда наблюдений.

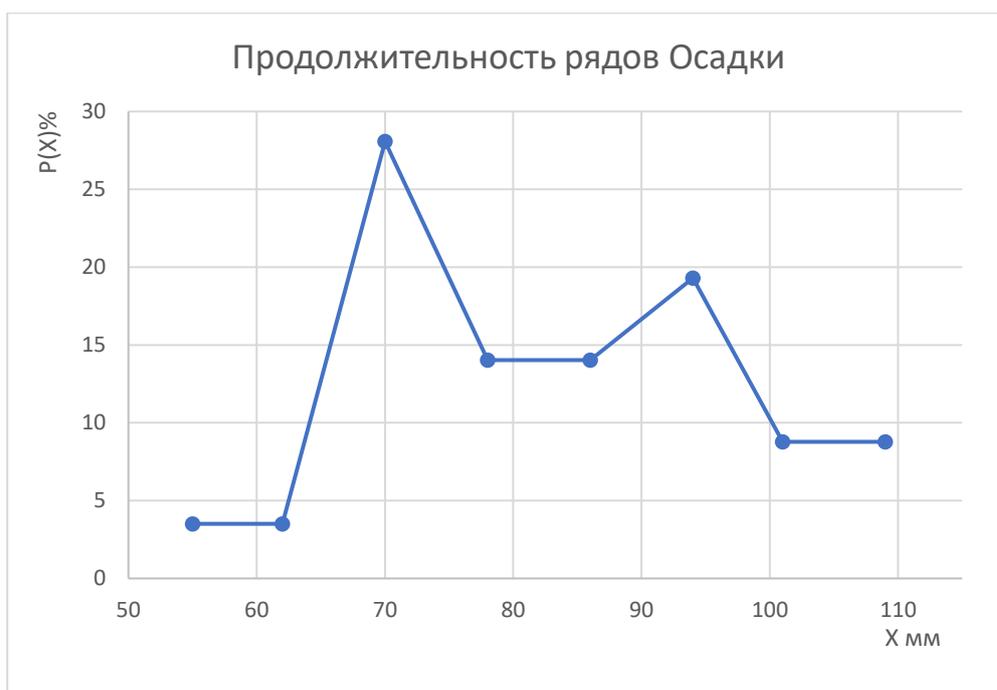


Рисунок 3.1. Распределение станций по продолжительности рядов наблюдений осадков

Из графика, приведённого на рис. 3.1, следует, что модальное значение равно 70 лет, а медиана равна 71 лет, что свидетельствует об асимметричности эмпирического распределения.

Для того чтобы результаты моделирования временных рядов были достаточно надежными и обобщаемыми по территории, недостающие наблюдения были восстановлены по методике, основанной на регрессионных уравнениях связи между рассматриваемым рядом и рядами в ближайших пунктах наблюдения [1, 8, 13, 16]. Для этого минимальный совместный период наблюдений был задан в 10 лет, минимальное количество аналогов в уравнении — 3, минимальное значение коэффициента корреляции — 0,8, среднее отношение коэффициента уравнения регрессии к его средней квадратической ошибке — 2,0, что соответствует 95% доверительному интервалу. Полученные результаты представлены в табл. 3.1, где в колонке 2 указано количество станций, по которым были восстановлены недостающие данные из общего числа станций 57; в колонке 3 в числителе и знаменателе — средние значения количества лет до и после восстановления соответственно.

Таблица 3.1.

Оценка восстановления пропущенных наблюдений на метеостанциях Центральной Африки с начала наблюдений до 2022 года

Месяцы	Кол-во станций, в которых восстановлены данные	Среднее кол-во лет до восстановления	Среднее кол-во лет после восстановления
1	13	72	79
2	24	80	91
3	17	72	80
4	10	87	93
5	13	73	84
6	15	75	86
7	9	84	90
8	11	75	86
9	8	65	77
10	19	74	82
11	17	79	88
12	22	81	91

Как видно из табл. 3.1, среднее число лет восстановленных наблюдений изменяется от 6 лет в апреле и июле до 12 лет в сентябре, что можно объяснить

низкой корреляцией между осадками по территории. Поэтому, чтобы рассматривать ряды практически одинаковой длины, был выбран период 1950— 2022 гг.

Для этого периода была проведена оценка стационарности дисперсий и средних за две половины ряда, результаты которой представлены в табл. 3.2. В связи с очень большими значениями дисперсий временных рядов для засушливого периода рассматривался только критерий Стьюдента.

Таблица 3.2.

Результаты оценки стационарности временных рядов осадков по критериям Фишера и Стьюдента за период 1950-2022 гг. в Центральной Африке

Район	Влажный период		Сухой период
	Стационарные ряды в %		Стационарные ряды в %
	Критерий Фишера	Критерий Стьюдента	Критерий Стьюдента
1	84,1%	82,3%	87,8%
2	83,4%	83,4%	86,2%
3	83,3%	81,8%	-
4	82,2%	77,8%	84,4%
Среднее значение	83,3%	81,3%	86,2%

Результаты, приведенные в табл. 3.2, показывают, что дисперсия и средние значения обеих частей временного ряда статистически стационарны более чем в 80% рядов.

3.3 Методика оценки

В данной оценке использован метод, основанный на климатической классификации внутригодовых распределений осадков и на оценке эффективности проведенной классификации на основе рассчитанных коэффициентов парной корреляции между средними для выделенных однородных районов внутригодовыми распределениями осадков и внутригодовыми климатическими распределениями осадков на каждой станции всей территории Центральной Африки.

Методика оценки многолетних изменений осадков разная для влажного и сухого сезонов года. Так, для влажного сезона проводится аппроксимация многолетних временных рядов месячных сумм осадков моделями нестационарного среднего: моделью линейного тренда и моделью ступенчатого изменения среднего значения с оценкой их эффективности и статистической значимости по сравнению с моделью стационарной выборки, как показано в главе 2.

Для сухого сезона многолетние ряды осадков конкретного месяца содержат достаточно много лет с отсутствием осадков и поэтому для оценки их изменений применялся другой подход, основанный на средних значениях осадков для двух половин временного ряда. Разности средних осадков двух частей ряда рассчитывались как в мм ($\Delta = \bar{X}_2 - \bar{X}_1$), так и в % по отношению к средним осадкам первой половины ряда: $(\Delta/\bar{X}_1) \cdot 100\%$. Однако, оценить, являются ли эти разности значительными, можно только путем сравнения их с естественной изменчивостью осадков, которая количественно характеризуется их стандартным отклонением (СКО) для всего ряда. Если изменения среднего значения превышают стандартное отклонение, их можно считать существенными.

3.4 Климатическая классификация внутригодовых распределений осадков

Пространственные распределения осадков каждого месяца года на территории Центральной Африки показаны на рис. 3.2. Анализ пространственных распределений многолетних месячных средних значений осадков в течение года позволяет сделать следующие выводы. Наименьшее количество осадков, которое характеризует месяцы сухого сезона года и составляет менее 100 мм в месяц, наблюдается с ноября по март и осадки в среднем по территории изменяются от 13,8 мм в январе до 79,2 мм в ноябре. Этот период года характеризуется африканским зимним муссоном, когда

холодный, сухой воздух из Северной Африки движется на юг вслед за смещения внутритропической зоны конвергенции (ВЗК).

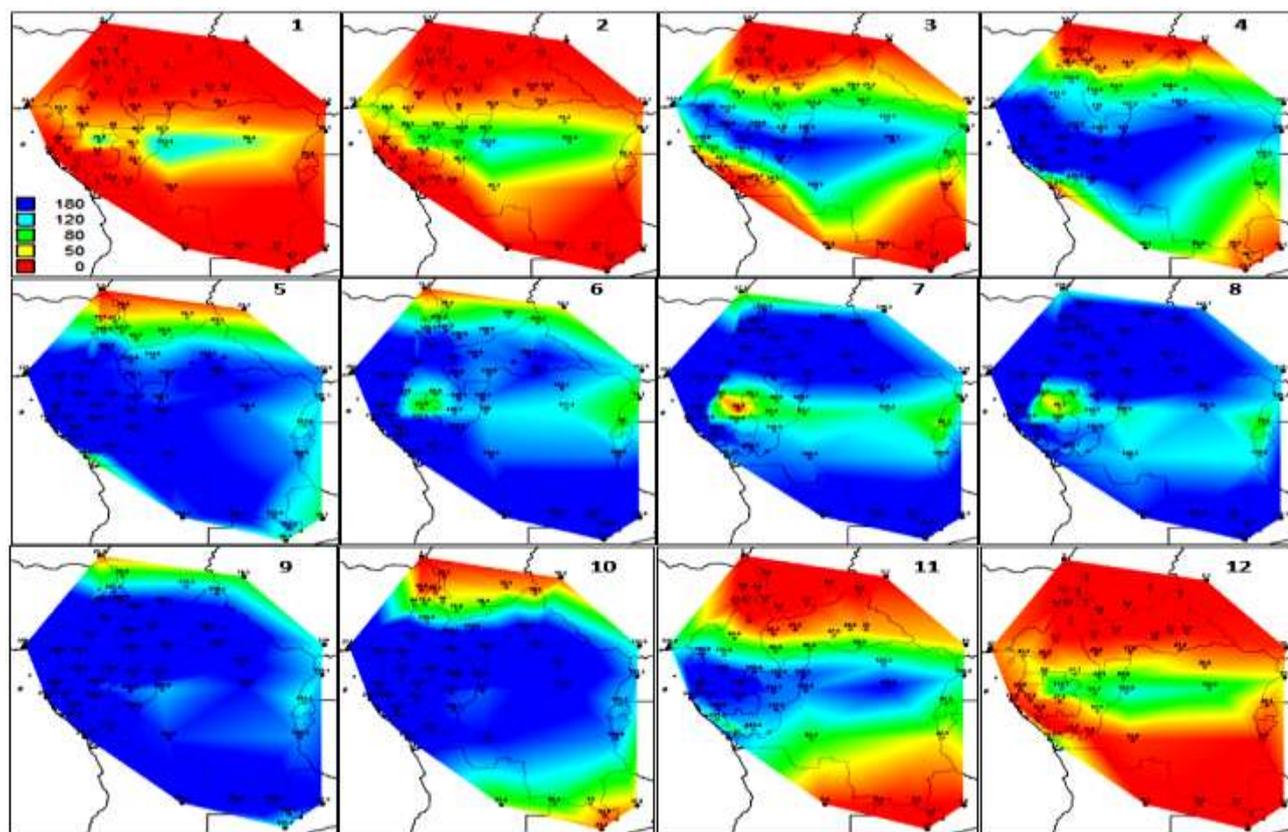


Рисунок 3.2. Пространственные распределения средних многолетних значений осадков каждого месяца года в Центральной Африке с начала наблюдений по 2021 г.

За исключением экваториальной влажной области, где в этот период уменьшение осадков незначительно, на севере и юге рассматриваемой территории имеет место сухой сезон с существенным уменьшением осадков. Начиная с апреля и далее, в период африканского летнего муссона, наблюдается увеличение количества осадков, достигающее самых высоких средних территориальных значений в июле (178 мм), августе (192 мм) и в сентябре (196 мм). Это увеличение является результатом движения влажного воздуха из Атлантики в сторону более теплого и сухого континента вслед за перемещением ВЗК на север. Поэтому внутригодовые распределения осадков в разных частях Центральной Африки не одинаковы и следует установить районы, однородные по типу этих распределений.

Результаты многих исследований позволяют сделать вывод о том, что не удастся выявить высокой согласованности внутригодовой изменчивости, общей для всего Центральноафриканского региона [92]. Кроме того, хотя эти исследования, основанные на анализе главных компонент, позволяют выявить основные области ковариации, но они не позволяют провести количественное сравнение пространственной согласованности осадков между различными регионами континента [33]. Поэтому в качестве альтернативы здесь рассматриваются корреляции между межгодовыми колебаниями осадков на разных станциях. Как установлено в предыдущих исследованиях, из-за низкой парной корреляции многолетних рядов осадков, можно рассматривать только связанность их средних многолетних внутригодовых распределений [11].

В результате средние многолетние внутригодовые распределения осадков в соответствии с началом и окончанием влажного и сухого периодов были объединены в 4 однородные района, как показано на рис. 3.3. Из рис. 3.3. следует, что для первого района влажный период включает месяцы с мая по октябрь со средними значениями от 117,8 мм в мае до 121,6 мм в октябре, достигая максимума 252,7 мм в августе. Для второго однородного района влажный период длится с апреля (175,5 мм) по ноябрь (124,3 мм) с двумя максимумами (229,5 мм в мае и 208,1 мм в октябре). В третьем экваториальном районе наблюдаются два влажных периода: с марта (175,4 мм) по июнь (109 мм) с максимумом (193,3 мм) в апреле и с сентября (173,4 мм) по ноябрь (174,3 мм) с максимумом 223,8 мм в октябре. В четвертом южном районе влажный период длится с мая (131,3 мм) по сентябрь (176,3 мм) с максимумом в июне и июле (227,8 мм и 220,5 мм) соответственно.

Оценка эффективности выполненного районирования осуществлена на основе расчета коэффициентов парной корреляции между средним внутригодовым распределением осадков в каждом районе и внутригодовыми распределениями осадков на станциях. Если районирование выполнено эффективно, то следует ожидать, что коэффициенты корреляции между

средним внутригодовым распределением осадков будут высокими со станциями внутри района и низкими со станциями за его пределами.

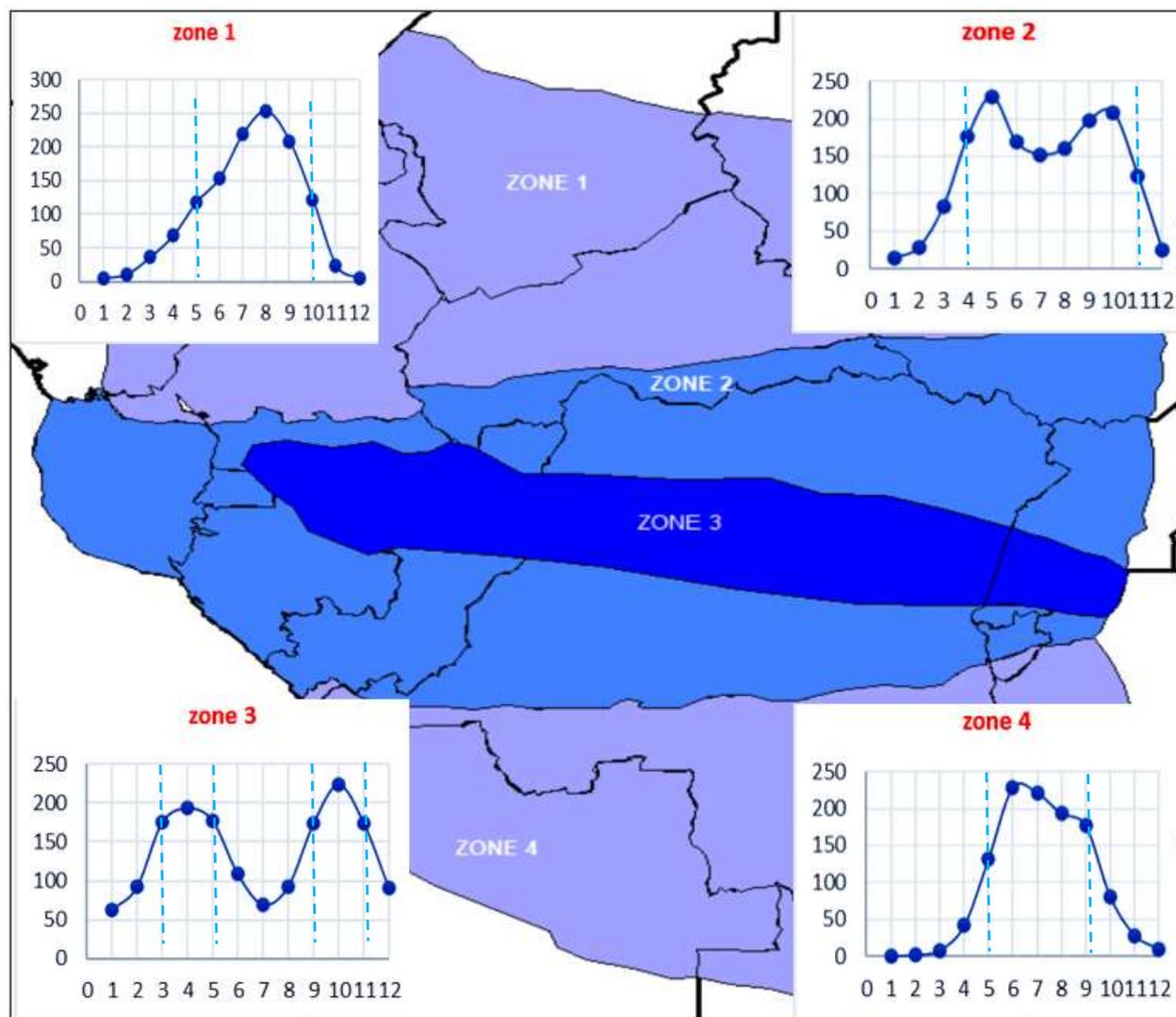


Рисунок 3.3. Внутригодовые климатические распределения осадков в выделенных однородных районах на территории Центральной Африки [из обработки данных]

На рис. 3.4 показан пример коэффициентов корреляции между средним внутригодовым распределением осадков в районе 1 на севере территории и внутригодовыми климатическими распределениями осадков на каждой из 57 метеостанций рассматриваемой территории. Как видно из рис. 3.4, для первых по порядку 20 метеостанций, находящихся внутри района 1, имеют место высокие коэффициенты парной корреляции ($R=0,9 - 1,0$) а для остальных станций они существенно ниже.

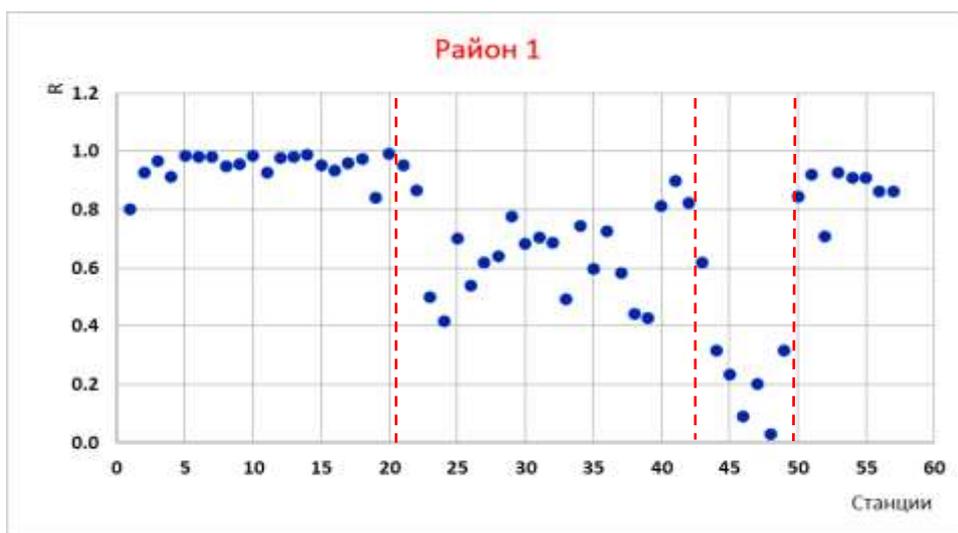


Рисунок 3.4. Коэффициенты корреляции между территориальным средним внутригодовым распределением в районе 1 и внутригодовыми распределениями на всех остальных метеостанциях

Левая вертикальная линия на рис. 3.4. разделяет метеостанции, находящиеся в первом северном районе и в остальных, вторая вертикальная линия выделяет справа метеостанции, находящиеся в четвертом южном районе, в котором внутригодовое распределение похоже на распределение в районе 1 (рис. 3.3.), что приводит к росту коэффициентов парной корреляции ($R=0,8 - 0,9$) со станциями в южном районе. Однако, хотя эти внутригодовые распределения в двух районах и одновершинные (рис. 3.3.), но максимум осадков в них приходится на разные месяцы.

3.5 Оценка климатических изменений в рядах осадков влажного периода

Для оценки типа изменения в многолетних рядах осадков влажного периода года, вызванного современным изменением климата, рассматривались две модели нестационарного среднего: линейного тренда и ступенчатых изменений. Этими моделями была осуществлена аппроксимация временных рядов осадков каждого месяца в каждом из четырех выделенных

однородных районов и средние показатели эффективности нестационарных моделей приведены в табл.3, где $\Delta_{Тр}$ и $\Delta_{Ст}$ — относительные разности (в %) стандартов остатков стационарной и соответствующей модели нестационарного среднего (тренда и ступенчатых изменений), R — коэффициент корреляции осадков со временем.

Таблица 3.3

Средние показатели эффективности моделей нестационарного среднего для однородных районов осадков влажного периода

№ месяца	$\Delta_{Тр}$	$\Delta_{Ст}$	R									
	район 1			район 2			район 3			район 4		
4				1,9	3,9	-0,11	3,0	5,4	-0,21			
5	1,8	3,9	-0,08	1,9	4,3	-0,11	4,4	6,8	-0,25	3,3	4,8	-0,08
6	3,1	6,7	-0,07	1,5	3,6	-0,03	2,1	5,5	-0,10	1,6	3,1	-0,07
7	1,9	4,5	-0,05	1,7	4,5	-0,06				1,1	3,5	-0,03
8	1,9	5,4	-0,11	2,4	4,7	-0,07				1,0	2,9	-0,07
9	3,3	7,2	-0,12	2,2	4,5	-0,12	5,2	7,5	-0,19	2,0	4,1	-0,02
10	1,5	4,0	0,00	2,5	4,4	-0,15	3,9	6,1	-0,25			
11				1,6	3,6	-0,11	1,9	5,0	-0,12			

Анализ табл. 3.3 показывает, что во всех районах показатели нестационарности в среднем изменяются от $\Delta_{Тр}=1,0\%$ в октябре до $\Delta_{Тр}=4,4\%$ в сентябре для модели линейного тренда и от $\Delta_{Ст}=2,9\%$ в мае до $\Delta_{Ст}=6,8\%$ в сентябре для модели ступенчатого изменения. Поэтому модели нестационарного среднего не эффективны ($\Delta_{Тр}$ и $\Delta_{Ст} < 10\%$), и статистически не отличаются от модели стационарного среднего. Коэффициенты корреляции со временем R также статистически незначимы при продолжительности ряда 72 года (1950-2021 гг.) и при уровне значимости $\alpha=1\%$. Вместе с тем, коэффициенты корреляции со временем являются отрицательными и отражают общую тенденцию уменьшения осадков, хотя это уменьшение и не является статистически значимым.

На рис. 3.5. представлены пространственные распределения коэффициентов корреляции R среднемесячных осадков со временем, полученные для каждой метеостанции и для месяцев влажного сезона, общих

для всех четырех однородных климатических районов. Статистически значимыми при $\alpha=5\%$ являются коэффициенты корреляции при $R>|0,23|$.

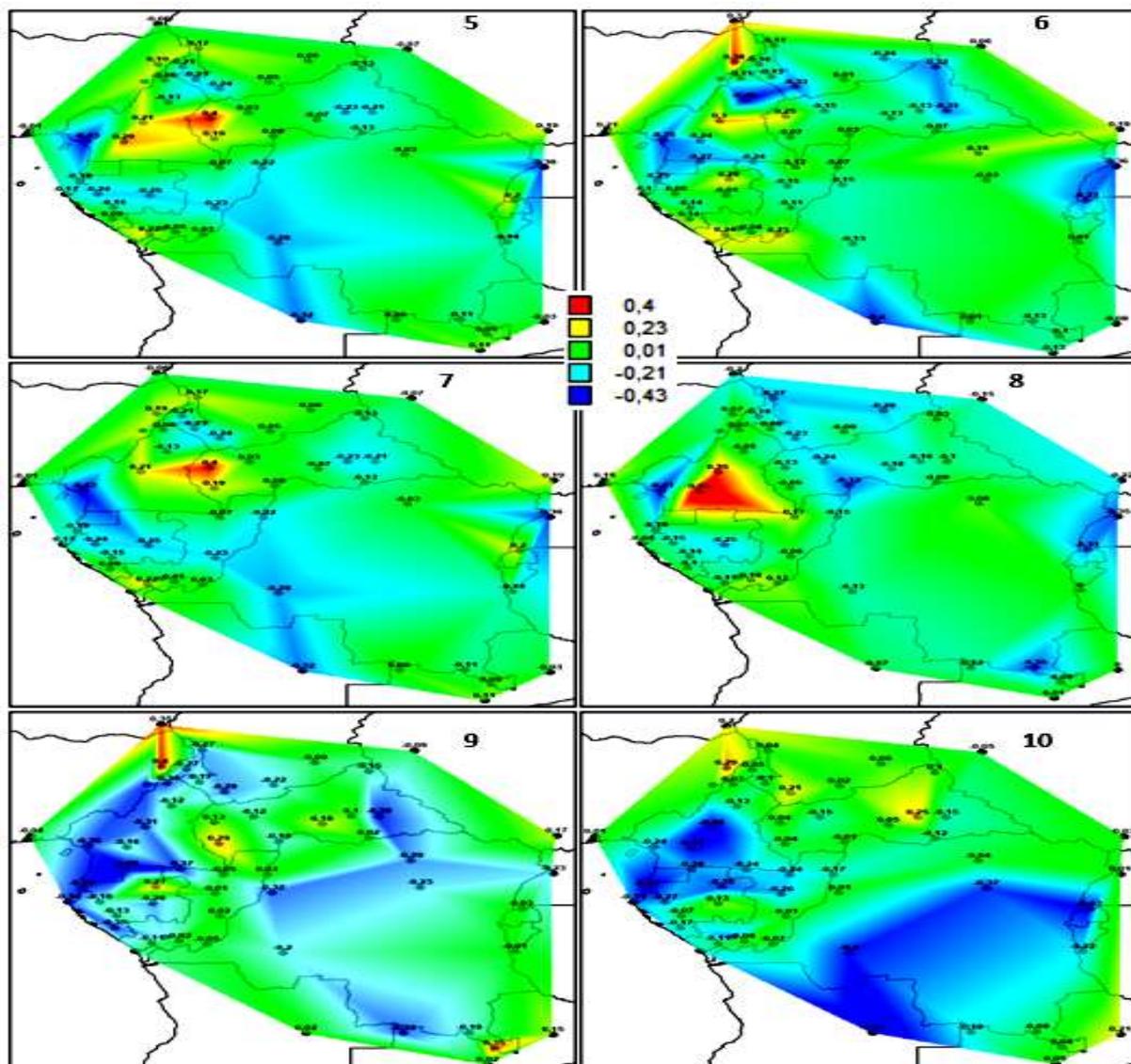


Рисунок 3.5. Пространственные распределения коэффициентов корреляции осадков со временем модели линейного тренда для месяцев влажного сезона года на территории Центральной Африки.

Общие закономерности из анализа пространственных распределений R на рис. 3.5. за разные месяцы состоят в том, что помимо больших территорий статистически незначимых R имеют место области статистически значимых отрицательных R и даже отдельные локальные образования статистически значимых положительных R . Так, области со статистически значимыми отрицательными R в период с мая по август наблюдаются на западе около

Гвинейского залива и на юге, где R достигает $-0,46$ в июне. В отдельных, как правило горных, локальных образованиях на востоке в рифтовой зоне и на северо-западе в центральной части Камеруна R принимает положительные значения: $R=0,56$ (август, Центральноафриканская Республика) и $R=0,38$ (июнь, север Камеруна). В сентябре и октябре, когда летняя фаза муссона заканчивается, области статистически значимых отрицательных R расширяются на западе и юге территории, а сами значения достигают $R=-0,49$ в сентябре и $R=-0,56$ в октябре.

Физическая интерпретация полученных результатов об уменьшении и увеличении осадков может быть следующая. Потепление климата и повышение температуры поверхности центральной части Атлантики и Гвинейского залива [80, 85] приводит к росту испарения и увеличению потока влаги, что должно привести и к росту осадков. Однако, в соответствии с законом Клапейрона – Клаузиуса, более теплый воздух может содержать большее количество водяного пара и поэтому, находящаяся в атмосфере влага не выпадает в виде осадков. Вместе с тем в горных районах начиная с определенной высоты местности эта влага может конденсироваться, что и вызывает увеличение осадков. Поэтому во влажный сезон и наблюдается некоторое уменьшение осадков на равнинной территории и их увеличение на отдельных метеостанциях в горах.

Для количественной оценки величины изменения осадков ряды были разделены пополам и вычислены разности (в мм и в % по отношению к среднему первой половины ряда) между средними значениями осадков второй и первой частей временного ряда: $(\Delta = \bar{X}_2 - \bar{X}_1)$, где \bar{X}_1 и \bar{X}_2 — средние первой и второй частей ряда. Также были рассчитаны отношения Δ к естественной изменчивости (СКО). Стационарность средних значений была оценена по критерию Стьюдента и получено, что при $\alpha=5\%$ гипотеза о стационарности не отклоняется для 87,8% случаев из всех рядов наблюдений. В качестве примера на рис. 3.б. приведено пространственное распределение Δ в мм для осадков августа.

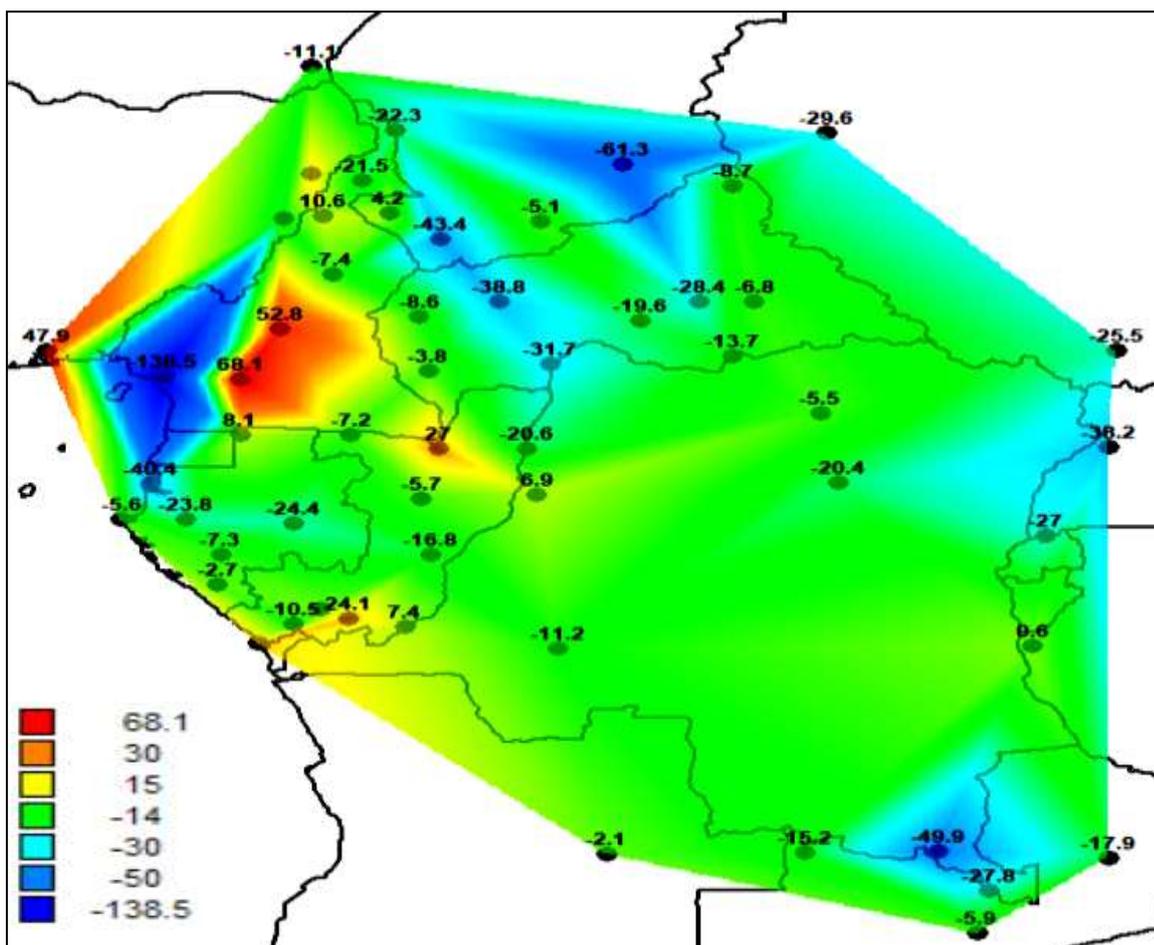


Рисунок 3.6. Пространственное распределение Δ в мм для осадков августа

Из пространственного распределения Δ следует, что области, характеризующиеся уменьшением осадков ($|\Delta| > 15$ мм), расположены на западе, севере и востоке территории, где Δ изменяется от -25,5 мм на востоке до -138,5 мм на западе у Гвинейского залива. Кроме того, локальные области увеличения также расположены на западе, достигая 68 мм в южном Камеруне.

На рис. 3.7 представлено пространственное распределение Δ по отношению к СКО также для осадков августа. Из рассмотрения рис. 3.7. следует, что наибольшие значения $\Delta/\text{СКО}$ в случае уменьшения осадков имеют место на западе, севере и востоке (до 0,8 СКО), а в случае увеличения осадков в горах достигают 0,8 — 1,1 СКО (юг Камеруна). В общем же, как и следует из оценки по статистическим критериям, изменения осадков пока не

является статистически значимым и практически во всех случаях не превышает естественной климатической изменчивости.

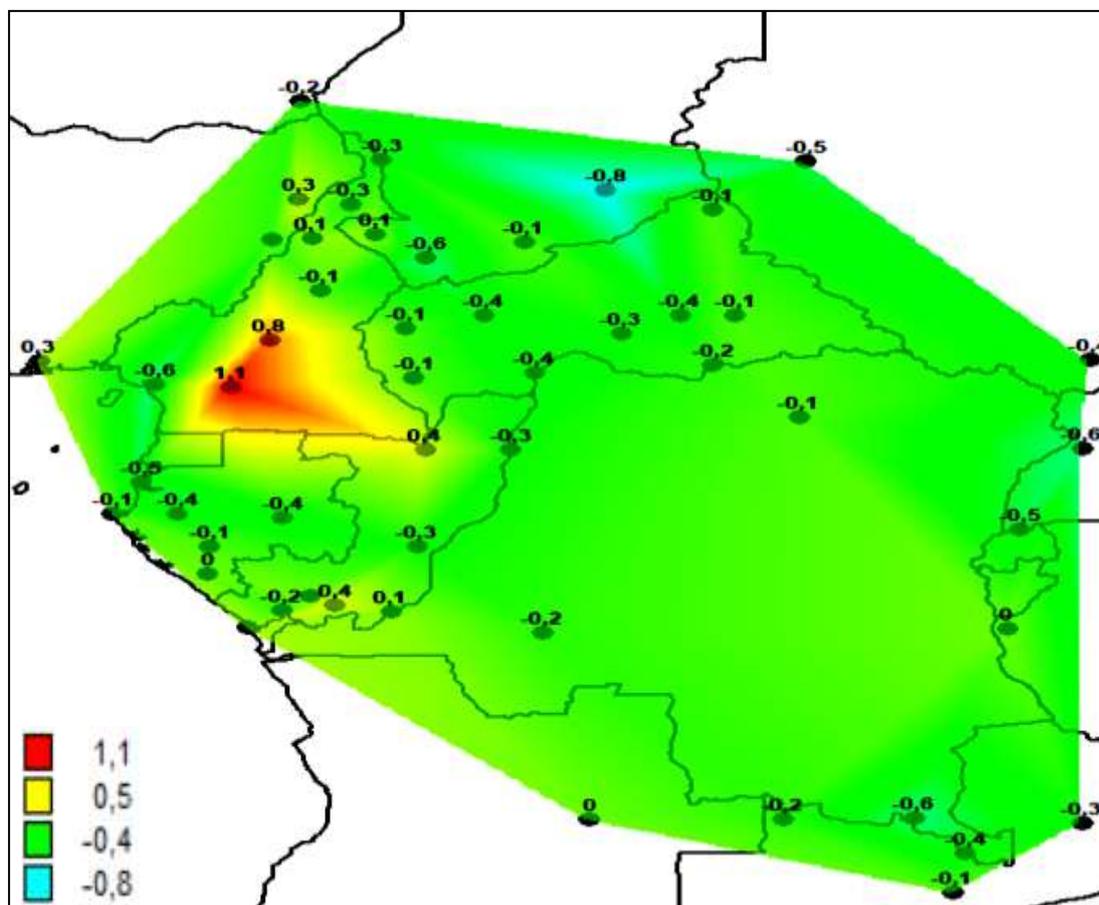


Рисунок 3.7. Пространственное распределение Δ в долях СКО для осадков августа

3.6 Оценка климатических изменений в рядах осадков сухого периода

Месяцами сухого периода года, характерными практически для всех однородных климатических районов, являются декабрь, январь и февраль. В эти месяцы среднемесячное количество осадков не достигает 30 мм. Из-за особенностей многолетних временных рядов, связанных с большим числом нулевых значений осадков, аппроксимация моделями нестационарного среднего невозможна. Поэтому для таких временных рядов рассчитывались только Δ в мм и в % полученные по разности средних значений двух половин

ряда. Пространственные распределения Δ и отношений $\Delta/\text{СКО}$ для всех трех зимних месяцев сухого сезона приведены на рисунке 3.8.

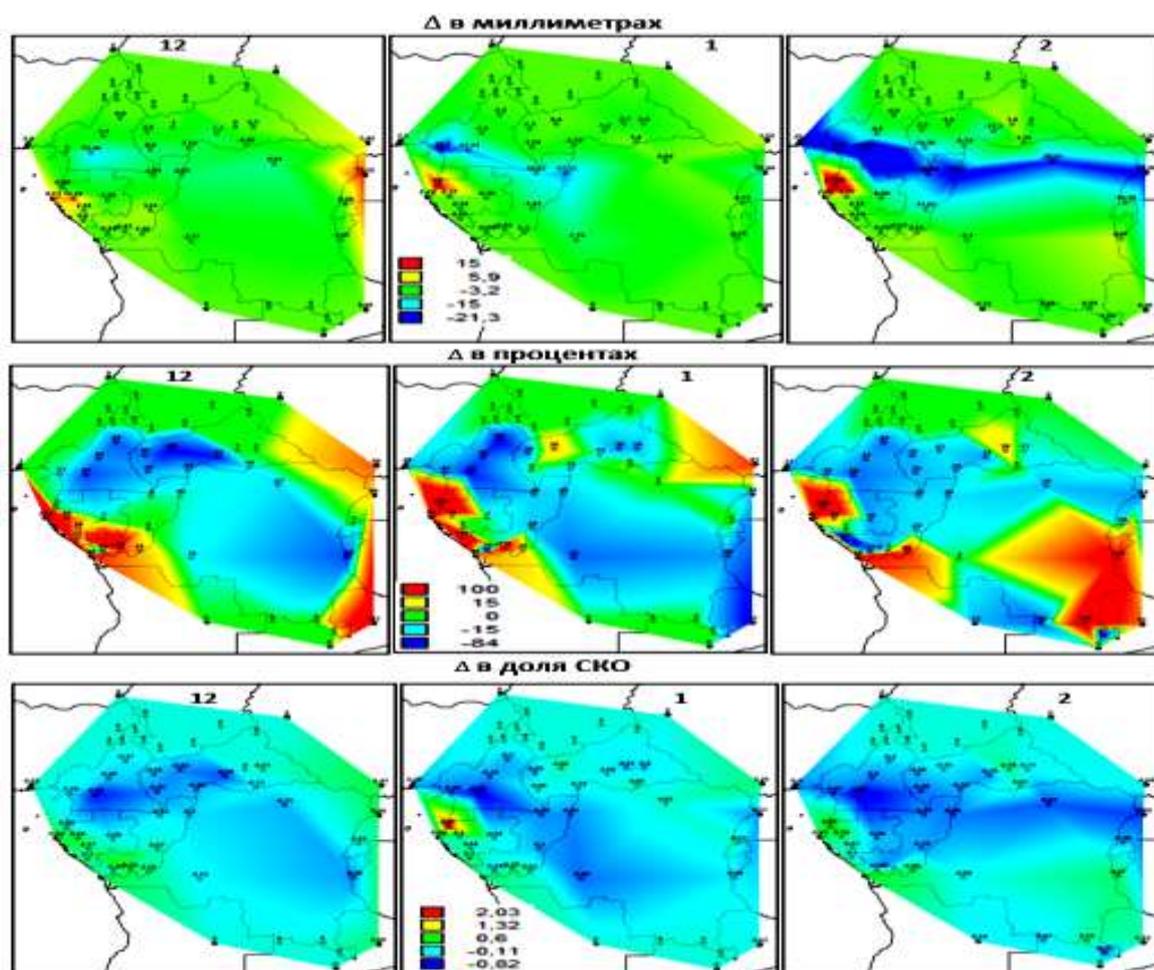


Рисунок 3.8. Пространственные распределения Δ (в мм, % и в долях СКО) для осадков декабря, января и февраля (на рис. номера месяцев 12, 1, 2)

Анализ пространственных распределений на рис. 3.8. показывает, что в сухой сезон также имеет место уменьшение осадков, но оно не превышает СКО. Наибольшие значения Δ , достигающие $-31,6$ мм, представлены полосой вдоль экватора, которая относится к однородному району 3 с большим количеством осадков практически в течение всего года и с двумя внутригодовыми максимумами осадков. Вместе с тем имеет место и увеличение осадков вблизи Гвинейского залива, достигающее 15 мм, а также на востоке территории. Относительные Δ в % могут достигать 80 — 100% из-за большой естественной изменчивости осадков в месяцы сухого сезона. В долях СКО эти изменения в основном меньше 1 и только на западе близ Гвинейского залива $\Delta/\text{СКО} > 1$ и даже $2 \times \text{СКО}$ в январе.

3.7 Выводы по 3-ей главой

В результате выполненного исследования по оценке проявления влияния современного изменения климата на осадки Центральной Африки получены следующие основные выводы.

1. Внутригодовые распределения осадков по территории не одинаковы, в них выделяются влажные и сухие периоды и по типу внутригодовых распределений было выделено 4 однородных района:

- северный с одномодальным распределением и максимумом осадков в августе;
- центральный с двумя максимумами осадков и слабо выраженным сухим периодом между ними;
- экваториальный с двумя максимумами осадков и хорошо выраженным сухим периодом между ними в июле;
- южный с одномодальным распределением и максимумом осадков в июне.

2. Проведена оценка эффективности районирования и получено, что связанность средних районных внутригодовых распределений с внутригодовыми распределениями осадков отдельных метеостанций высокая с коэффициентами корреляции 0,9 — 1,0 внутри района и существенно уменьшается со станциями за его пределами

3. Для осадков влажного и сухого сезонов применена разная методика оценки изменений средних значений многолетних рядов: аппроксимация моделями нестационарного среднего (линейный тренд и ступенчатые изменения среднего) для осадков в месяцы влажного периода года и сравнение средних значений за две половины ряда для осадков в месяцы сухого периода года в связи с большим числом случаев отсутствия осадков во временных рядах.

4. Для месяцев влажного периода года получена общая тенденция уменьшения осадков по территории с наибольшим снижением до 60 — 130 мм в августе на западе территории, хотя имели место отдельные области роста осадков до 50 — 68 мм в основном в горных районах. Вместе с тем эти изменения осадков практически всегда не являются статистически значимыми, что установлено и

по статистическому критерию Стьюдента, и по оценке статистической значимости коэффициента корреляции осадков со временем, и по отношению к естественной изменчивости, которое не превышало 1,0. Хотя в связи с современным потеплением климата и ростом испаряемости с океана такой вывод кажется несколько непонятным, но может быть объяснен проявлением закона Клапейрона — Клаузиуса, когда при повышении температуры возрастает и возможность большего содержания водяного пара в атмосфере.

5. Для месяцев сухого сезона года (декабрь — февраль) также имеет место общая статистически незначимая тенденция уменьшения осадков на большей части территории Центральной Африки, но вблизи Гвинейского залива наблюдается повышение осадков, которое превышает 1,0 и даже 2,0 СКО в январе.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА БУДУЩИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ

4.1 Введение

Какими будут среднемесячные температуры воздуха до конца 21 века на территории Центральной Африки — основная тема данной главы. Выводы, сделанные во второй главе данной исследовательской работы, указывают на повышение средней температуры от 0,5°C до 2,4°C на территории Центральной Африки. Несмотря на существование таких органов, как МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата), которые предупреждают и информируют об этой проблеме, выбросы парниковых газов (основной причины глобального потепления) продолжают увеличиваться с каждым годом. В таком контексте невозможно игнорировать растущие риски, которым подвергаются территории, на которых мы живем. Более того, адаптация к этим изменениям и будущие риски и уязвимости должны быть количественно оценены в глобальном и региональном масштабах.

Глобальные климатические модели (ГКМ) могут симулировать влияние выбросов парниковых газов (ПГ) на климатические системы и предоставлять оценки параметров будущих климатических систем на основе этой информации [61, 128], как представлено в CMIP5 Data Reference Syntax (DRS) and Controlled Vocabularies; San Francisco Bay Area: San Francisco, CA, USA. Проект по сопоставлению моделей атмосфера – океан (CMIP, находится в свободном доступе в Интернете) является основным набором данных, который предоставляет ученым самые последние результаты климатических моделей.

От CMIP1 до последней стадии CMIP6, модели CMIP были значительно усовершенствованы в течение многих лет, чтобы устранить неопределенности, связанные с нечеткими физическими процедурами для работы с климатической системой и климатическими альтернативами [58, 101, 121, 135]. Эксперименты и модели общей циркуляции атмосферы (AGC), включенные в CMIP5, являются более сложными и совершенными, охватывают более широкий круг научных вопросов с использованием нескольких репрезентативных путей концентрации (RCP). Фаза 6 проекта CMIP, хотя и является улучшенной версией CMIP5 в плане создания моделей, результаты последних в целом сопоставимы [53]. Рабочая группа I МГЭИК представляет подробное сравнение результатов CMIP5 и CMIP6, а также делает прогнозы на основе обеих моделей в Шестом оценочном докладе [54, 127].

В некоторых исследованиях сообщалось о надежности новых моделей CMIP6 по сравнению с моделями CMIP5 в Африке [59, 28, 100], Америке [106], Азии [137, 116, 34, 117, 90, 118], Канаде [31], Китае [119] и Корее [120].

В этой главе будет проведена оценка эффективности сценарных оценок будущей температуры воздуха в Центральной Африке с использованием наиболее эффективной климатической модели для данного региона. Целью также является сравнение результатов моделирования в рамках проектов CMIP5 и CMIP6 друг с другом и с наблюдениями метеорологических станций

в регионе, как за период исторического эксперимента, так и с наблюдениями последних лет для составления будущих климатических прогнозов.

4.2 Выбор эффективной модели климата для Центральной Африки

Основным инструментом для исследования и особенно для будущей оценки изменения климата являются физико-математические модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), которых в рамках проектов СМIP5/СМIP6 насчитывается уже более 50 [20, 27]. Эти модели имеют разное разрешение (число узлов сетки по широте и долготе и уровней по высоте в атмосфере и глубине в океане) и различные схемы определения характеристик климата в явных конструкциях и параметризацию на внутрисеточном масштабе [52, 128, 69]. В результате возникает неопределенность как в воссоздании современного климата по разным климатическим моделям, так и еще большая неопределенность в оценке проекций на будущее до конца XXI века. С другой стороны, климатические модели основаны на закономерностях общей циркуляции атмосферы и океана и не всегда достаточно эффективно учитывают региональные климатические особенности конкретной территории, например, предельно жаркие (Аравийский полуостров) или холодные (Республика Саха (Якутия)) условия [11, 19]. Поэтому главной задачей при оценке современных и особенно будущих изменений регионального климата является выбор наиболее эффективной климатической модели при сравнении данных моделирования и наблюдений для конкретной территории.

В качестве конкурирующих моделей климата выбраны следующие, имеющие информацию о результатах проводимых экспериментов по проекту СМIP5 в свободном доступе в Интернете [69]:

1. Модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model).

2. Модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics, Russia, INM CM4.0 Model).

3. Модель метеорологического института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).
4. Модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC Model).
5. Французская модель CM4 V1 института Лапласа (IPSL/LMD/LSCE, France, CM4 V1).
6. Модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CNRM, CM3 Model).
7. Модель Бьеркнессовского центра климатических исследований, Норвегия (Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, BNU-ESM, BCM2.0 Model).
8. Модель канадского центра моделирования и анализа климата с разрешением T63 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CanESM2, CGCM3.1 Model, T63 resolution).
9. Японская модель MIROC3.2 с высоким разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3.2, high resolution), MIROC-ESM.

4.2.1 Методика выбора эффективной модели

Методика выбора эффективной модели основана на сравнении данных наблюдений и данных исторического эксперимента (Historical experiment 1850—2005 гг.) за совместный период. Исследования, проведенные, например, в работе [11] показали, что коэффициенты корреляции между многолетними рядами наблюденных среднемесячных температур воздуха и результатами исторического эксперимента за совместный период очень низкие и в редких случаях достигают даже $R=0,5—0,6$. Такая слабая связанность с данными наблюдений свидетельствует о том, что модели климата не могут воспроизводить межгодовую изменчивость. Поэтому сравнивать можно только средние многолетние значения или за весь совместный период наблюдений, который разный для разных метеостанций, или за отдельные

конкретные периоды, например, 30-летней продолжительности, акцентируя особое внимание на соответствие средних за последний период наблюдений, например, 1976—2005 гг. Очевидно, что те модели, которые показывают наименьшее отклонение от средних многолетних по данным наблюдений и являются наиболее эффективными. Разности между средними значениями исторического эксперимента и наблюдаемых данных и дают величину систематической ошибки модели. Если эта разность положительная, то модель завышает среднюю температуру в данном пункте на соответствующее число градусов, если разность отрицательна, то модель занижает фактическую температуру, что необходимо учитывать и в экспериментах оценки будущих температур. Понятно, что выбор наиболее эффективной модели следует осуществлять по многим станциям территории, т.к., во-первых, на отдельных станциях может преобладать влияние локальных условий формирования температуры воздуха, а во-вторых, сама территория может быть неоднородной по региональным климатическим особенностям. Поэтому, чтобы исключить локальные азональные факторы следует рассмотреть среднее отклонение между результатами моделирования и наблюдений для всех станций, а, чтобы учесть особенности региональной неоднородности климата следует картировать эти отклонения.

В настоящей работе для сравнения данных наблюдений и моделирования выбраны 4 временных периода: 1950—1975 гг., 1961—1990 гг. (период, рекомендуемый ВМО), 1976—2005 гг. и 1950—2005 гг. и средние температуры воздуха в характерные месяцы всех сезонов года: январь, апрель, июль, октябрь.

4.2.2 Сравнение данных моделирования и наблюдений за разные периоды времени

Прежде всего были рассчитаны разности средних многолетних температур за весь совместный период между смоделированными и наблюдаемыми значениями. Результаты этих разностей ($\Delta = T_{\text{мод}} - T_{\text{набл.}}$), осредненные по всем 65 метеостанциям за каждый месяц года приведены в табл. 4.1.

Из данных табл. 4.1 следует, что средние по модулю разности Δ изменяются от $2,0^{\circ}\text{C}$ до $5,5^{\circ}\text{C}$, причем в среднем для всех месяцев наименьшие разности для трех моделей составляют $2,8 - 2,9^{\circ}\text{C}$. Однако, и эти наименьшие Δ превышают естественную изменчивость (СКО) в несколько раз., которая в среднем для территории изменяется от $0,6^{\circ}\text{C}$ в сентябре до $0,9^{\circ}\text{C}$ в январе,

На рис. 4.1. приведены диаграммы разностей средних многолетних температур (по модулю) между смоделированными и наблюдаемыми данными в среднем для всей рассматриваемой территории Центральной Африки за разные периоды времени и для характерных месяцев всех сезонов года.

Таблица 4.1

Разности между смоделированными и наблюдаемыми многолетними средними температурами по всем метеостанциям Центральной Африки

Месяцы	Модели климата								
	Смсс- см	CNRM	Hadley	INM	IPSL- CM5A- MR	Micro5	MPI	NorESM1- M	BCC
1	2,3	2,2	2,5	3,4	2,0	2,3	2,6	2,8	2,1
2	3,1	3,1	2,7	4,7	2,6	2,7	3,3	3,6	2,8
3	4,0	4,1	3,4	5,4	3,4	3,2	4,0	4,5	3,6
4	4,1	4,2	3,7	5,5	3,5	3,8	4,3	4,7	3,8
5	3,9	4,0	3,6	5,1	3,4	3,7	4,1	4,4	3,6
6	3,6	3,6	3,9	4,2	3,5	3,5	3,8	3,8	3,2
7	3,4	3,4	3,7	4,0	3,3	3,3	3,8	3,3	2,9
8	2,5	2,7	3,1	3,5	2,7	2,8	2,9	2,7	2,5
9	2,7	2,8	2,9	4,1	2,3	2,5	3,0	3,0	2,4
10	2,7	2,7	2,8	4,1	2,3	2,6	2,9	3,1	2,6
11	2,5	2,5	2,7	3,8	2,2	2,3	2,7	2,9	2,3
12	2,6	2,6	3,0	3,5	2,3	2,5	2,8	2,9	2,4
Среднее	3,1	3,2	3,2	4,3	2,8	3,0	3,4	3,5	2,9

На основе полученных диаграмм можно сделать вывод, что средняя по модулю погрешность практически не зависит от заданных периодов осреднения и варьирует от 2°С до 5,5°С в зависимости от модели климата и сезона года. Наименьшие погрешности получены по двум климатическим моделям: IPSL (французская модель института Лапласа) и BCC (модель пекинского климатического центра, Китай). Средние по территории погрешности расчета по этим моделям составляют от 2°С осенью и зимой до 2°—3°С весной и летом. Для данной территории даже такие погрешности существенны, т.к. превышают среднее квадратическое отклонение естественных многолетних колебаний (СКО) в 2 раза и более, что следует учитывать при корректировке особенно будущих проекций климата.

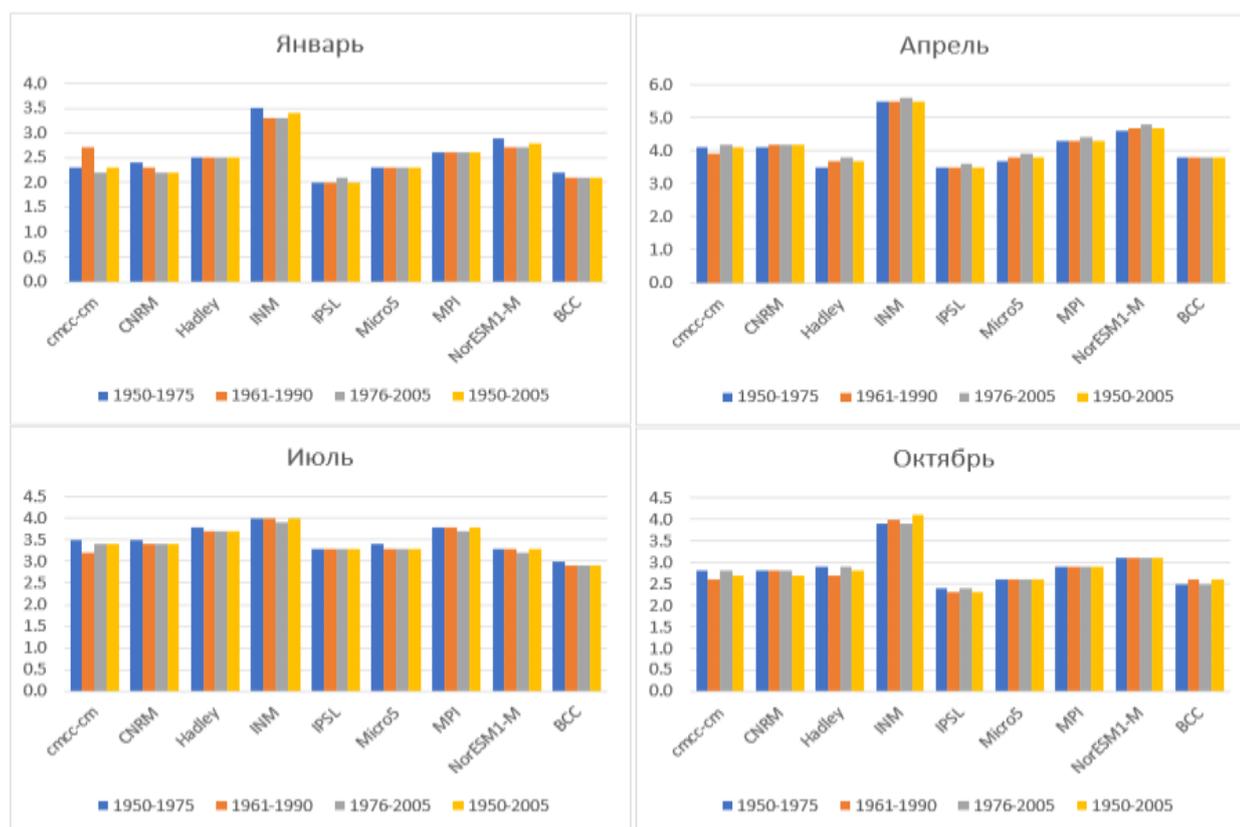


Рисунок 4.1. Различия между смоделированными и наблюдаемыми средними многолетними температурами на метеостанциях Центральной Африки

4.2.3 Оценка погрешностей по территории

Выбранные наиболее эффективные модели IPSL и BCC имеют наименьшую погрешность, но в среднем для всей территории и по модулю. Вместе с тем пространственное распределение этих погрешностей может быть неоднородным как по величине, так и по знаку. Поэтому были построены и проанализированы пространственные распределения погрешностей по территории Центральной Африки, которые приведены для модели IPSL и для характерных месяцев всех сезонов года на рис. 4.2., а для модели BCC на рис.4.3. При этом рассматривались разности средних многолетних значений только за последний 30-летний период времени с 1976 по 2005 гг., т.к. из рис.4.1. следует, что эти разности практически не зависят от рассматриваемого периода времени, а последний период наиболее близок к последующей экстраполяции по сценариям климата.

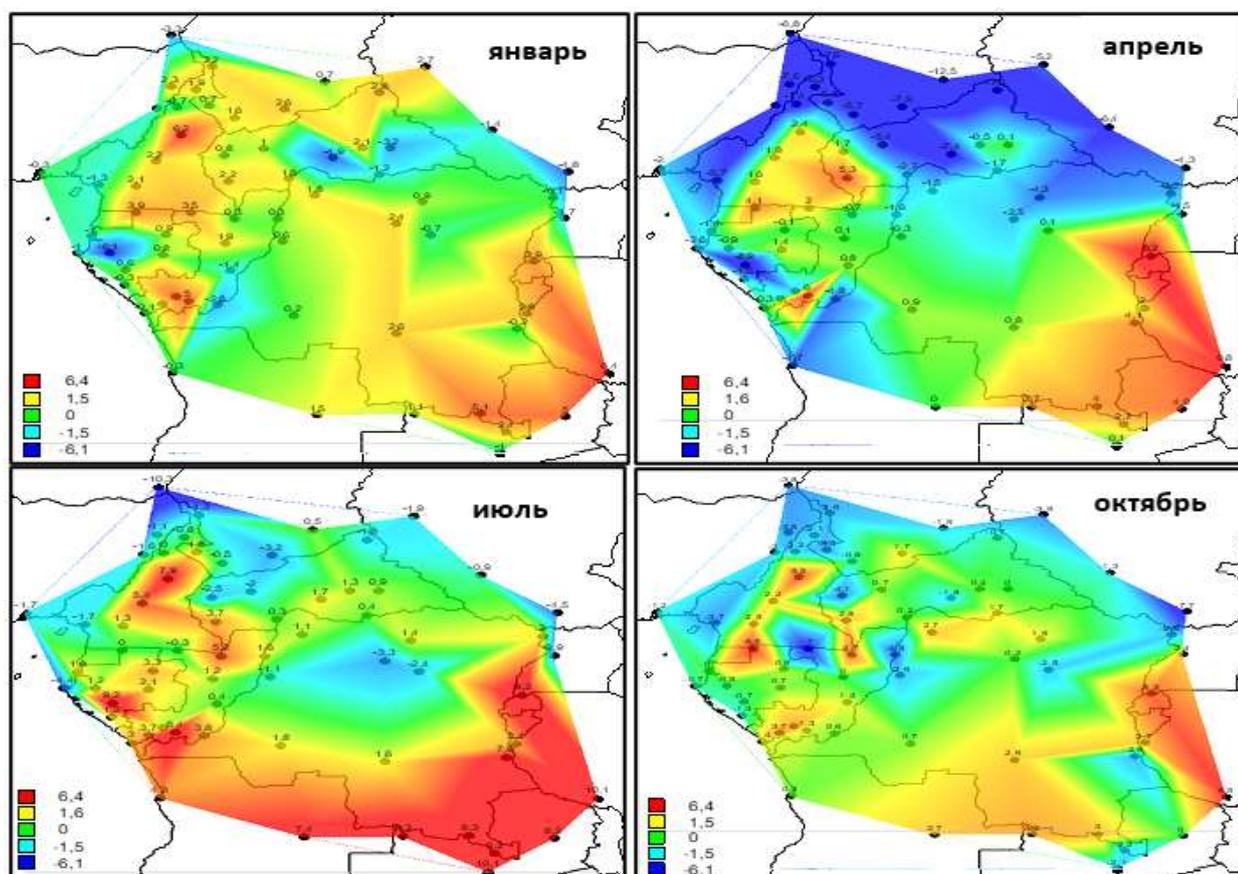


Рисунок 4.2. Пространственные распределения систематических погрешностей модели IPSL для температуры воздуха в характерные месяцы (номера месяцев) года

Пространственные распределения систематических погрешностей модели IPSL свидетельствуют, что зимой (январь) отклонения в основном положительны и достигают максимальных значений (до $+6,4^{\circ}\text{C}$) на юго-востоке, где находятся горы. Аналогичная ситуация локального максимума положительных погрешностей на северо-западе, где также находятся горные области. Такое большое систематическое завышение данных модели связано с тем, что в историческом эксперименте рассмотрена только поверхностная температура на уровне моря. Поэтому в горных областях следует или учитывать данные моделирования на других вертикальных уровнях или вводить большую положительную поправку на вертикальный градиент температуры.

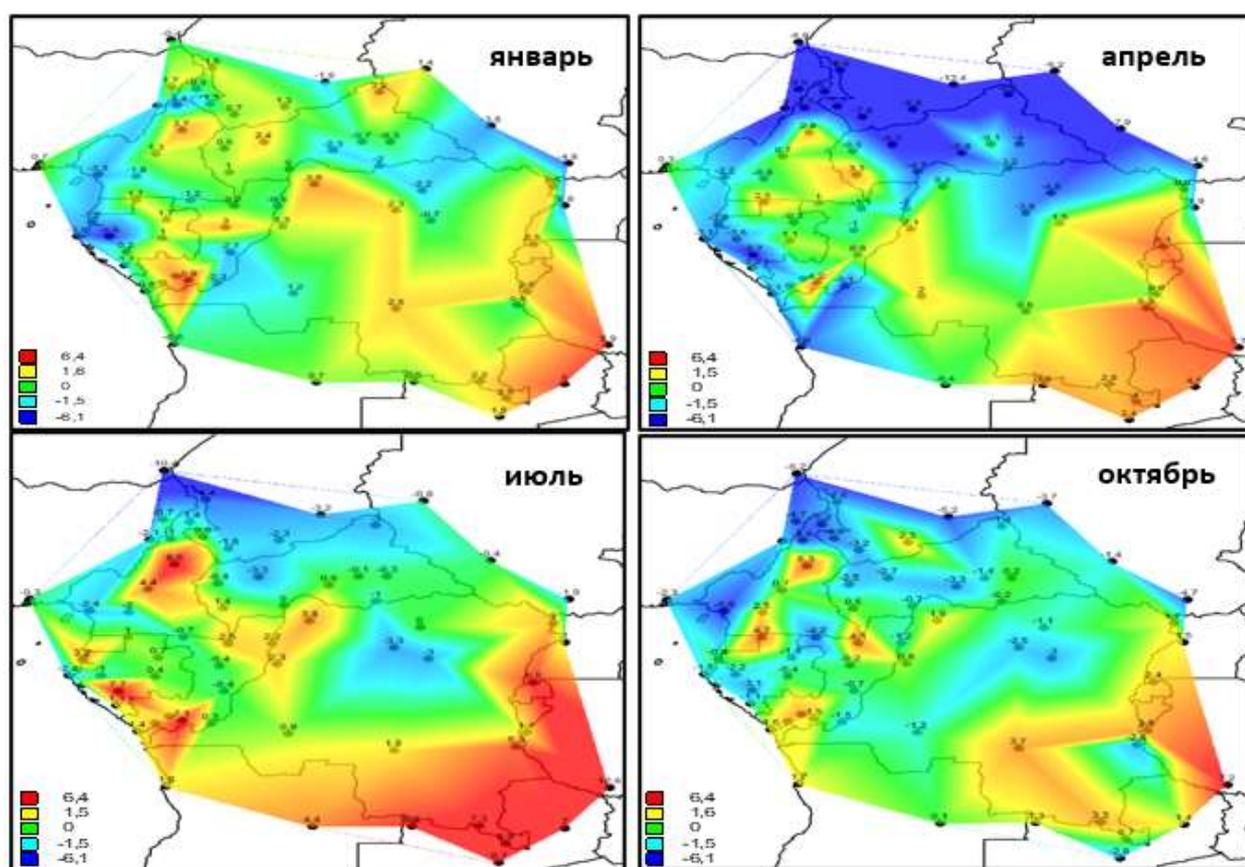


Рисунок 4.3. Пространственные распределения систематических погрешностей модели ВСС для температуры воздуха в характерные месяцы (номера месяцев) года

Отрицательные погрешности с локальными максимумами -4° — -6°C имеют место у побережья и во внутренних областях тропических лесов. В этих областях фактическая температура выше, чем рассчитанная по модели, что связано с тепловым эффектом Гвинейского залива и экваториальных лесов в зимнюю и прохладную фазу Африканского муссона. Весной (апрель) в наиболее жаркий межмуссонный период распределение погрешностей более дифференцировано: большие отрицательные погрешности (до -12°C) на севере и большие положительные (до $+6,8^{\circ}\text{C}$) на юге в горных областях. Фактическая температура на севере больше расчетной из-за значительного прогрева территории и влияния горячего воздуха Сахели и Сахары. Летом (июль) в период летней фазы Африканского муссона аналогичное распределение территории по погрешностям сохраняется, но в южных горных районах отклонения уже больше (до $+8^{\circ}$ — $+10^{\circ}\text{C}$), а в северных меньше (до -8°C). Осенью (октябрь) в межмуссонный период пространственное распределение погрешностей более однородно и их предельные значения меньше. Так, на севере отрицательные погрешности практически не превышают -3° — -4°C (хотя есть и два локальных экстремума до -7°C), а в горных областях (на северо-западе и юге) погрешности не превышают $+6,5^{\circ}\text{C}$. В отдельных локальных случаях большие отклонения от модельных данных могут быть обусловлены и большими погрешностями в данных наблюдений.

Пространственные распределения отклонений между рассчитанными по модели ВСС и наблюдаемыми средними многолетними температурами, приведенные на рис.4.3, практически аналогичны таким же на рис. 4.2. В течение всех сезонов года наибольшие положительные отклонения имеют место в южных горных районах (от $+4^{\circ}$ — $+5^{\circ}\text{C}$ зимой до $+10^{\circ}$ — $+12^{\circ}\text{C}$ летом), а наибольшие отрицательные отклонения наблюдаются в северных районах и на побережье залива также в течение всего года при наибольших значениях до -10° — -12°C весной и при наименьших -4° — -6°C осенью и зимой. В зимний период (январь) положительные разности температур (до $+6^{\circ}\text{C}$) имеют место в центре, на северо-востоке и юго-востоке

рассматриваемой территории, а отрицательные значения (до $-6,6^{\circ}\text{C}$) — на крайнем западе, северо-востоке и центральном юге. В весенний период (апрель) положительные различия (до $+5,7^{\circ}\text{C}$) наблюдаются на юго-востоке, востоке, а отрицательные значения (до $-13,4^{\circ}\text{C}$) имеют место от морского побережья на юго-западе на север и северо-восток. Летом (июль) положительные разности температур (до $+12,6^{\circ}\text{C}$) наблюдаются на большей части территории с наибольшими значениями в вулканическом регионе Камеруна и смещаются от западного побережья на юг и восток, а отрицательные значения (от $-10,4^{\circ}\text{C}$) располагаются от крайнего запада к северу и к центру. В осенний период (октябрь) наибольшая разность температур до $+7,2^{\circ}\text{C}$ наблюдается на юго-востоке и востоке, а отрицательные значения до $-6,2^{\circ}\text{C}$ и более расположены на крайнем западе, севере и северо-востоке.

4.2.4 Заключение по выбору эффективной модели

Из данных исторического эксперимента по 9 моделям климата при сравнении с данными наблюдений для территории Центральной Африки установлено следующее.

1. Наиболее эффективными моделями со средними для рассматриваемой территории отклонениями от данных наблюдений до 2° — 3°C оказались французская модель IPSL института Лапласа и китайская модель BCC пекинского климатического центра.
2. Погрешности моделей практически не зависят от рассматриваемого периода осреднения температур: весь период 1950-2005 гг. или отдельные его части.
3. Несмотря на то, что средние отклонения от выбранных моделей невелики, их пространственные распределения показывают локальные экстремумы, которые достигают -10° — -12°C и $+10^{\circ}$ — $+12^{\circ}\text{C}$.
4. Территориальные завышения температур воздуха моделями связаны с горными условиями и большими высотами метеостанций (до 1500 м) и это

необходимо учитывать при оценке проекций температур на будущее. Завышения температур в горах наиболее существенны летом (до +12°C) и наименьшие осенью и зимой (до +4° — +6°C).

5. Территориальные занижения температур моделями имеют место в основном на севере и западе и обусловлены двумя разными причинами отепляющего локального характера: влиянием Сахары и Сахели с севера и Гвинейского залива с запада. Эти завышения также имеют сезонный ход. Наибольшие отрицательные отклонения наблюдаются в весенний самый жаркий межмуссонный период, а наименьшие в летний и зимний муссон.

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

4.3.1 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 [11, 18]. 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 21 века в 2.6, 4.5 и 8.5Вт/м² соответственно. Низкий (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, сценарий с высоким уровнем радиационного воздействия (RCP8.5 и SSP5-8.5) представляет собой возврат к обычной практике в условиях продолжающейся зависимости от ископаемого топлива [106].

4.3.2 Методика оценки будущих температур

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 — 2014гг. для проекта СМIP6 и с будущими сценарными оценками проектов СМIP5 и СМIP6 двух моделей климата: французской (IPSL) и китайской (BCC). Основываясь на результатах исследования [11], 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 21 века, который делится на 3 интервала для оценки средних значений: 2011—2040, 2041—2070 и 2071—2100 в проекте

СМIP6. Скорости роста температуры или градиенты за период в 30 лет (Δ) рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta_1 = \bar{T}_{2_{\text{наб}}} - \bar{T}_{1_{\text{наб}}}, \Delta_2 = \bar{T}_{2_{\text{буд}}} - \bar{T}_{1_{\text{буд}}} \text{ и } \Delta_3 = \bar{T}_{3_{\text{буд}}} - \bar{T}_{2_{\text{буд}}}, \quad (4.1)$$

$$\Delta_{\text{ср}_1} = 1/2(\Delta_3 + \Delta_2) \text{ и } \Delta_{\text{ср}_2} = 1/2(\Delta_{\text{ср}_1} + \Delta_1), \quad (4.2)$$

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 21 века осуществляется по формулам:

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2011-2040)} = \bar{T}_{2_{\text{наб}}} + \Delta_{\text{ср}_2}, \quad (4.3)$$

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2041-2070)} = \bar{T}_{\text{коррек}(2011-2040)} + \Delta_2, \quad (4.4)$$

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2071-2100)} = \bar{T}_{\text{коррек}(2041-2070)} + \Delta_3, \quad (4.5)$$

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

В соответствии с (4.3) значение первого сценарного среднего ($\bar{T}_{\text{коррек}(2011-2040)}$) 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 Δ_2 и определяется откорректированное значение за 2-ой будущий период 2041—2070 гг., а затем к откорректированному $\bar{T}_{\text{коррек}(2041-2070)}$ добавляется градиент Δ_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:

$$\bar{T}_{\text{коррек}(1951-1980)} = \bar{T}_{\text{ист}(1951-1980)} + (\bar{T}_{1\text{наб}} - \bar{T}_{\text{ист}(1951-1980)}), \quad (4.6)$$

$$\bar{T}_{\text{коррек}(1981-2010)} = \bar{T}_{\text{ист}(1981-2010)} + (\bar{T}_{1\text{наб}} - \bar{T}_{\text{ист}(1981-2010)}), \quad (4.7)$$

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;

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

4.3.3 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. 4.2. для двух климатических моделей: французской IPSL и китайской BCC.

Таблица 4.2.
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							BCC						
СМIP5 и СМIP6							СМIP5 и СМIP6						
период	V_1	V_0	R^2	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	V_1	V_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	V_1	V_0	R^2	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	V_1	V_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	V_1	V_0	R^2	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	V_1	V_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	

Из данных табл. 4.2. 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°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 CMIP5 и CMIP6. 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° . 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 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 $3,2-3,5^{\circ}\text{C}$, а для модели IPSL $1,5-1,9^{\circ}\text{C}$.

По результатам анализа коэффициентов и отклонений можно сделать вывод, что для модели IPSL результаты расчетов по историческому эксперименту в проектах CMIP5 и CMIP6 практически не отличаются, и средние случайные отклонения не превышают 1°C . Для модели BCC в полученных данных исторического эксперимента по двум проектам есть систематические отклонения: значения выше среднего завышены, ниже среднего — занижены и максимальные отклонения уже составляют $3,0$ — $3,5^{\circ}\text{C}$.

Сравнение с данными наблюдений показало, что для модели IPSL средние по модулю погрешности равны $1,0^{\circ}\text{C}$ в проекте CMIP5 и $1,3^{\circ}\text{C}$ в проекте CMIP6, а наибольшие достигают 8 — 10°C в проекте CMIP5 и 9 — 12°C в проекте CMIP6. Поэтому получается, что в проекте CMIP6 данные исторического эксперимента даже менее эффективны, чем в CMIP5. Для модели BCC средние по модулю погрешности равны $1,0^{\circ}\text{C}$ в проекте CMIP5 и $1,1^{\circ}\text{C}$ в проекте CMIP6, а наибольшие достигают 10 — 12°C в проекте CMIP5 и 10 — 13°C в проекте CMIP6. Отсюда следует, что данные проекта CMIP6 не уменьшили расхождение с данными наблюдений и даже несколько увеличили их. Поэтому при оценке будущего климата нельзя надеяться только на сценарии проекта CMIP6, а надо использовать и сценарные оценки проекта CMIP5, так как исторический эксперимент проекта CMIP6 не доказал, что результаты этого проекта эффективнее, чем CMIP5.

Для оценки устойчивости полученных в табл. 4.2. 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 BCC при сравнении данных моделирования CMIP5 и CMIP6 $R^2=0,8$, 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 $0,2^{\circ}\text{C}$ меньше, хотя отклонения при наибольших и наименьших значениях остаются такими же и достигают $3,5^{\circ}\text{C}$. При сравнении данных моделирования

с данными наблюдений $R^2=0,0—0,1$ и наибольшие отклонения также достигают $10—13^{\circ}\text{C}$, хотя средние отклонения несколько большие и равны $1,6^{\circ}\text{C}$ против $1,1^{\circ}\text{C}$ за весь период.

4.3.4 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.4.3. для модели ВСС и в табл. 4.4 для модели IPSL, где период 1: 2011—2040 гг., период 2: 2041—2070 гг. 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.

Таблица 4.3.

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	$\Delta_{\text{Ср}}$	$\Delta_{\text{мак}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	B_0	$\Delta_{\text{Ср}}$	$\Delta_{\text{мак}}$	$\Delta_{\text{мин}}$	B_0	$\Delta_{\text{Ср}}$	$\Delta_{\text{мак}}$	$\Delta_{\text{мин}}$
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 4.4.

Результаты сравнения будущих сценарных оценок в проектах CMIP5 и CMIP6 для территории Центральной Африки по модели IPSL

период	Сценарий											
	2,6				4,5				8,5			
	V_0	$\Delta_{Ср}$	$\Delta_{мак}$	$\Delta_{мин}$	V_0	$\Delta_{Ср}$	$\Delta_{мак}$	$\Delta_{мин}$	V_0	$\Delta_{Ср}$	$\Delta_{мак}$	$\Delta_{мин}$
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

Анализ отклонений в табл. 4.3 и 4.4 также свидетельствует о том, что модель ВСС в проекте CMIP6 больше отличается от такой же модели в проекте CMIP5, 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 ($\Delta_{Ср}$) для IPSL не превышают 0,5°C за исключением сценария 4.5, где они достигают 1,2—1,3°C. В модели ВСС $\Delta_{Ср}$ находится в диапазоне 0,7—1,3°C и практически все Δ увеличиваются с ростом номера будущего периода. т. е. в проекте CMIP6 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 CMIP5 и CMIP6 различаются примерно также по тем же показателям.

4.3.5 Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки до 2100г.

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 температур 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. 4.5 Показатели сравнения для двух случаев 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 (4.3)–(4.5), что обозначено в табл.4.5 как «СМIP5 кор». Сценарные значения температур получены для климатической модели ВСС.

По результатам таблицы 4.5 можно сделать следующие выводы:

- осредненные за 15 лет (2006—2020 гг.) данные проекта СМIP5 практически никак 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 ($\Delta_{\text{ср}} = +0,3$ — $+0,4^\circ\text{C}$), 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 Δ_{\max} 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 $\Delta_{\max} = +4,6$ — $+4,8^{\circ}\text{C}$;

— разности Δ_{\min} 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°C , а наибольшие отличия за счет локальной пространственной климатической неоднородности могут достигать 9 — 13°C .

Таблица 4.5

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	$\Delta_{\text{ср}}$	$\Delta_{\text{макс}}$	$\Delta_{\text{мин}}$
RCP2,6	январь	СМIP5	0,6	10,2	0,21	0,4	4,8	-2,1
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	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
		СМIP5кор	1,0	0,1	0,96	0,1	0,5	-0,2

После корректировки температур по формулам (4.3) — (4.5) $R^2=0,94$ — $0,99$ коэффициент B_1 близок к 1,0, $\Delta_{\text{ср}} = -0,2$ — $+0,3^{\circ}\text{C}$, 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. 4.4. Средние 30-летние значения температур воздуха за характерные месяцы всех сезонов года (январь, апрель, июль, октябрь) для середин 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 CMIP5 и CMIP6 без корректировки (Ряд 2 и Ряд 3).

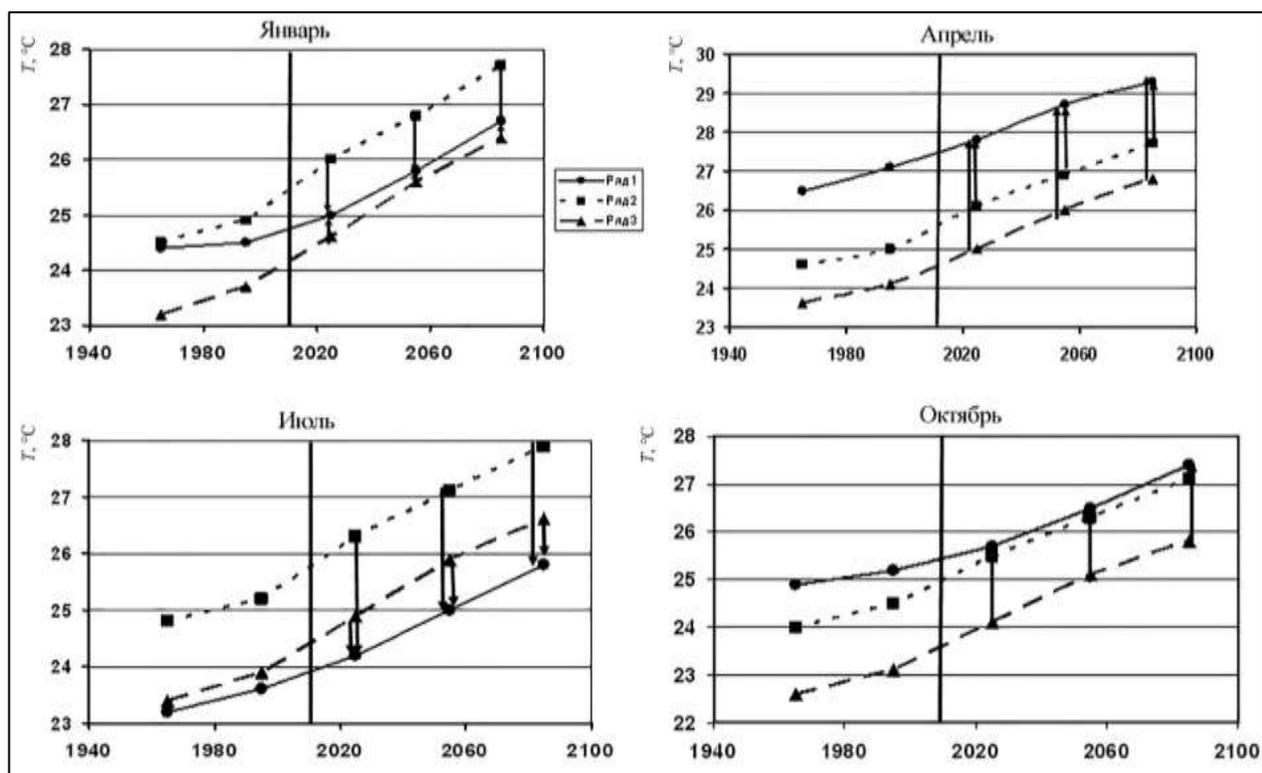


Рисунок 4.4. Пример корректировки сценарных будущих оценок средней температуры воздуха для Центральной Африки по модели IPSL и сценарию 4,5 Вт/м², где Ряд 1 – наблюдаемые данные и откорректированные будущие сценарии, Ряд 2, Ряд 3 – данные исторического эксперимента и будущих сценарных оценок для проектов CMIP5 и CMIP6 соответственно

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.4.4. в виде одной линии.

Из графиков рис. 4.4. следует, что температура января для региона Центральной Африки по историческому 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 температур (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. 4.6. Из результатов табл.4.6 следует, что разница между сценарными значениями по СМIP5 и СМIP6 в основном не превышает $0,1^{\circ}\text{C}$, а средний 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°C и 0,5°C соответственно, то для сценария 8,5 это различие уже большое и составляет почти 2°C. Поэтому можно считать, что сценарий 8,5 не только является маловероятным предельным, но еще и не надежным при оценке на основе его по разным моделям климата.

Таблица 4.6

Средние для территории Центральной Африки откорректированные значения будущих сценарных температур по моделям IPSL и BCC и по 3м сценариям за характерные месяцы года (1 – январь, 4 – апрель, 7–июль, 10 – октябрь) [из обработки данных]

М- ц	Сцен,	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

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. 4.5. для модели IPSL и двух сценариев 4,5 и 8,5. Как видно из рис. 4.5., по наиболее вероятному среднему сценарию 4,5 область с температурой выше 28°C (красным на рис. 4.4.) будет постепенно расширяться от современной на севере рассматриваемой территории к центральной и западной частям и к концу XXI века 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 температуры 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 8,5 уже к середине этого столетия практически на всей территории Центральной Африки температура превысит 28°C с максимумами 31—32°C на севере, а в последней трети столетия небольшая локальная горная область с температурой 23°C останется только на востоке, а на всей территории температуры будут от 28°C в горных районах до 33°C на севере.

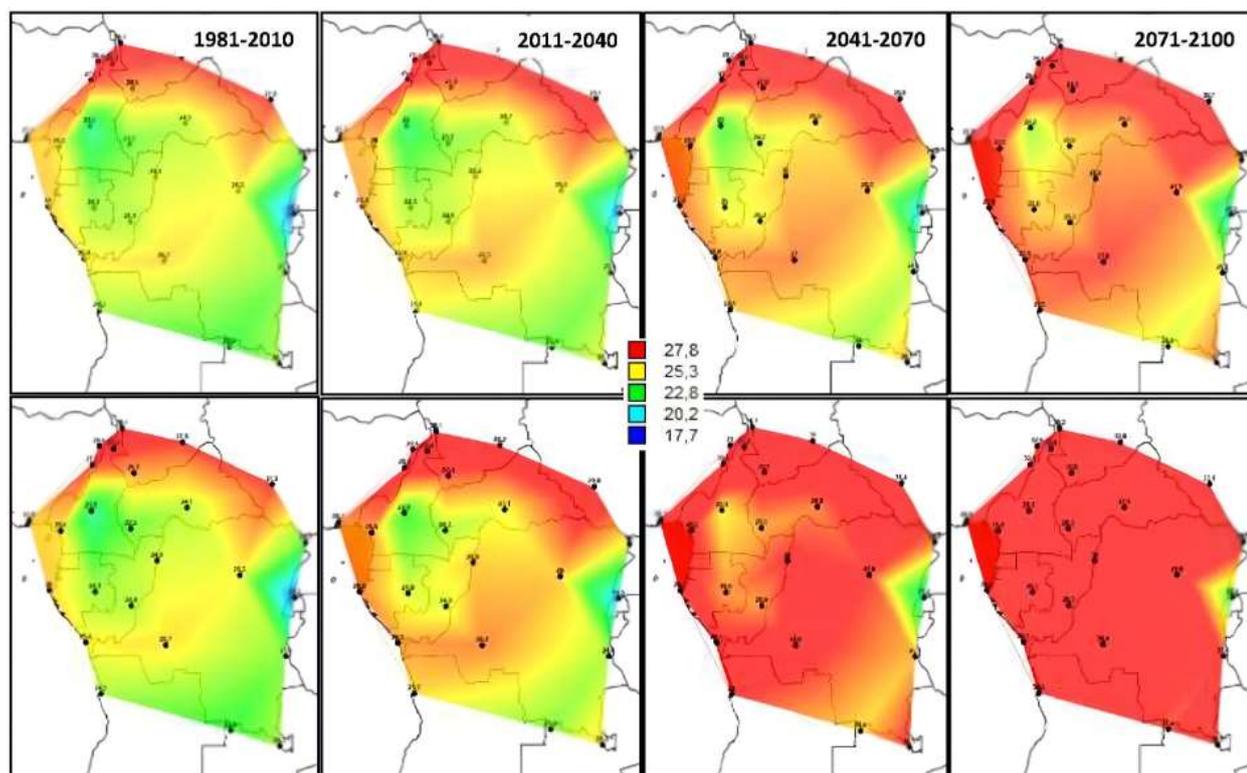


Рисунок 4.5. Пространственные распределения современных и сценарных температур октября для Центральной Африки по модели IPSL и сценариям 4,5 Вт/м² (вверху) и 8,5 Вт/м² (внизу)

Для характерных месяцев остальных сезонов года пространственные распределения приведены на рис. 4.6. 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.

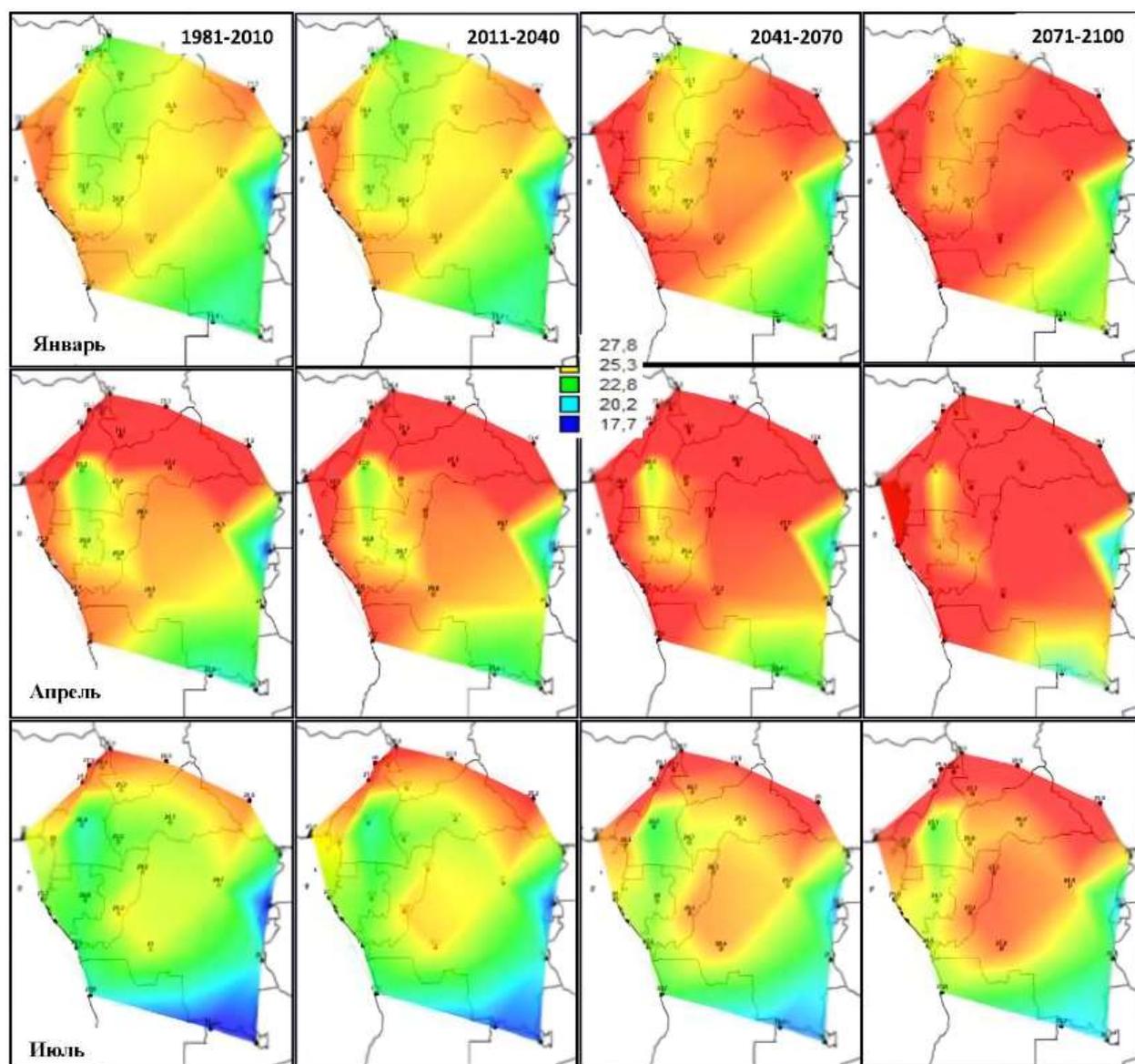


Рисунок 4.6. Пространственные распределения современных и сценарных температур января, апреля и июля для Центральной Африки по модели IPSL и сценариям $4,5 \text{ Вт/м}^2$

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°C имеют место вблизи Гвинейского залива и на востоке внутри континента, а наименьшие в горных районах могут быть 20°C и меньше, а на севере региона температуры

составляют 22—24°C. В конце 21 столетия ожидается увеличение температур на 2°—3°C, а температуры выше 27°—28°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 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.

4.4 Выводы по 4-ой главы

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 BCC 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 °С. При сравнении с данными наблюдений средние по модулю погрешности равны 1,0°С в проекте СМIP5 и 1,1°С в проекте СМIP6, а наибольшие достигают 10—12°С в проекте СМIP5 и 10—13°С в проекте СМIP6.

3. В связи с тем, что при сравнении результатов исторического эксперимента с данными наблюдений модели проекта СМIP6 не дали преимуществ по сравнению с моделями СМIP5, то при оценке будущего климата следует использовать сценарии обоих проектов.

4. При сравнении результатов будущих сценарных оценок по проектам СМIP5 и СМIP6 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 СМIP5 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°С, а наибольшие отличия за счет локальной пространственной климатической неоднородности могут достигать 9—13°С. 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 $\Delta_{\text{ср}} = -0,2 \text{ — } +0,3^\circ\text{C}$ и наибольшие разности не превышали по модулю 0,4—0,5°С.

6. Для средней по территории температуры Центральной Африки на последнюю треть XXI века получен ее рост от 0,2—0,5°С до 2,6—4,2°С по предельным сценариям и 1,2—1,7°С 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 $27\text{—}28^{\circ}\text{C}$ до 31°C по среднему сценарию 4,5. В зимний муссон температуры выше $27^{\circ}\text{—}28^{\circ}\text{C}$ 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 $2\text{—}3^{\circ}\text{C}$ и несколько меньше летом $1,5\text{—}2,5^{\circ}\text{C}$.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА БУДУЩИХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ

5.1 Введение

Выводы, полученные в главе 3, заключаются в том, что общая тенденция к уменьшению количества осадков на всей рассматриваемой территории характеризует оба сезона года. В то же время в Центральной Африке отмечено увеличение количества осадков вблизи Гвинейского залива до уровня выше 1,0 и даже 2,0 СКО в январе. Однако, большинство секторов экономики уязвимы к изменениям климата и особенно осадков. К ним относятся сельское хозяйство, водообеспечение, экосистемы и для них необходимо пересматривать принципы устойчивого развития и стратегии развития. Осадки являются одним из основных климатических факторов, влияющих на экономику Центральной Африки. Однако, характер изменения осадков за многолетний период недостаточно изучен как в связи с их большой естественной изменчивостью, так и с точностью их наблюдений, достаточностью и равномерностью размещения метеостанций по территории и полнотой информации за многолетний период [41,57, 112].

Результаты ряда исследований по прогнозам оценки среднего количества осадков в регионе Центральной Африки предсказывают как уменьшение, так и увеличение количества осадков при сценариях глобального потепления (GWL) [39, 109], а также увеличение интенсивности экстремальных осадков [126, 43, 46, 57, 112, 118]. Помимо более интенсивных экстремальных осадков, сценарии [122, 125] прогнозируют увеличение частоты засух.

В данной главе работы оценивается динамика будущих сумм осадков за каждый месяц в Центральной Африке по среднему сценарию ($4,5 \text{ Вт/м}^2$) по наиболее подходящей для данного региона физико-математической модели климата, отобранной путем сравнения данных исторического эксперимента проектов СМIP5 и СМIP6 с наблюдениями метеостанций в регионе.

5.2 Исходная информация

В исследовании использована информация двух видов: многолетние ряды наблюдений за суммами месячных осадков по 57 метеостанциям Центральной Африки и результаты исторического эксперимента и сценарных оценок также в виде многолетних рядов сумм месячных осадков, проинтерполированных в точки пространства с координатами метеостанций. В качестве конкурирующих моделей климата выбраны следующие, имеющие информацию о результатах проводимых экспериментов (исторического и сценарии будущего климата) по проектам CMIP5 и CMIP6 в свободном доступе в Интернете [69, 134]:

1. Модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics, Russia, INM CM4.0 Model).
2. Модель метеорологического института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).
3. Модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC Model).
4. Французская модель CM4 V1 института Лапласа (IPSL/LMD/LSCE, France, CM4 V1).
5. Модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CNRM, CM3 Model).
6. Модель Бьеркнессовского центра климатических исследований, Норвегия (Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, BNU-ESM, BCM2.0 Model).
7. Модель канадского центра моделирования и анализа климата ; (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CCCMA-model=CanCM4).
8. Японская модель MIROC3.2 с высоким разрешением (CCSR/NIES/FRCGC, Japan, MIROC3.2, high resolution), MIROC-ESM.
9. Модель метеорологического научно-исследовательского института МРИ/JMA Модель МРИ-CGCM3 (Meteorological Research Institute of MRI/JMA MRI-CGCM3 model)

10. Национальный центр атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research, NCAR).
11. Норвежский климатический центр; Norwegian Climate Centre (NorClim - ESM).
12. NSF-DOE-NCAR model - Community Earth System Model 1, experiment-ESM.
13. Модель климатической системы CSIRO Mk3L — это эффективная в вычислительном отношении модель общей циркуляции атмосферы-земли-морского льда-океана; (UNSW model - CSIRO-Mk3L-1-2 from UNSW).
14. Первый институт океанографии, SOA, Китай (First Institute of Oceanography, SOA, China_FIO-ESM).
15. Корейский институт океанических наук и технологий Модель системы Земли и ее имитационные характеристики (Korea Institute of Ocean Science and Technology Earth System Model and Its Simulation Characteristics (KIOST-ESM).
16. Государственное объединение научных и прикладных исследований — австралийское государственное учреждение; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) ; Канберра, Австралия.
17. Национальный институт метеорологических наук (НИМС) и Корейская метеорологическая администрация (КМА); National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) and Korea Meteorological Administration (KMA). World Climate Research Programme (WCRP).
18. Нанкинский университет информационных наук и технологий (НУИИТ) Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST (NUIST).
19. Университет Цинхуа - факультет наук о земных системах; Tsinghua University - Department of Earth System Science (THU) Community Integrated Earth System Model (CIESM).
20. Европейско-средиземноморский центр по изменению климата — итальянский исследовательский центр, занимающийся климатом и исследованиями, Euro-Mediterranean Center on Climate Change.

5.3 Методика оценки осадков

Для оценки будущих климатических изменений осадков необходимо выбрать наиболее подходящую физико-математическую модель для Центральной Африки на основе сравнения данных наблюдений и результатов исторического эксперимента. Критерием является минимальная разность средняя по абсолютной величине для всех метеостанциям в районе $\Delta_{\text{ср}}$ между наблюдаемыми и смоделированными средними за выбранные интервалы времени, которые включают не менее двух периодов продолжительностью 25—30 лет до последнего совместного года моделирования и наблюдений.

Несмотря на то, что для выбранной модели климата $\Delta_{\text{ср}}$ является минимальным отклонением, но оно получено в среднем для всех пунктов наблюдений по территории и характеризует средние локальные особенности. Вместе с тем в отдельных пунктах наблюдений или в отдельных районах эти отклонения могут быть намного больше и иметь разные знаки. Поэтому следует построить пространственное распределение отклонений Δ_i для всех пунктов наблюдений, как для оценки их пространственных закономерностей, так и для корректировки смоделированных данных:

$$Y_{\text{ист корр } i} = Y_{\text{ист } i} + \Delta_i, \quad (5.1)$$

где: $Y_{\text{ис } i}$, $Y_{\text{ист корр } i}$ — среднее многолетнее значение климатической характеристики по историческому эксперименту до и после корректировки).

Для объединения современных и будущих сценарных изменений средних климатических характеристик следует рассчитать градиенты изменения характеристики Y за 3 периода до 2100 года в будущем:

$$\Delta_2 = Y_{\text{ср}62} - Y_{\text{ср}61} \text{ и } \Delta_3 = Y_{\text{ср}63} - Y_{\text{ср}62}, \quad (5.2)$$

где $Y_{срб1}$, $Y_{срб2}$, $Y_{срб3}$ — средние сценарные значения климатической характеристик последовательно в каждый из трех периодов времени в будущем, например, 2011—2040 гг., 2041—2070 гг. и 2071—2100 гг.

Затем следует определить средний градиент за современный период (Δ_1) и за будущий период (Δ_6) как среднее из Δ_2 и Δ_3 и взять среднее из двух градиентов Δ_1 и Δ_6 для соединения последнего современного и первого будущего значения. Очевидно, что будущие сценарные оценки также следует корректировать в соответствии с этим градиентом, связывающим настоящее и будущее.

Последний этап методики включает в себя построение пространственных распределений будущих климатических характеристик за выбранные отрезки времени до конца XXI века и по разным сценариям.

5.4 Выбор эффективной климатической модели СМIP для Центральной Африки

Для выбора наиболее эффективной физико-математической модели климата из 20 рассматриваемых моделей проектов СМIP5 и СМIP6 были рассчитаны средние многолетние значения разностей (по модулю) сумм месячных осадков за последний период с 1951 г. между данными наблюдений на метеостанциях и результатами исторического эксперимента для каждой метеостанции, представленные в %

$$\Delta = \frac{\bar{M}_{od} - \bar{H}_{аб}}{\bar{H}_{аб}} \times 100, \quad (5.3)$$

где \bar{M}_{od} и $\bar{H}_{аб}$ — соответственно средние значения исторических экспериментов и данных наблюдении за совместный период.

Полученные результаты представлены в виде средних по всем 57 метеостанциям и за месяцы влажного сезона (с мая по октябрь) приведены в табл. 5.1.

Tableau 5.1.

Средние относительные разности по модулю между наблюдениями и данными исторического эксперимента (в %) для территории Центральной Африки

Модель	Номер месяца						сред, знач, Δ (%)
	5	6	7	8	9	10	
CMIP5							
CCCMA	47,0	50,3	41,9	47,9	45,5	44,2	46,1
INM	49,6	52,6	44,7	49,6	48,9	54,4	50,0
IPSL	53,6	54,1	48,7	51,4	49,0	46,1	50,5
MIROC	47,8	45,0	41,1	43,4	49,3	45,3	45,3
NCAR	46,9	47,4	36,5	44,8	40,8	40,0	42,7
NorESM1	43,9	39,9	34,9	44,2	38,2	37,3	39,7
BNU	44,7	39,7	37,7	41,5	38,7	39,9	40,4
MRI	64,6	63,9	55,8	61,9	63,0	55,6	60,8
NSF_DOE_NCAR	47,7	42,2	30,1	44,9	38,3	41,9	40,9
UNSW	57,0	53,5	50,1	50,1	52,7	55,7	53,2
CNRM	48,1	50,9	39,6	44,5	47,7	45,5	46,0
MPI	52,5	57,1	51,1	54,5	58,7	49,3	53,9
CMIP6							
BCC	41,3	46,6	42,2	46,9	48,6	46,7	45,4
CCCMA	54,3	53,8	52,8	55,1	47,6	50,5	52,3
INM	45,6	49,1	45,6	51,2	48,0	50,9	48,4
IPSL	51,2	58,5	50,2	57,2	50,6	45,0	52,1
MIROC	49,0	51,4	46,1	48,4	51,1	46,5	48,8
NCAR	48,8	55,1	47,6	49,9	46,2	44,9	48,8
NorESM1	43,8	47,6	36,2	47,6	49,0	36,6	43,5
KIOST-ESM	50,4	51,3	49,7	53,8	52,7	55,6	52,2
FIO-ESM	49,6	53,6	46,2	51,3	47,9	48,6	49,5
NIMS-KMA	45,2	51,2	38,2	46,0	49,0	42,6	45,4
NUIST	62,2	61,4	60,5	53,9	56,4	50,1	57,4
THU-CIESM	99,8	99,8	99,7	99,7	100,2	100,0	99,9
CSIRO-ARCCSS	53,9	62,6	51,0	52,7	53,4	52,6	54,4
CMCC	50,5	49,6	46,8	49,2	43,5	44,3	47,3

Из данных табл. 5.1. следует, что средние по модулю Δ изменяются от 39,1% до 64,6% для моделей проекта CMIP5 и от 36,2% до 100,2% для моделей проекта CMIP6. Наиболее подходящей в среднем для всей территории Центральной Африки является модель норвежского климатического центра (NorESM1) из проекта CMIP5 со средней погрешностью 39,7%. Близкими ей по эффективности являются климатические модели BNU с $\Delta=40,4\%$ и NSF_DOE_NCAR с $\Delta=40,9\%$ также из проекта CMIP5.

5.4.1 Оценка погрешностей модели по территории

Выбранный наиболее эффективной модели NorESM1 имеет наименьшую погрешность, но в среднем для всей территории и по модулю. Вместе с тем пространственное распределение этих погрешностей может быть неоднородным как по величине, так и по знаку. Поэтому были построены и проанализированы пространственные распределения погрешностей Δ_i (в %) для каждой метеостанции на территории Центральной Африки, которые приведены для наиболее характерных месяцев влажного сезона года (июнь – сентябрь) на рис. 5.1.

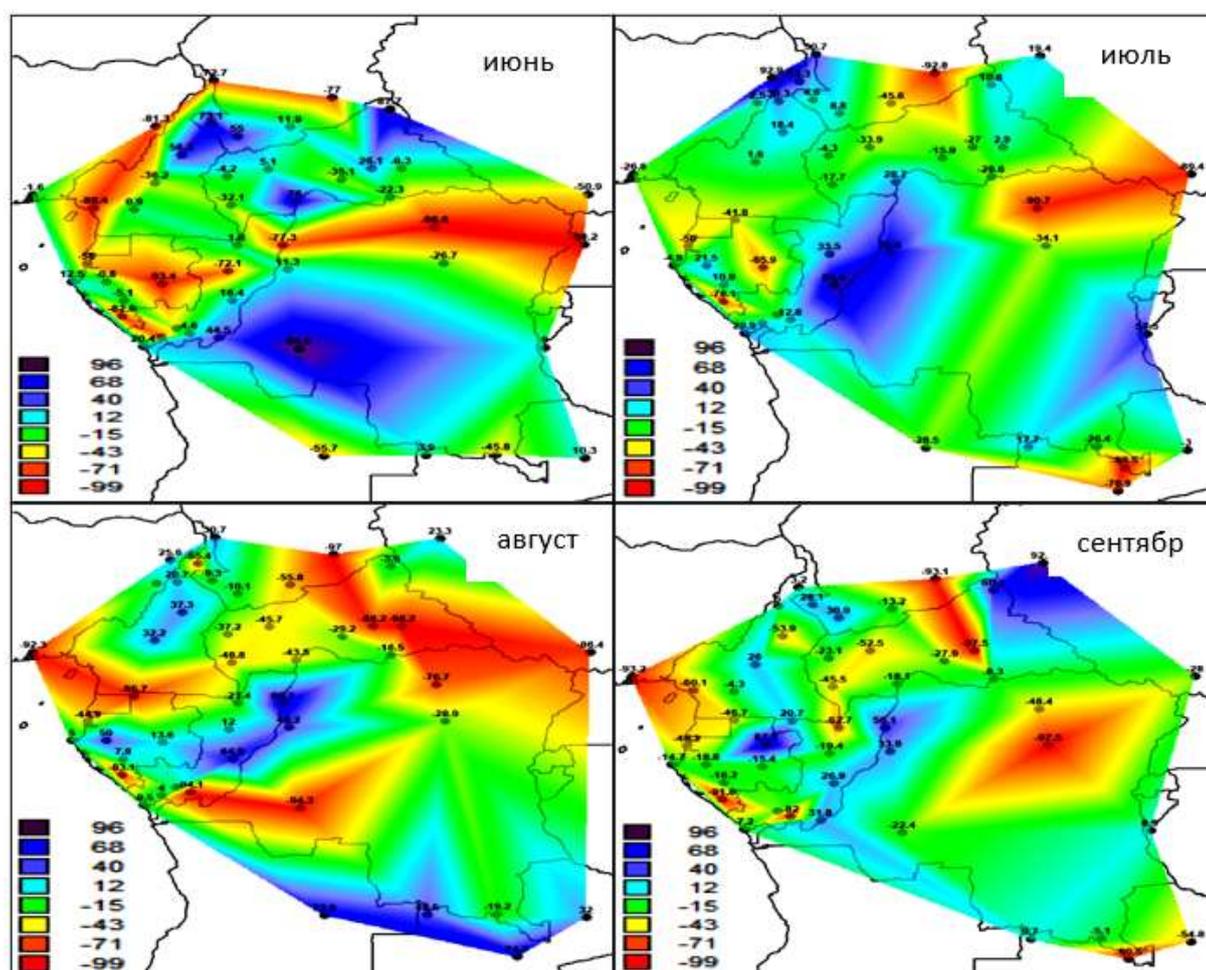


Рисунок 5.1. Пространственные распределения систематических погрешностей модели NorESM1 для осадков (Δ в%) в характерные месяцы влажного периода года (июнь, июль, август, сентябрь).

Пространственные распределения систематических погрешностей наиболее эффективной модели NorESM1 показывают, что в июне отрицательные отклонения занимают большую часть территории и достигают максимальных значений (до -98,2% и -98,6%) на северо-востоке и в западной части в горных районах. Положительные погрешности с локальными максимумами (до 95,5%) имеют место в центральной части территории и на севере. В этих областях рассчитанные по модели осадки выше, чем, наблюдаемые. В июле большие положительные погрешности (до +92,9%), связанные с локальными климатическими факторами, занимают юго-восток, центр и северо-запад, а остальные области территории занимают отрицательные отклонения, достигая -98,5% на юге и на северо-востоке в горных областях.

В августе, в период летней фазы Африканского муссона распределение погрешностей в основном включает отрицательные значения, которые достигают -98,2%. Положительные отклонения наблюдаются на юге, в регионе, расположенном от Атлантического побережья на западе до центра республики Конго (Браззавиль) и горного региона Камерун на северо-западе. В межмуссонный период в сентябре пространственное распределение погрешностей отличается от августовского уменьшением площади, занимаемой большими отрицательными отклонениями (до -97,5%) на севере, западе и востоке. В отдельных локальных случаях большие положительные отклонения от модельных данных имеют место у побережья и во внутренних областях тропических лесов и на северо-востоке.

5.5 Оценка будущих осадков Центральной Африки до 2100 г.

Для оценки будущих осадков по результатам сценария 4,5 по выбранной наиболее эффективной климатической модели NorESM1 проекта CMIP5 прежде всего были рассчитаны поправки к сценарным значениям для каждой метеостанции на основе градиентов средних значений будущих осадков по (5.2) за три интервала времени (2011 — 2040 гг., 2041 — 2070 гг. и 2071—

2100 гг.) и градиента современных изменений осадков за 2 периода: 1951—1980 гг. и 1981—2005 гг. Такие поправки были рассчитаны для будущих осадков четырех характерных месяцев влажного сезона года (июнь — сентябрь) и для января как месяца с наименьшими осадками в сухой сезон года.

На рис.5.2 приведены пространственные распределения откорректированных сценарных значений (сценарий RCP 4,5) осадков сентября за 3 будущих периода до конца XXI века в % по отношению к современным средним многолетним осадкам за период 1981—2005 гг. В сентябре в среднем для территории наблюдается наибольшее в году количество осадков равное 755,7 мм.

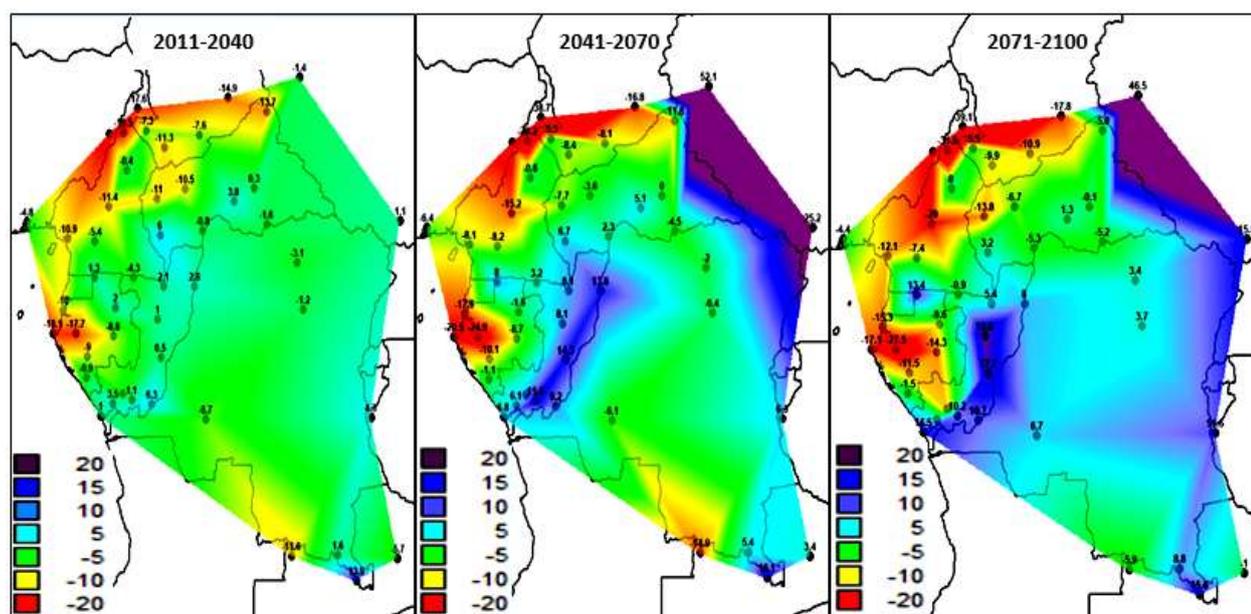


Рисунок 5.2. Пространственные распределения сценарных осадков сентября в % от современного (1981-2005 гг.) для Центральной Африки по модели NorESM1 и сценарию RCP 4,5 Вт/м²

Из пространственных распределений рис. 5.2 следует, что в период до 2040 г. ожидается уменьшение осадков на всей территории Центральной Африки. Наибольшее снижение (до -21%) произойдет на севере и западе. В то же время в экваториальных лесных районах внутренних областей Конго и на

востоке в горных районах ожидается увеличение количества осадков, которое будет распространяться от этих районов на восток и уже к концу века охватит более половины территории Центральной Африки, достигнув +19,8% во внутренних областях Демократической Республики Конго. Наибольшее уменьшение к концу века будет наблюдаться на северо-западе до -39%.

Пространственные распределения осадков января (в мм), как самого представительного месяца сухого сезона года, за современный и 3 будущих периода времени приведены на рис. 5.3.

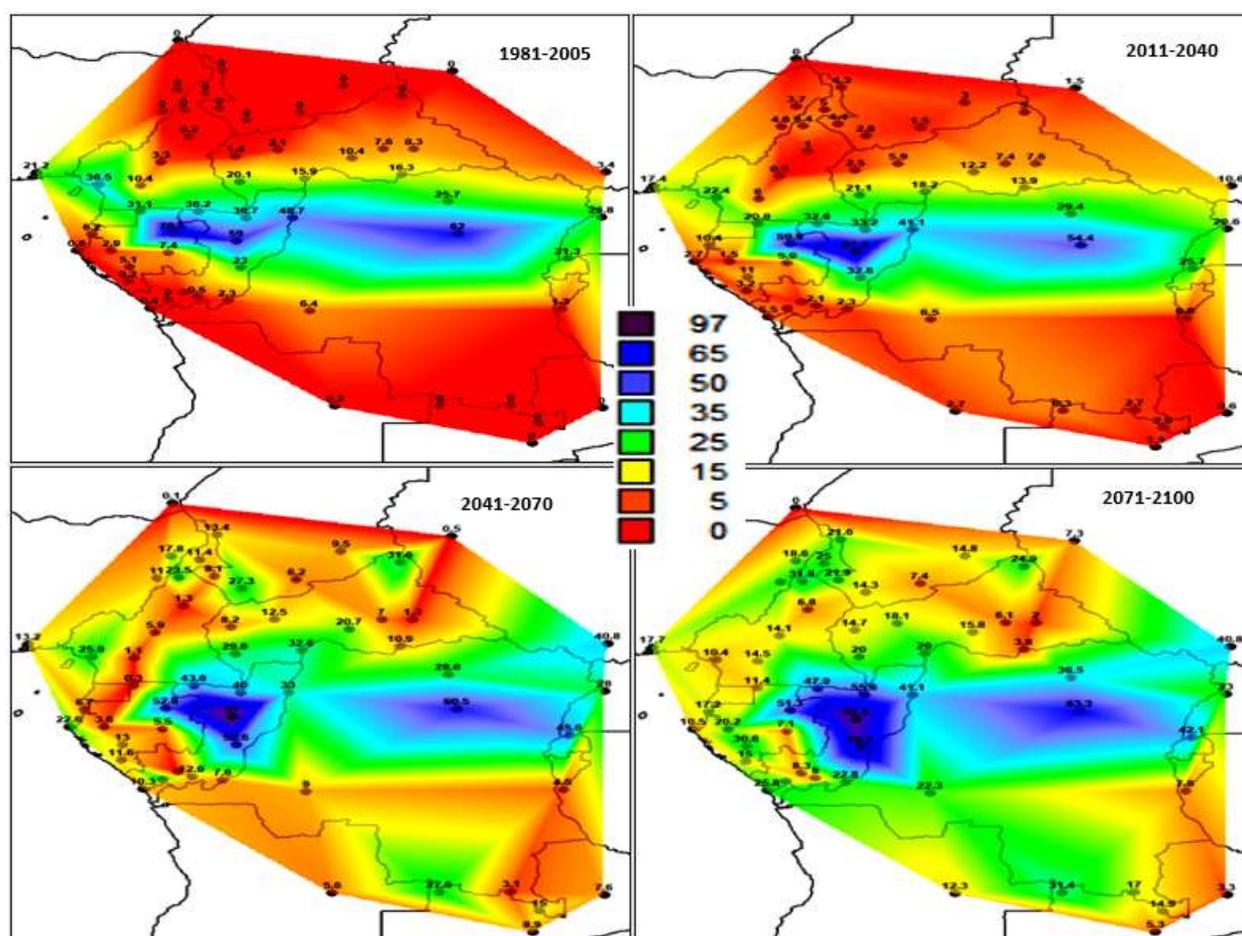


Рисунок 5. 3. Пространственные распределения осадков января (в мм) современного и будущих периодов времени для Центральной Африки по модели NorESM1 и сценарию RCP 4,5 Вт/м²

Как видно из рис. 5.3, в сухой период года, характеризующийся первой фазой африканского муссона, в настоящее время (1981—2005 гг.) на севере и юге страны выпадает очень мало осадков (до 0 мм), а наибольшее количество

осадков (до 70,5 мм) наблюдается в центральном регионе вдоль экватора. Начиная с периода 2011—2040 гг, области с низким количеством осадков от 0 до 5 мм будут постепенно уменьшаться и к концу XXI века практически во всех засушливых районах Центральной Африки осадки вырастут до 15 мм. Большие осадки сухого периода (>35 мм) в экваториальной полосе (голубой и синий цвета на рис.5.3) также будут увеличиваться как по величине, так и охватывать большую площадь. Территориальные максимумы осадков вырастут с 70,5 мм в современный последний период до 92,3 — 97 мм во второй половине XXI века.

5.6 Выводы по 5-ой главе

В результате проведенного исследования в качестве наиболее подходящей для воспроизведения осадков на территории Центральной Африки выбрана физико-математическая модель NorESM1 Норвежского климатического центра, которая имеет среднее по территории и в среднем для всех месяцев дождливого сезона отличие от данных наблюдений в 39,7%. Однако, внутри дождливого сезона отличия по модулю варьируют от 34,9% до 44,2%, а по территории от +90% до -90%, что обусловлено локальными особенностями.

Для выбранной климатической модели были получены сценарные оценки осадков, в которые внесены поправки, основанные на объединении градиентов изменения осадков как в настоящем, так в будущем. Для влажного сезона года на примере осадков сентября и сценария RCP 4,5 получено, что по отношению к современным будет иметь место уменьшение осадков на северо-западе (области близкие к Сахели и Гвинейскому заливу) до 30—40%, а рост осадков до 40—50% от современных будет наблюдаться на востоке территории. В январе, как самом представительном месяце сухого сезона года области с малым количеством осадков от 0 до 5 мм на севере и юге территории будут постепенно уменьшаться и к концу XXI века практически во всех засушливых районах Центральной Африки осадки вырастут до 15 мм.

Большие осадки сухого периода (>35 мм) в экваториальной полосе также будут увеличиваться как по величине при росте территориальных максимумов с 70 мм до 90 мм, так и охватывать большую площадь.

6 Заключение

Основная цель данной диссертации, которая является частью более широкого комплекса исследований по изменению климата, заключается в анализе влияния изменений окружающей среды на Центральную Африку в течение 20-го века и прогнозировании будущего до конца 21-го века. Цель исследования — смоделировать климат с помощью двух нестационарных моделей среднего: модели линейного тренда и модели ступенчатого изменения; количественно оценить изменения климата в течение 20 века и оценить его динамику до конца 21 века. Для достижения этих целей в исследовании использовались данные наблюдений в регионе и смоделированные данные исторических экспериментов и будущих сценариев глобальных климатических моделей CMIP.

Изучение текущих колебаний температуры воздуха в Центральной Африке показывает, что изменения средних значений произошли во второй половине 20-го века, с середины 1970-х до начала 2000-х годов. Наибольшее повышение температуры произошло в северных регионах, достигнув $2,4^{\circ}\text{C}$, а наименьшее — в центральных регионах, особенно в тропических лесах, не превысив $0,6^{\circ}\text{C}$. Однако после изучения влияния современного изменения климата на количество осадков в центральной Африке стало ясно, что распределение осадков в течение года не является равномерным, поскольку здесь наблюдаются как влажные, так и сухие периоды. Для месяцев сезона дождей в регионе наблюдается общая тенденция к уменьшению количества осадков, причем наибольшее снижение достигает 60-130 мм в августе в западной части территории, хотя в некоторых районах наблюдается увеличение количества осадков, до 50—68 мм, в основном в горных районах.

Сухие месяцы года (декабрь - февраль) также характеризуются статистически незначительным уменьшением количества осадков на большей части центральной Африки, за исключением районов вблизи Гвинейского залива, где в январе наблюдается увеличение количества осадков более чем на 1,0 и даже 2,0 СКО.

При анализе будущего климата Центральной Африки было установлено, что модели CMIP5 и CMIP6 дают схожие результаты по сравнению с историческими наблюдениями. Поэтому для будущих оценок следует рассматривать оба набора сценариев. На основе сценария 4.5 прогнозируется, что к концу столетия в Центральной Африке произойдет глобальное повышение температуры на 2°C — 3°C. В сезон дождей ожидается уменьшение количества осадков на 30—40% в северо-западном регионе, в то время как на востоке — увеличение на 40—50%. Во время сухого сезона области с малым количеством осадков будут постепенно уменьшаться, и к концу 21 века количество осадков увеличится до 15 мм в большинстве засушливых районов Центральной Африки. Наконец, ожидается, что в сухой период количество осадков >35 мм в экваториальном поясе увеличится до 70—90 мм, охватывая более обширную территорию.

7 Список литературы

1. В.А. Лобанов, Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха. Сборник работ по гидрологии, №27, 2004, С.-Петербург, Гидрометеоздат, с. 54-68.
2. Второй оценочный доклад РосГидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: ГУ ВНИИГМИ-МЦД. 2018. 1400 с.
3. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
4. Лобанов, В.А. Лекция по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. Кн. 1. В 2 кн.: – СПб.: РГГМУ, 2016. – 332 с.
5. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
6. Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн. 2. СПб.: РГГМУ, 2018. 377 с.
7. Лобанов В. А. Учебное пособие по региональной климатологии. СПб.: РГГМУ, 2020. 170 с.
8. Лобанов В. А., Лемешко Н. А., Жильцова Е. Л., Горлова С. А., Ренева С. А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2005. No 2. С. 5—14.
9. Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
10. Лобанов В. А., Тоцакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. Пермский университет. 2016. No 3(38). С. 79—89.
11. Лобанов В. А., Кириллина К. С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
12. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн.2. СПб. РГГМУ, 2018. 377 с.
13. Лобанов В.А., И.А.Смирнов. А.Е.Шадурский. Практикум по климатологии. Часть 1. (учебное пособие). Санкт-Петербург, 2011. – 144 с.
14. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
15. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб, РГГМУ, 2008. 408 с.
16. Определение основных расчетных гидрологических характеристик [Текст]: СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с

17. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
18. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 64 с.
19. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
20. About the WCRP CMIP5 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI: http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php
21. Acero F. G., Gracia J. A., Gallego M. C. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24, No 4. P. 1089—1105.
22. Aguilar E., Aziz Barry A., Brunet M., Ekan L., Fernandes A., Massoukina M., Zhang X. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. 114(D2).
23. Aloysius, N. R. et al., 2016: Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in central Africa from CMIP5 climate models. *J Geophys Res-Atmos*, 121(1), 130-152, doi:10.1002/2015JD023656. Alsdorf, D. et al., 2016: Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin. *Reviews of Geophysics*, 54(2), 378-409, doi:10.1002/2016rg000517
24. Amraoui L. Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008) // Thèse de l'Université Jean Moulin — Lyon III. 2011. 43 p.
25. Amraoul L. Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest // *Publication IAHS*. 2010. Vol. 340. P. 513—520.
26. Arona Diedhiou, Adeline Bichet, Richard Wartenburger, Sonia I Seneviratne, David P ; Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming. 20 June 2018.
27. Atmospheric Model Intercomparison Project: <http://www.pcmdi.llnl.gov/projects/amip/index.php>
28. Ayugi, B.; Jiang, Z.; Zhu, H.; Ngoma, H.; Babaousmail, H.; Karim, R.; Dike, V. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East Africa. *Int. J. Climatol*. 41, 6474–6496.
29. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat // Secrétariat du GIEC. 2008. Genève. 236 p.

30. Barbier, J. et al., 2018: Detection of Intraseasonal Large-Scale Heat Waves: Characteristics and Historical Trends during the Sahelian Spring. *Journal of Climate*, 31(1), 61-80, doi:10.1175/JCLI-D-17-0244.1.
31. Bourdeau-Goulet, S. C., & Hassanzadeh, E. (2021). Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models: Simulations of climate indices influencing food security, infrastructure resilience, and human health in Canada. *Earth's Future*, 9(5), e2021EF001995.
32. Camberlin P. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intra saisonnière // HAL Id: hal-00320705. 14 Dec 2010. P. 25—39.
33. Camberlin, Pierre. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intrasaisonnière. In : L'Afrique Centrale, le Cameroun et les changements globaux. 2007. p. 25-39.
34. Chen, C.-A.; Hsu, H.-H.; Liang, H.-C. (2021). Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the Western North Pacific and East Asia. *Weather Clim. Extrem.* 31, 100303.
35. Chen, D. et al., 2021: Framing, Context, and Methods [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (ed.)]. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In Press, Cambridge University Press. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_01.pdf
36. Christy, J.R., W.B. Norris, and R.T. McNider, 2009: Surface temperature variations in east Africa and possible causes. *Journal of Climate*, 22(12), 3342-3356.
37. Collins, J.M., 2011: Temperature variability over Africa. *Journal of Climate*, 24(14), 3649-3666.
38. Collins, M. et al., Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2013).
39. Coppola, E. et al., 2014: Present and future climatologies in the phase I CREMA experiment. *Climatic Change*, 125(1),23-38, doi:10.1007/s10584-014-1137-9.
40. Coulibaly, Jeanne Y., Chiputwa, Brian, Nakelse, Tebila, et al. Adoption of agroforestry and the impact on household food security among farmers in

- Malawi. *Agricultural systems*, 2017, vol. 155, p. 52-69, doi:<https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.03.017>.
41. Creese, A. et Washington, R. A process-based assessment of CMIP5 rainfall in the Congo Basin: the September–November rainy season. *Journal of Climate*, 2018, vol. 31, no 18, p. 7417-7439.
 42. De Wasseige, Carlos, et al. *Les forêts du Bassin du Congo-Forêts et changements climatiques*. Weyrich, 2015.
 43. Diallo, I. et al., 2016: Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century. *Clim Dyn*, 47(12), 3931-3954, doi:10.1007/s00382-016-3052-4.
 44. Diedhiou A., Bichet A, Wartenburger R., Seneviratne S.I., David P. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming // *Nature*. 2018. No 529. P. 477—483.
 45. Doblans-Reyes, F. J. et al., 2021: Linking Global to Regional Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (ed.)]. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In Press, Cambridge University Press. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_10.pdf
 46. Dosio, A. et al., 2019: What can we know about future precipitation in Africa? Robustness, significance and added value of projections from a large ensemble of regional climate models. *Clim Dyn*, doi:10.1007/s00382-019-04900 3.
 47. *Etat du climat en Afrique 2019*. Organisation Météorologique Mondiale ; OMM-N° 1253 ISBN 978-92-63-21253-5 <https://knowledge-uclga.org/etat-du-climat-en-afrique-2019.html>
 48. Flato, G. et al., *Evaluation of Climate Models*, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2013). Change, Cambridge.
 49. Folland C. K., et al., 2013 High predictive skill of global surface temperature a year ahead. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 761–767.
 50. Fotso-Nguemo, T. C. et al., 2017: On the added value of the regional climate model REMO in the assessment of climate change signal over Central Africa. *Clim Dyn*, 49(11-12), 3813-3838, doi:10.1007/s00382-017-3547-7.
 51. Funk, C., J. Michaelsen, and M. Marshall, 2012: Mapping recent decadal climate variations in precipitation and temperature across Eastern Africa and the Sahel. In: *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*

- [Wardlow, B.D., M.C. Anderson, and J.P. Verdin (eds.)]. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 331-358.
52. Gates W.L., 1992: AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, p. 1962-1970.
 53. GIEC, 2013 : Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États Unis, 1535 p.
 54. GIEC, 2021 : Résumé à l'intention des décideurs. Dans : Changements climatiques 2021 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu et B. Zhou (éd.)]. Cambridge University Press. Sous presse.
 55. Grab, S. and A. Craparo, 2011: Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape, South Africa: 1973-2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 406-413.
 56. Grossman D. The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change. 2020. 49 p.
 57. Gutiérrez et al., 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Press, Cambridge University Press. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Atlas.pdf
 58. Hamed M. M., Nashwan M. S. et Shahid S. (2022). A novel selection method of CMIP6 GCMs for robust climate projection. *International Journal of Climatology*, vol. 42, no 8, p. 4258-4272.
 59. Hamed, M. M., Nashwan, M. S., Shahid, S., bin Ismail, T., Wang, X. J., Dewan, A., & Asaduzzaman, M. (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265, 105927.
 60. Harrington, L. J. et al., 2016: Poorest countries experience earlier anthropogenic emergence of daily temperature extremes. *Environmental Research Letters*, 11(5), 055007, doi:10.1088/1748-9326/11/5/055007.

61. Hartmann, D.L. (2016). Chapter 11—Global Climate Models. In *Global Physical Climatology*, 2nd, ed.; Elsevier: Boston, MA, USA, pp. 325–360. ISBN 978-0-12-328531-7.
62. Hoffman, M.T., M.D. Cramer, L. Gillson, and M. Wallace, 2011: Pan evaporation and wind run decline in the Cape Floristic Region of South Africa (1974-2005): implications for vegetation responses to climate change. *Climatic Change*, 109(3-4), 437-452.
63. Homar V., Ramis C., Romero R., Alonso S. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain) // *Climatic Change*. 2010. Vol. 98. P. 199—211.
64. Hu, L., J.-J. Luo, G. Huang and M. C. Wheeler, 2019: Synoptic Features Responsible for Heat Waves in Central Africa, a Region with Strong Multidecadal Trends. *Journal of Climate*, 32(22), 7951-7970, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0807.1>.
65. Hua, Wenjian, Zhou, Liming, Chen, Haishan, et al. Possible causes of the Central Equatorial African long-term drought. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, no 12, p. 124002.
66. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New, M., Lister D. African climate change: 1900—2100 // *Climate research*. 2001. Vol. 17(2). P. 145—168.
67. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change: the scientific basis. In *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK, 944.
68. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2013. The physical science basis. In *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley (eds). Cambridge University Press: Cambridge, p 1552.
69. IPCC Standard Output from Coupled Ocean-Atmosphere GCMs: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html#Experiments.
70. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
71. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 pp.
72. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY // USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
 73. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press. 3949 p.
 74. IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09.pdf AFRICA section 9.5 https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter09.pdf
 75. Jones, P.D. and A. Moberg, 2003: Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16(2), 206-223.
 76. Kamga, F. M. (2000). Validation of general circulation climate models and projections of temperature and rainfall changes in Cameroon and some of its neighbouring areas. *Theoretical and applied climatology*, 67(1), 97-107.
 77. Kaufmann R. K., H. Kauppi, and J. H. Stock, 2006: Emission, concentrations, & temperature: A time series analysis. *Clim. Change*, 77, 249–278.
 78. Kaufmann R. K., H. Kauppi, M. L. Mann, and J. H. Stock, 2011: Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 108, 11790–11793.
 79. Kaufmann R. K., H. Kauppi, M. L. Mann, and J. H. Stock, 2013: Does temperature contain a stochastic trend: Linking statistical results to physical mechanisms. *Clim. Change*, doi:10.1007/s10584-012-0683-2.
 80. KOUAKOU, Koffi Eugene, KOUADIO, Zile Alex, KOUASSI, Francis William, et al. Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique: cas de l’Afrique de l’Ouest. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 2014, vol. 10, n°1.
 81. Kruger, Andries C. et Shongwe, Stephen. Temperature trends in south africa: 1960–2003. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, vol. 24, no 15, p. 1929-1945.
 82. Lean J. L., 2006: Comment on “Estimated solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite composite” by N. Scafetta and B. J. West. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15701.
 83. Lean J. L., and D. H. Rind, 2008: How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L18701.

84. Lean J. L., and D. H. Rind, 2009: How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophys. Res.*, L15708.
85. LEDUC-LEBALLEUR, Marion. Influence océanique du golfe de Guinée sur la mousson en Afrique de l'Ouest. 2012. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
86. Lockwood M., and C. Fröhlich, 2007: Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature *Proc. R. Soc. London A*, 463, 2447–2460.
87. Lockwood M., and C. Fröhlich, 2008: Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature: II. Different reconstructions of the total solar irradiance variation and dependence on response time scale. *Proc. R. Soc. London A*, 464, 1367–1385.
88. Lockwood M., 2008: Recent changes in solar outputs and the global mean surface temperature. III. Analysis of contributions to global mean air surface temperature rise. *Proc. R. Soc. London A*, 464, 1387–1404.
89. Lockwood M., 2012: Solar influence on global and regional climates. *Surv. Geophys.*, 33, 503–534.
90. Lun, Y.; Liu, L.; Cheng, L.; Li, X.; Li, H.; Xu, Z. (2021). Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *Int. J. Climatol.*, 41, 3994–4018.
91. Maidment, Ross I., ALLAN, Richard P., et BLACK, Emily. Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, no 19, p. 8155-8164.
92. Makanga, Jean Damien Maloba et Samba, Gaston. Organisation pluviométrique de l'espace Congo-Gabon (1951-1990). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 1997, vol. 8, no 1, p. 39-45.
93. Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U. et Mix, A.C., A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science* 339, 1198–1201 (2013).
94. Masson-Delmotte, V. et al., Information from Paleoclimate Archives, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press (2013).
95. MBA, Wilfried Pokam, LONGANDJO, Georges-Noel T., MOUFOUMA-OKIA, Wilfran, et al. Consequences of 1.5 C and 2 C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no 5, p. 055011.
96. Moench, M., 2011: Aren't We All Vulnerable: Why Do Vulnerability Analysis? IIED Opinion: Lessons from Adaptation in Practice Series, November 2011, International Institute for Environment and Development (IIED), London, UK, 2 pp.

97. Mora, C. et al., 2017: Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501-506, doi:10.1038/nclimate3322.
98. Moron, V. et al., 2016: Trends of mean temperatures and warm extremes in northern tropical Africa (1961-2014) from observed and PPCA-reconstructed time series. *J Geophys Res-Atmos*, 121(10), 5298-5319, doi:10.1002/2015jd024303.
99. Mouhamed, L., S. B. Traore, A. Alhassane and B. Sarr, 2013: Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, 1, 19-25, doi:10.1016/j.wace.2013.07.005.
100. Nashwan, M.S.; Hamed, M.M.; Shahid, S. (2022). Inter-comparison of Historical Simulation and Future Projection of Rainfall and Temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs Over Egypt. *Int. J. Climatol.* 42, 4316–4332.
101. Nashwan, M.S.; Shahid, S. (2022). Future precipitation changes in Egypt under the 1.5 and 2.0 °C global warming goals using CMIP6 multimodel ensemble. *Atmos. Res.*, 265, 105908.
102. New, M., B. Hewitson, D.B. Stephenson, A. Tsiga, A. Kruger, A. Manhique, B. Gomez, C.A.S. Coelho, D.N. Masisi, E. Kululanga, E. Mbambalala, F. Adesina, H. Saleh, J. Kanyanga, J. Adosi, L. Bulane, L. Fortunata, M.L. Mdoka, and R. Lajoie, 2006: Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 111(D14), D14102, doi:10.1029/2005JD006289.
103. New, Mark, Todd, Martin, Hulme, Mike, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, vol. 21, no 15, p. 1889-1922.
104. Nicholson, S. E., Klotter, D., Dezfuli, A. K., et al. New rainfall datasets for the Congo Basin and surrounding regions. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, vol. 19, no 8, p. 1379-1396.
105. Nicholson, S.E., D.J. Nash, B.M. Chase, S.W. Grab, T.M. Shanahan, D. Verschuren, A. Asrat, A.-M. Lézine, and M. Umer, 2013: Temperature variability over Africa during the last 2000 years. *Holocene*, 23(8), 1085-1094.
106. Ortega, G.; Arias, P.A.; Villegas, J.C.; Marquet, P.A.; Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int. J. Climatol.*, 41, 6713–6735.
107. Peel, Murray C., FINLAYSON, Brian L., et MCMAHON, Thomas A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 2007, vol. 11, no 5, p. 1633-1644.
108. Peya, Michel Innocent. "La planète poignardée et menottée : Denis Sassou N'Guesso au secours d'un monde dans le coma." *La planète poignardée et menottée* (2020): 1-181.

- 109.** Pinto, I. et al., 2015: Evaluation and projections of extreme precipitation over southern Africa from two CORDEX models. *Climatic Change*, 135(3-4), 655-668, doi:10.1007/s10584-015-1573-1.
- 110.** Pokam W., Longandjo G.-N., Moufouma-Okia T., Wilfran, et al. Consequences of 1.5 °C and 2 °C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13, No 5. P. 55—81.
- 111.** Premier rapport d'évaluation stratégique sous-régionale du pnud, mars 2017 ; p 6-9.
https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/africa/UNDP_RBA_Central-Africa-Strategy_mar-2017_FR_web.pdf
- 112. Ranasinghe et al., 2021:** Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment [Masson Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (ed.)].
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter12.pdf
- 113.** Regimes et bilans hydrologiques de l'afrique centrale. jp. bricquet, les apports a l'ocean, du golfe du biafra a la pointa do dande ; p 42.
- 114.** Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, and P. Tryjanowski, 2007: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 79-131.
- 115.** Russo, S., A. F. Marchese, J. Sillmann and G. Immé, 2016: When will unusual heat waves become normal in a warming Africa? *Environmental Research Letters*, 11(5), 054016, doi:10.1088/1748-9326/11/5/054016.
- 116.** Schreck, C.J. and F.H.M. Semazzi, 2004: Variability of the recent climate of eastern Africa. *International Journal of Climatology*, 24(6), 681-701.
- 117.** Seneviratne S I, Donat MG, Pitman AJ, Knutti R and Wilby R L 2016 Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets *Nature* 529 477–83
- 118.** Seneviratne, S. I. et al., 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (ed.)]. *Climate Change 2021: The Physical Science*

Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In Press, Cambridge University Press. Available at:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_11.pdf.

119. Shiru, M.S.; Chung, E.S.; Shahid, S.; Wang, X. jun (2022). Comparison of precipitation projections of CMIP5 and CMIP6 global climate models over Yulin, China. *Theor. Appl. Climatol.*, 147, 535–548.
120. Song, Y.H.; Chung, E.S.; Shahid, S. (2021). Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models. *Int. J. Climatol.*, 41, 5899–5919.
121. 108. Song, Y.H.; Nashwan, M.S.; Chung, E.S.; Shahid, S. (2021). Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea. *Atmos. Res.*, 247, 105261.
122. Spinoni, J. et al., 2020: Future Global Meteorological Drought Hot Spots: A Study Based on CORDEX Data. *Journal of Climate*, 33(9), 3635-3661, doi:10.1175/JCLI-D-19-0084.1.
123. Spinoni, Jonathan, Naumann, Gustavo, Carrao, Hugo, et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 2014, vol. 34, no 8, p. 2792-2804.
124. Stern, D.I., P.W. Gething, C.W. Kabaria, W.H. Temperley, A.M. Noor, E.A. Okiro, G.D. Shanks, R.W. Snow, and S.I. Hay, 2011: Temperature and malaria trends in highland East Africa. *PLoS ONE*, 6(9), e24524, doi:10.1371/journal.pone.0024524.
125. Stratton, R. A. et al., 2018: A Pan-African convection-permitting regional climate simulation with the met office unified model: CP4-Africa. *Journal of Climate*, 31(9), 3485-3508, doi:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0503.1.
126. Sylla, M. B., N. Elguindi, F. Giorgi and D. Wisser, 2015a: Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change*, 134(1-2), 241-253, doi:10.1007/s10584-015-1522-z.
127. Tamoffo, A. T. et al., 2019: Daily characteristics of Central African rainfall in the REMO model. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3-4), 2351-2368, doi:10.1007/s00704-018-2745-5.
128. Taylor K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
129. Thiery, W. et al., 2021: Age-dependent extreme event exposure. *Science* (New York, N.Y.).

- 130.** The Washington Post, Grossman, Daniel (4 March 2020). "The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change".
- 131.** Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden, and P. Zhai, 2007: Observations: surface and atmospheric climate change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 236-336.
- 132.** Tsalefac, M., Hiol Hiol, F., Mahé, G., Laraque, A., Sonwa, D. J., Scholte, P., ... & Doumenge, C. (2015). *Climat de l'Afrique centrale : passé, présent et futur*
- 133.** Vissin E. W. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat. Hydro climatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie // CNRS—UMR 5210, version 1 — 11 Feb. 2010. 285 p.
- 134.** WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6) : <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
- 135.** 106. Weigel, A.P.; Knutti, R.; Liniger, M.A.; Appenzeller, C. (2010). Risks of model weighting in multimodel climate projections. *J. Clim.*, 23, 4175–4191.
- 136.** Wilfried Pokam Mba et al 2018 *Environ. Res. Lett.* 13 055011, DOI 10.1088/1748-9326/aab048.
- 137.** Zamani, Y.; Hashemi Monfared, S.A.; Azhdari Moghaddam, M.; Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: The case of Northeastern Iran. *Theor. Appl. Climatol.*, 142, 1613–1623.
- 138.** Zhou, Liming, TIAN, Yuhong, Myneni, Ranga B., et al. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 2014, vol. 509, no 7498, p. 86-90.
- 139.** <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>
- 140.** <http://www.pogodsiklimat.ru>
- 141.** <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/> Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел « Доступ к данным ».