

На правах рукописи

Мами Магбини Токпа

**КЛИМАТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ И ЕГО
ИЗМЕНЕНИЯ**

Специальность 1.6.18.– Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель: **Лобанов Владимир Алексеевич**
Доктор технических наук, профессор
кафедры метеорологии, климатологии
и охраны атмосферы РГГМУ

Официальные оппоненты: **Павловский Артем Александрович**,
доктор географических наук, и.о.
заведующего кафедрой климатологии и
мониторинга окружающей среды
Института наук о Земле СПбГУ,
г.Санкт-Петербург

Горошкова Наталия Ивановна,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Отдела
гидрофизики Федерального государ-
ственного бюджетного учреждения
«Государственный гидрологический
институт», г.Санкт-Петербург

Ведущая организация: Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышев-
ского, г. Саратов

Защита состоится «___» _____ 2023 г. в ___ часов ___ минут на
заседании диссертационного совета ДС 24.2.365.02 в Российском
государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196,
г.Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
государственного гидрометеорологического университета и на официальном
сайте ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический
университет» по адресу: <https://www.rshu.ru/university/dissertations/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

Т.С.Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 CO_2 , 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 среднемесячных температур воздуха и сумм 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 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 СМIP5 и СМIP6 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 подходящей 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.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 1.6.18 – 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи исследования, определяются объект и предмет исследования. Перечисляются основные положения, выносимые на защиту, и основные методы исследования, использованные в работе.

В первой главе представлен обзор текущего изменения климата в Центральной Африке. В ней описывается территория исследования, общие климатические условия и различные характеристики климатических условий в Центральной Африке. Также представлен краткий обзор результатов исследований современного изменения климата в Центральной Африке, индикаторы изменения климата и причины глобального потепления климата. Выбраны 65 пунктов наблюдений, приведенные на рис.1.

Во второй главе проведено исследование современных климатических изменений температуры воздуха в Центральной Африке. Из-за большой неопределенности результатов, ранее полученных для региона Центральной Африки, в работе проведена комплексная оценка качества данных наблюдений и изменения температуры в этом регионе с помощью статистических методов и моделей.

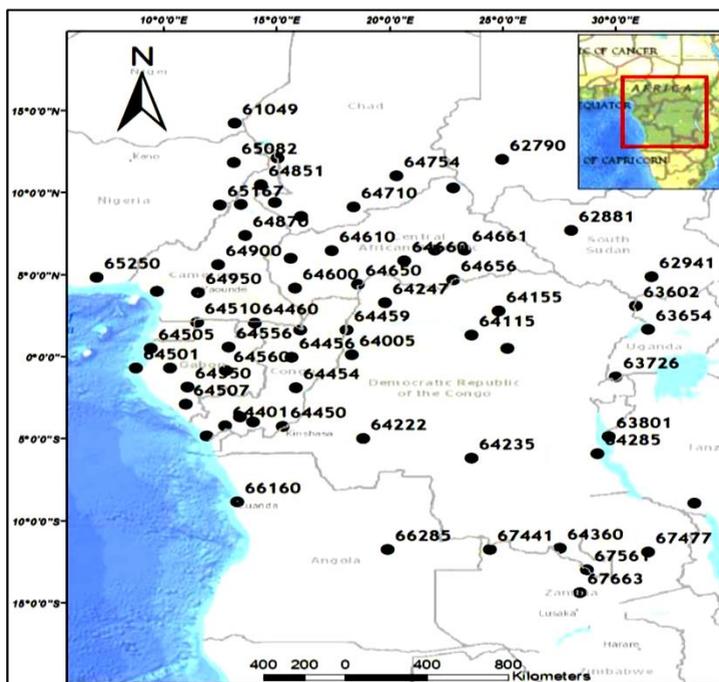


Рис. 1. Схема расположения метеостанций.

Данные наблюдений крайне неоднородны во времени и по пространству, и самые ненадежные наблюдения имеютсся на территории Демократической Республики Конго, которая занимает почти половину Центральной Африки. Для формализованной оценки однородности и качества данных были применены статистические критерии Диксона и Смирнова—Грabbса для оценки однородности экстремумов эмпирических распределений и статистические критерии Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух одинаковых частей временного ряда. 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 были привлечены в качестве аналогов при приведении к многолетнему периоду.

Результаты оценки стационарности на 87 метеостанциях 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. Полученные статистически значимые неоднородные экстремумы при уровне значимости 5 % были исключены из рядов наблюдений, чтобы не исказить выявление долгопериодной тенденции изменения климата. 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.

Осуществлялась аппроксимация многолетних временных рядов моделями нестационарного среднего двух видов: линейный тренд и ступенчатые изменения среднего значения. Оценивалась эффективность этих моделей по отношению к модели стационарной выборки и устойчивость путем задания разных лет начала наблюдений (1900, 1920, 1940, 1960, 1980, 2000 гг.) и определения года наиболее вероятного перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{стр}$). Относительные разности между стационарной моделью и моделями линейного тренда и ступенчатых изменений $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ступ}$ определялись как:

$$\Delta_{тр} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \right) * 100\% \quad (1)$$

$$\Delta_{ступ} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{ступ}}{\sigma_y} \right) * 100\% , \quad (2)$$

где σ_y – стандартное отклонение исходного ряда (СКО) или стандарт остатков для модели стационарного среднего; σ_ε , $\sigma_{ступ}$ – стандартные отклонения остатков относительно моделей линейного тренда и ступенчатых изменений.

Установлено, что изменения среднего значения происходили во второй половине XX века в период от середины 1970х до начала 2000х и модель ступенчатых изменений среднего значения более эффективна, чем модель тренда (Таблица 1, в которой $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ – показатели нестационарности модели и r – коэффициенты корреляции модели линейного тренда.

Таблица 1.

Результаты оценки устойчивости параметров моделей для 30 наиболее продолжительных рядов

Месяцы	$\Delta_{тр}$		$\Delta_{ст}$		r		
	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	С 1960	С 1970
1	7,0	10,0	1,1	13,2	0,06	0,29	0,37
2	8,8	10,9	0,8	14,3	0,13	0,35	0,34
3	9,9	11	1,5	15,1	0,08	0,39	0,42
4	8,9	10,6	1,1	14,7	0,13	0,33	0,36
5	7,2	10,3	1,3	15,9	0,09	0,33	0,45
6	9,2	11,9	0,1	15,7	0,24	0,4	0,46
7	7,0	16,6	0,5	20,4	0,18	0,48	0,55
8	6,2	13,9	1,0	18,2	0,08	0,41	0,47
9	5,7	12,4	0,3	18,0	0,03	0,35	0,41
10	7,2	11,0	0,2	17,6	0,04	0,31	0,39
11	9,1	13,0	1,1	18,1	0,02	0,38	0,49
12	7,8	10	1,0	15,2	0,1	0,3	0,44
среднее	7,8	11,8	0,8	16,4	0,10	0,36	0,43

Из данных таблицы 1 следует, что 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.

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. (рис.2).

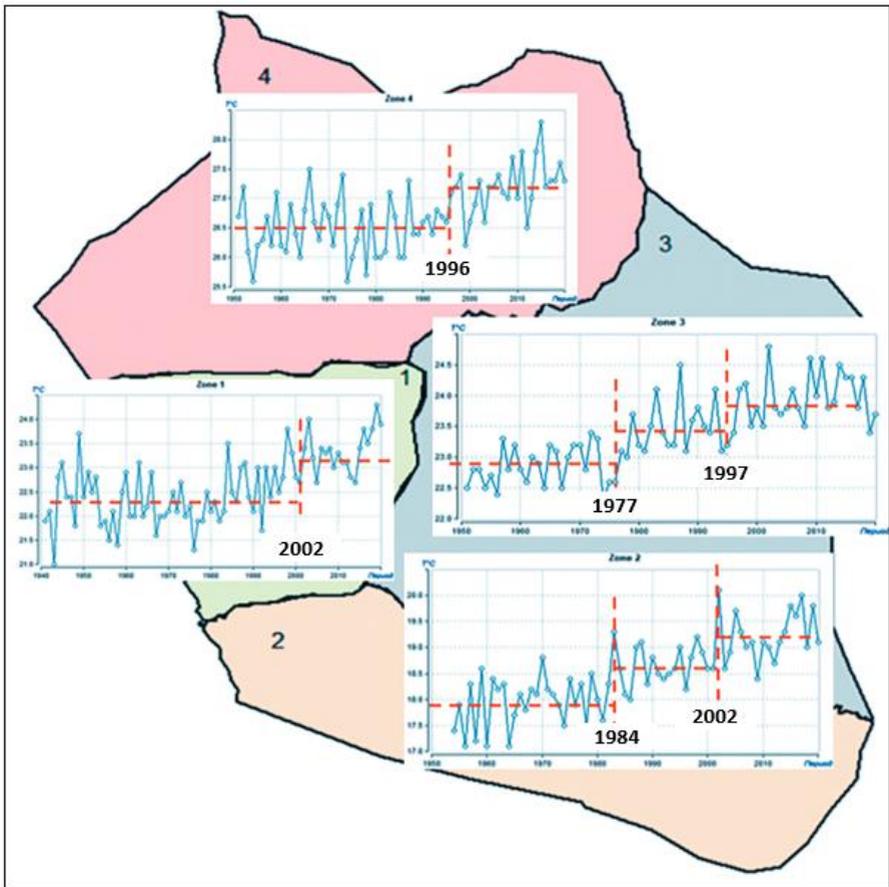


Рис. 2. Изменения средних температур воздуха в однородных районах.

При количественной оценке роста температур на основе вида модели за каждый период до и после установленного года ступенчатых изменений $T_{ст}$, было получено, что, во все сезоны года в южных горных и восточных районах территории был наибольший подъем температур до $2,0—2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что составляет $1,7—2,1$ СКО. В летний муссон к области высокого роста температур до $1,5—1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ добавляется также прибрежная западная полоса за счет влажных и теплых воздушных масс с Атлантики, где ТПО растет. Еще одна область большого роста температур на севере до $2,2—2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет место 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.

Третья глава посвящена оценке современных изменений атмосферных осадков в Центральной Африке. Для оценки современных изменений количества осадков были рассмотрены многолетние ряды сумм осадков за каждый месяц с начала наблюдений до 2022 года включительно на 57 метеорологических станциях в пределах и за пределами границ региона.

Пространственные распределения многолетних сумм осадков за каждый месяц года показали (рис.3), что 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.

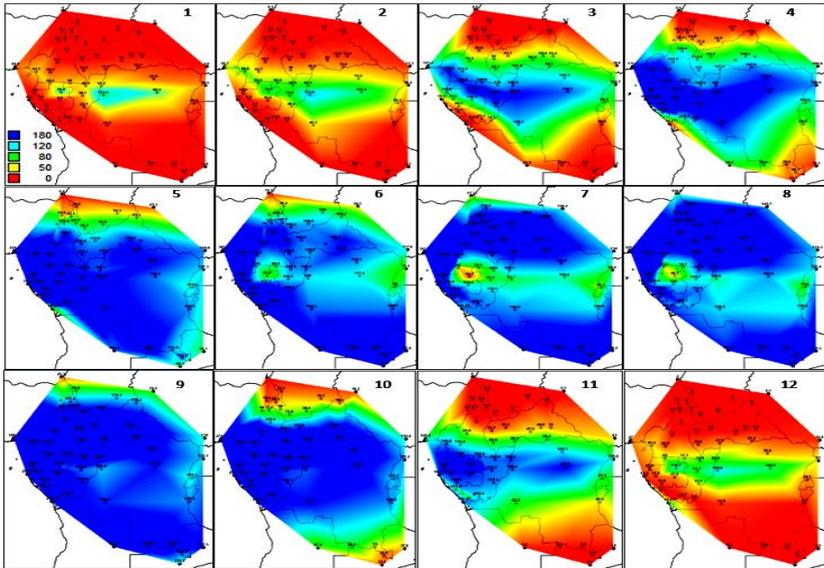


Рис. 3. Пространственные распределения средних многолетних значений осадков в центральной Африке

Этот период года характеризуется африканским зимним муссоном, когда холодный, сухой воздух из Северной Африки движется на юг вслед за смещения внутритропической зоны

конвергенции (ВЗК). 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 были определены районы, однородные по типу этих распределений.

Средние многолетние внутригодовые распределения осадков в соответствии с началом и окончанием влажного и сухого периодов были объединены в 4 однородные района, как показано на рисунке 4.

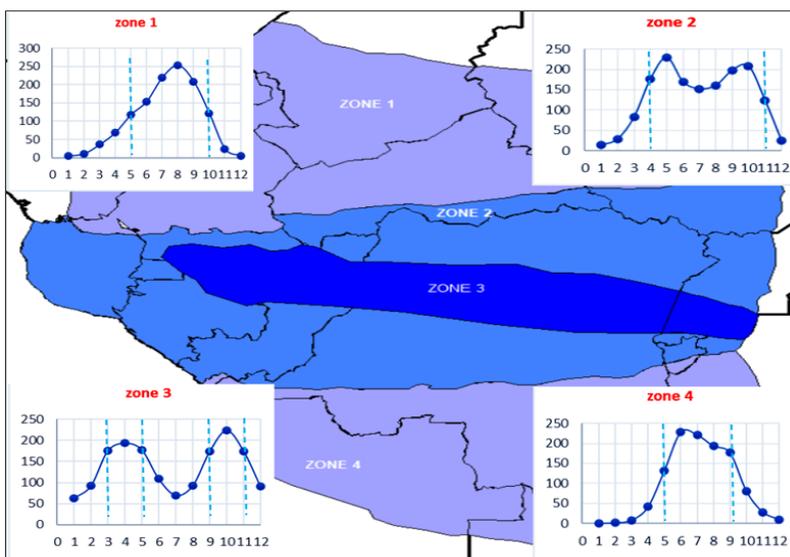


Рис. 4. Внутригодовые климатические распределения осадков в выделенных однородных районах на территории Центральной Африки.

Из рис. 4. 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.

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.

Для оценки вида изменений в многолетних рядах 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.

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 (рис.5). 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.

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 (рис.6).

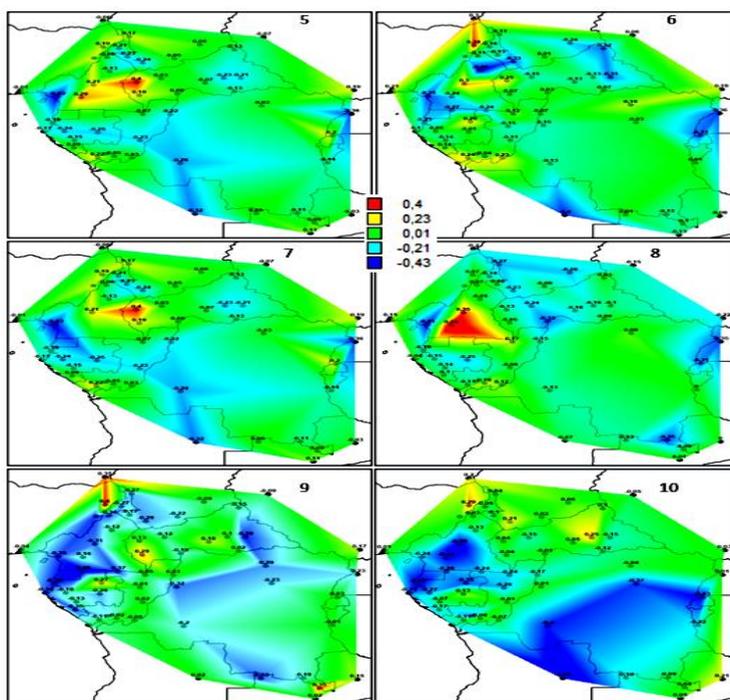


Рис. 5. Пространственные распределения коэффициентов корреляции модели линейного тренда для месяцев влажного сезона.

Четвертая глава посвящена сравнению наблюдений метеорологических станций с результатами исторических экспериментов, охватывающих период 1850-2005 гг. для проекта СМIP5 и 1850-2014 гг. для СМIP6, а также с оценками сценариев проектов СМIP5 и СМIP6 с целью оценки будущих температур воздуха в Центральной Африке на период до 2100 года. Для этой цели были выбраны глобальные климатические модели: IPSL (французская модель института Лапласа) и BCC (модель пекинского климатического центра, Китай) как наиболее оптимальные модели, поскольку они имеют наименьшие отклонения от средних многолетних значений наблюдаемых данных.

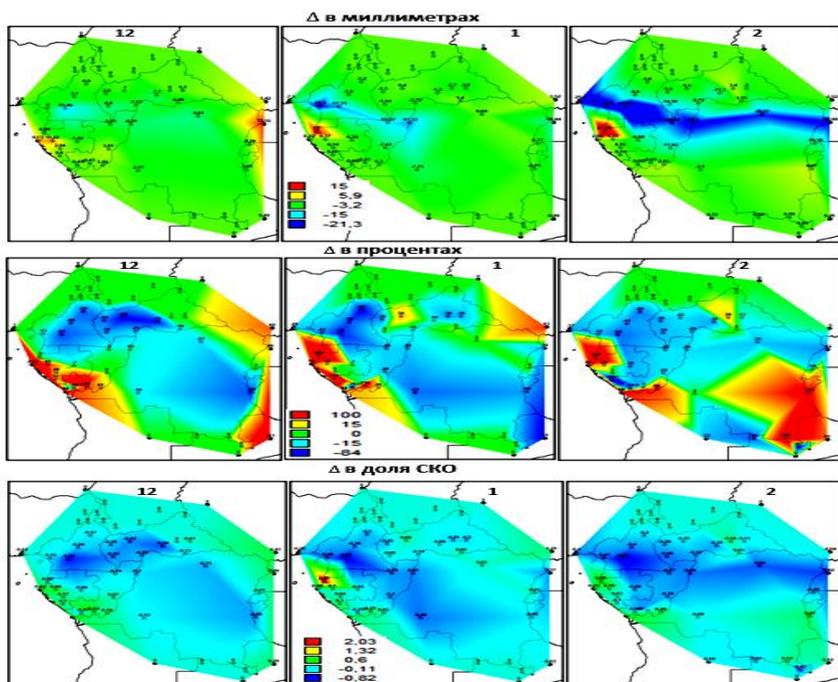


Рис. 6. Пространственные распределения Δ (в мм, % и в долях СКО) для осадков декабря, января и февраля (номера месяцев 12, 1, 2).

Сравнение результатов исторического эксперимента проектов СМIP5 и СМIP6 между собой и с данными наблюдений на основе регрессионных зависимостей вида: $T_{СМIP6} = B_1 T_{СМIP5} + B_0$, показало, что для модели IPSL средние случайные отклонения в версиях СМIP5 и СМIP6 не превышают 1°C , но при сравнении с данными наблюдений получено, что погрешности СМIP6 больше, чем в СМIP5 и составляют $1,0^\circ\text{C}$ и $1,3^\circ\text{C}$ соответственно. Поэтому модель IPSL проекта СМIP6 даже менее оптимальна, чем в проекте СМIP5. Для модели ВСС в полученных данных исторического эксперимента по двум проектам есть систематические отклонения: значения выше среднего завышены, ниже среднего занижены и максимальные отклонения уже составляют $3,0\text{--}3,5^\circ\text{C}$. При сравнении с данными наблюдений средние по модулю погрешности равны $1,0^\circ\text{C}$ в проекте СМIP5 и $1,1^\circ\text{C}$ в проекте СМIP6, а наибольшие достигают $10\text{--}12^\circ\text{C}$ в проекте СМIP5 и $10\text{--}13^\circ\text{C}$ в проекте СМIP6.

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 были использованы сценарии обоих проектов. 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 этих проектов лучше связаны и систематические отклонения отсутствуют.

Для корректировки сценарных значений была разработана методика, учитывающая как современную тенденцию изменения климатических характеристик, так и будущую тенденцию и основанная на расчете средней скорости изменения (градиента) за последовательные 30-летние периоды в настоящем и будущем. Методика включает следующие основные части:

- оценка современного градиента:

$$\Delta_1 = \bar{T}_{(1981-2010)} - \bar{T}_{(1951-1980)}, \quad (3)$$

где: \bar{T} – среднее значение температуры периода 1981-2010 и 1951-1980;

- оценка будущих градиентов:

$$\Delta_2 = \bar{T}_{2_{\text{буд}}} - \bar{T}_{1_{\text{буд}}} \text{ и } \Delta_3 = \bar{T}_{3_{\text{буд}}} - \bar{T}_{2_{\text{буд}}}, \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{ср1}} = 1/2(\Delta_3 + \Delta_2) \quad (5)$$

где: $\bar{T}_{1_{\text{буд}}} = \bar{T}_{(2011-2040)}$, $\bar{T}_{2_{\text{буд}}} = \bar{T}_{(2041-2070)}$, $\bar{T}_{3_{\text{буд}}} = \bar{T}_{(2071-2100)}$

- оценка среднего градиента при переходе от настоящего к будущему:

$$\Delta_{\text{ср2}} = 1/2(\Delta_{\text{ср1}} + \Delta_1) \quad (6)$$

- корректировка будущих средних:

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2011-2040)} = \bar{T}_{\text{наб}} + \Delta_{\text{ср2}}, \quad (7)$$

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2041-2070)} = \bar{T}_{\text{коррек}(2011-2040)} + \Delta_2, \quad (8)$$

$$\bar{T}_{\text{коррек}(2071-2100)} = \bar{T}_{\text{коррек}(2041-2070)} + \Delta_3, \quad (9)$$

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

Пространственные распределения современных и сценарных температур показывают, что средняя температура Центральной Африки в последней трети XXI века увеличивается с 0,2–0,5°C до 2,6–4,2°C по предельным сценариям и 1,2–1,7°C по сценарию RCP4.5. При этом модель IPSL дает верхние пределы этого диапазона температур, а модель BCC – нижние. Наибольшие различия по двум моделям почти в 2 раза имеют место для сценария RCP 8.5, который можно считать и маловероятным, и ненадежным для оценок (рис. 7).

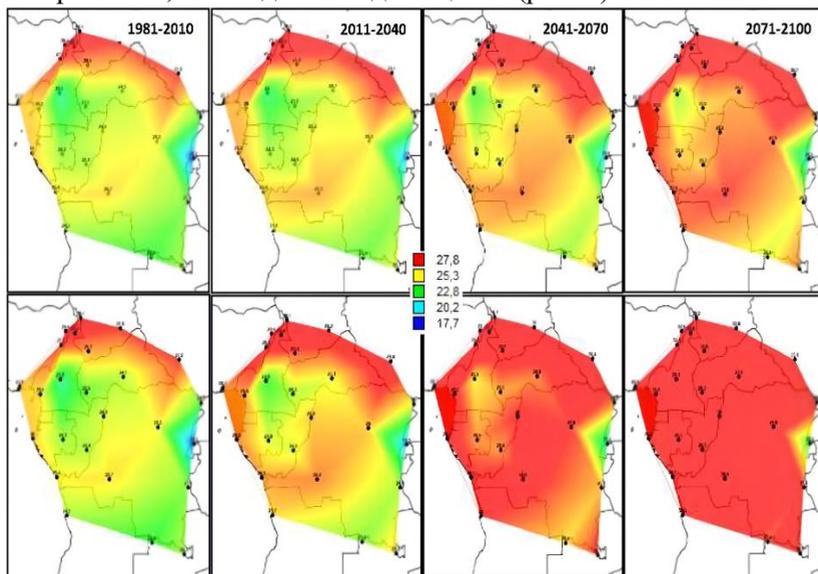


Рис. 7. Пространственные распределения современных и сценарных температур октября для Центральной Африки по модели IPSL и сценариям 4,5 RCP Вт/м2 (вверху) и RCP 8,5 Вт/м2 (внизу).

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 RCP 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 $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$.

В пятой главе оценивается динамика будущих сумм осадков за каждый месяц в Центральной Африке по среднему сценарию (RCP 4,5 Вт/м²) 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. 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.

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 $30\text{--}40\%$, а рост осадков до $40\text{--}50\%$ от современных будет наблюдаться на востоке территории (рис. 8).

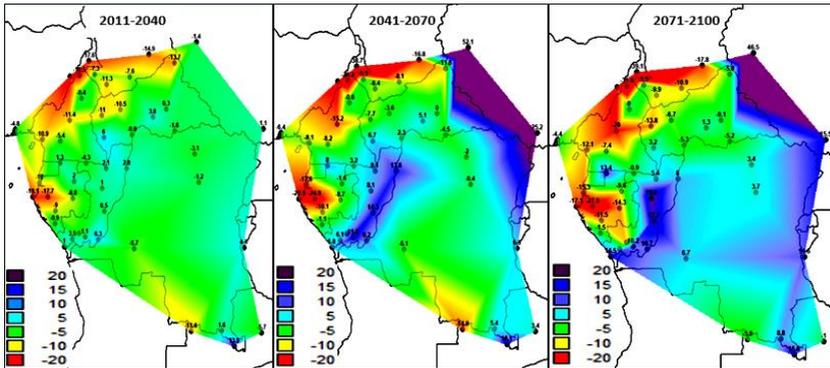


Рис. 8. Пространственные распределения сценарных осадков сентября в % от современного (1981-2005 гг.) для Центральной Африки по модели NorESM1 и сценарию RCP 4,5 Вт/м².

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. Осадки более 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 (рис.9).

В заключении диссертационной работы представлены следующие основные результаты и выводы.

1. Сформированы уникальные региональные базы данных, включающие многолетние ряды среднемесячных температур воздуха и осадков, которые проверены на качество, однородность и приведены к многолетнему периоду с восстановлением пропусков наблюдений.

2. Изучение текущих колебаний температуры воздуха в Центральной Африке показывает, что изменения средних значений произошли во второй половине XX века, с середины 1970-х до начала 2000-х годов. Наибольшее повышение температуры произошло в северных регионах, достигнув 2,4°С, а наименьшее – в центральных регионах, особенно в тропических лесах, не превысив 0,6°С. Проведено районирование территории по виду выявленных нестационарностей.

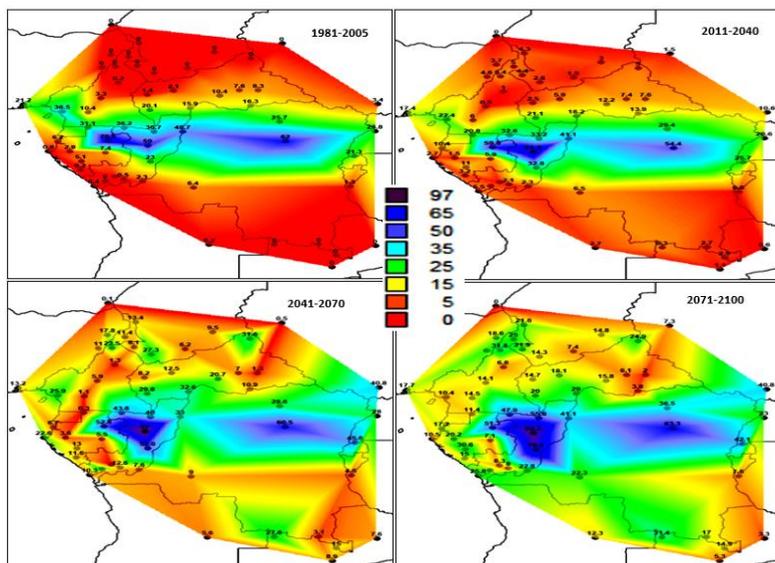


Рис. 9. Пространственные распределения осадков января (в мм) современного и будущих периодов времени для Центральной Африки по модели NoGESM1 и сценарию RCP 4,5 Вт/м².

3. Осуществлено районирование территории по типу внутригодовых распределений осадков и выделены 4 однородных района. На основе моделирования многолетних рядов получено, что для месяцев сезона дождей 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.

4. Для осадков сухого сезона года применялся другой подход, основанный на статистическом сравнении средних и дисперсий двух частей временного ряда. Получено, что 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.

5. При анализе будущего климата Центральной Африки было установлено, что модели СМIP5 и СМIP6 дают схожие результаты и

поэтому для будущих оценок следует рассматривать оба проекта. На основе сценария RCP 4.5 прогнозируется, что к концу столетия в Центральной Африке произойдет повышение температуры на 2°C – 3°C.

6. 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 XXI века количество осадков увеличится до 15 мм в большинстве засушливых районов Центральной Африки. Области с количеством осадков >35 мм будут увеличиваться и сами осадки сухого сезона в них вырастут до 70-90 мм.

Публикации соискателя по теме диссертации

Из перечня ВАК и в SCOPUS

1. Мама Магбини Токпа, Лобанов В.А., Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке. // Гидрометеорология и экология, РГГМУ Санкт-Петербург. № 69, 2022, с.722-745 <https://notes.rshu.ru/> .

2. Мама Магбини Токпа, В. А. Лобанов, Н. В. Короткова. Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки по сценариям проектов СМIP5 и СМIP6. // Известия Саратовского университета. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 8–20 <https://geo.sgu.ru>. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-8-20>, EDN: NBJJYU

3. Мама Магбини Токпа, В.А. Лобанов, А.И.Н. Мханна, С.В. Морозова, М.А. Алимшиева. Оценка современных изменений осадков в Центральной Африке. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология, Науки о Земле. 2023, Т.32, №2, С.217-232. DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-2-217-232

4. Mamy Magbini Tokpa, Vladimir A. Lobanov, Peculiarities of climate change in Central Africa, в журнале Springer Nature: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences (индексируется в SCOPUS) eBook ISBN 978-3-031-19012-4, p. 307 – 325. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-19012-4?page=2#toc>

В других изданиях

5. Лобанов В.А., Мама Магбини Токпа, Григорьева А.А. Применение статистических моделей нестационарного среднего для выявления изменений климата. Тезисы Международной конференции и Школы молодых ученых,

посвященных памяти Нины Константиновны Кононовой, «Климатические риски и климатическая погода» Иркутск, 14–17 июня 2021 г. Иркутск, ISBN 978-5-9624-1924-4, с.67.

6. Мама Магбини Токпа, В.А. Лобанов, Особенности изменения климата центральной Африки, IV-я международная научная конференция «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды», 23 -25 мая 2022 г, Северо- Кавказский федеральный университет (СКФУ), входящий в базу РИНЦ УДК 551.5:536.7 (082)

7. Мама Магбини Токпа, В.А. Лобанов, Выбор эффективной модели климата для Центральной Африки. Тезисы докладов Международного научного форум «Наука и инновации – современные концепции», 20 мая 2022 г. ISBN 978-5-905695-78-0, с.223. [http://nauchoboz.ru/ forum.html](http://nauchoboz.ru/forum.html), а также на сайте elibrary.ru.

8. Лобанов В.А., Мама Магбини Токпа, Григорьева А.А. Статистические методы и модели для оценки региональных изменений климата. Тезисы докладов в Forum on Frontiers of Meteorological Research of 2nd IAMES Annual Conference, November 28-30 2022, NANJING, CHINA <https://www.iamesworld.com/>.

9. Мама Магбини Токпа, Лобанов В.А., Данные наблюдений температуры Центральной Африки и результаты исторического эксперимента и будущих сценариев проектов СМIP5 и СМIP6. Доклады международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: теория, методология, практика», 6 декабря 2022г., на сайте elibrary.ru.

10. Мама Магбини Токпа, Лобанов В.А. Сценарии СМIP5/СМIP6 и будущая динамика температуры воздуха в Центральной Африке в течение 21-го века. Материалы Междисциплинарной молодежной научной конференции «Азимут ГЕОнаук — 2022». Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2023. — 458 с. ISBN 978-5-89702-493-3.

11. Лобанов В.А., Мама М. Токпа, А.А.Григорьева Применение статистических методов для исследования изменений климата. В Сборнике трудов VI Международной конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022. [Электронный ресурс]. С. 132 – 136. М.: Издательство «Перо», 2022. – МБ, ISBN 978-5-00204-804-5

12. Мама Магбини Токпа, Лобанов В.А. Оценка будущих осадков в Центральной Африке по сценариям проекта СМIP. Материалы международной научно-практической конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки», 12 мая 2023, № МНК-376. <https://perviy-vestnik.ru/archive-konferentsiya-2023/>.