



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов  
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(магистерская диссертация)

На тему: «Гидродинамический долгосрочный прогноз для территории  
Танзании с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW»

Исполнитель Омари Рамадани Мохамед  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой   
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

« 11 » июня 2022 г.

Санкт-Петербург  
2022

## СОЖЕРЖАНИЕ

		стр.
	Введение	
1	Проблема прогноза осадков для Танзании	
1.1	Географическое положение Танзании	
1.2	Климатические особенности Танзании	
1.3	Режим увлажнения на территории Танзании	
1.4	Проблема прогноза осадков в Танзании	
2	Методы прогноза осадков, используемые Метеорологическим Агентством Танзании (Tanzania Meteorological Authority – TMA)	
2.1	Эмпирические (Статистические) методы сезонного прогноза	
2.1.1	Пакет SEAFORDS	
2.1.2	Инструмент прогнозирования климата (IRI Climate Predictability Tool (CPT))	
2.1.3	Регрессионный анализ с использованием инструмента прогнозирования климата (Climate Forecasting Tool (CFT))	
2.1.4	Регрессионный анализ с использованием инструмента прогнозирования климата (Climate Forecasting Tool (CFT))	
2.2	Гидродинамические методы (включая модель WRF-ARW, которая используется в отделе численного прогнозирования погоды в TMA)	
3	Потенциальные предикторы долгосрочного прогноза осадков Танзании	
3.1	Выбор предикторов для долгосрочного прогноза осадков Танзании	
3.2	Оценка прогностического потенциала предикторов для долгосрочного прогноза осадков Танзании	
3.2.1	Явление Эль-Ниньо (Ла-Нинья) и Южное колебание	
3.2.2	Диполь Индийского океана (IOD – Indian Ocean Dipole)	
3.2.3	Квазидвухлетняя цикличность в стратосферной циркуляции	

	экваториальной зоны	
4	Описание численных экспериментов	
4.1	Описание численной гидродинамической мезомасштабной модели WRF	
4.2	Система уравнений модели WRF-ARW	
5	Анализ и оценка результатов численных экспериментов	
	Заключение	
	Список использованных источников	
	Приложение	

## ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость осадков воздействует на многие социально-экономические секторы жизни человеческого общества и, в первую очередь, на сельское хозяйство, на работу гидроэлектростанций, водные ресурсы, транспорт от которых во многом зависит экономика Танзании. Поэтому улучшение методов долгосрочного прогноза осадков в целях смягчения последствий изменений климата в Танзании является задачей, несомненно, актуальной.

Осадки в Танзании являются определяющим климатическим фактором вследствие засух и наводнений. Экономика Танзании в значительной степени зависит от сельского хозяйства, которое весьма уязвимо и сильно зависит от распределения осадков. Кроме того, количество, характер и продолжительность дождей оказывают большое влияние на флору и фауну, а также на работу гидроэлектростанций и дорожное хозяйство.

На территории Танзании наблюдается два режима осадков, а именно унимодальный и бимодальный режимы осадков. В бимодальных районах (в северной части страны и на восточном побережье) бывает два сезона дождей: длинные дожди (с марта по май) и короткие дожди (с октября по декабрь). В унимодальных районах (в южных, западных и центральных районах) бывает один сезон, который приходится на ноябрь – апрель. Эти сезоны дождей обычно определяют урожайность в сельскохозяйственных районах страны. Годовые значения количества осадков меняются в пределах от 500 мм в центральной части Танзании и до более 1500 мм на некоторых южных частях страны [1].

Распределение и изменчивость осадков обусловлены множеством факторов, включая восточноафриканский муссон, Эль-Ниньо (Ла-Нинья) Южное Колебание (ЭНЮК), западные ветры из Конго, тропические циклоны, внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) и многие местные факторы.

Миграция ВЗК на север и юг через экватор является одним из основных факторов, влияющих на распределение и изменчивость осадков в Танзании и во всей Восточной Африке. Исследования показали, что существует связь между сезонными осадками и квазидвухлетней цикличностью атмосферы (квазидвухлетнее колебания, КДК), значениями температуры поверхности океана (ТПО) и дипольным режимом Индийского океана [2].

Эти особенности обуславливают климатические различия (от влажных тропических до засушливых) районов Восточной Африке, где метеорологические засухи или малое количество осадков определяют серьезные риски для развития и оказывают негативное воздействие на экономику, окружающую среду, здоровье и средства к существованию [3]. С сентября по декабрю 2021 на востоке Африки наблюдаются засушливые периоды, что привело к серьезным экономическим и гуманитарным последствиям.

Актуальность данного исследования заключается в чрезвычайной важности долгосрочного прогноза осадков по территории Танзании для многих отраслей народного хозяйства и экономики.

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Танзании и прогнозирования осадков в данной работе была применена гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW. Точность прогноза при помощи гидродинамической модели зависит от многих факторов. Из них самыми важными являются: точность и детальность начальных данных, разнообразие физических процессов, которые описываются уравнениями модели, соответствующие физические параметризации и возможность усвоения данных измерений в расчетах модели.

*Целью* данной диссертационной магистерской диссертации является: оценка потенциальных предикторов и повышение качества долгосрочных методов прогноза осадков на территории Танзании.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- ✓ Создание архива данных о пространственно-осредненных характеристиках осадков по территории Танзании;
- ✓ Оценка прогностического потенциала выбранных предикторов для долгосрочного прогноза осадков на территории Танзании;
- ✓ Адаптация гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW к территории Танзании и для долгосрочного прогноза осадков;
- ✓ Проведение численных экспериментов;
- ✓ Верификация результатов моделирования.

Практическая ценность данной работы состоит в повышении эффективности долгосрочного прогноза осадков в Танзании для снижения неблагоприятных последствий климата.

Диссертационная магистерская диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В первой главе описывается проблемы прогноза осадков для Танзании, приводится описание географического положения, климатических особенностей и представлен обзор исследований режима увлажнения в Танзании. Необходимость такого описания обусловлена тем, что дальнейшие исследования проводились для области, охватывающего в основном территорию Танзании. Также изучение географических особенностей территории необходимо в основном для анализа результатов прогноза осадков.

Во второй главе приведены методы прогноза осадков используемые Метеорологическим Агентством Танзании (Tanzania Meteorological Authority-TMA). Это субъективный сезонный прогноз с использованием статистических и динамических методов, а также прогноз консенсуса экспертов.

Третья глава посвящена потенциальным предикторам долгосрочного прогноза осадков в Танзании. Одним из преимуществ статистического метода является то, что он прост в использовании и хорошо себя зарекомендовал в тропических странах. Поэтому очень важно найти предикторы и определить, в какой сезон их можно использовать. Для анализа связи между сезонным

количеством осадков и рассматриваемых предикторов использовались данные об осадках и предикторов, полученные от TMA и NOAA.

В четвертой главе приводится описание численных экспериментов с использованием модели WRF-ARW. Модель WRF представляет собой систему численного прогнозирования погоды (ЧПП) и моделирования атмосферы, предназначенную как для исследовательских, так и для оперативных приложений. В этом исследовании модель WRF-ARW использовалась для прогнозирования сезонных осадков в Танзании.

Пятая глава посвящена анализу и оценке результатов численных экспериментов. Анализ и оценка результатов очень важны для демонстрации навыков моделей при использовании различных схем параметризаций физических процессов. Были использованы три схемы параметризации конвективных облаков. Анализ был основан на сезонных осадках во время МАМ, ОНД и засушливого сезона с июня по август.

В заключении приведены основные результаты проделанной работы и намечены пути возможного продолжения исследований.

Список использованных источников содержит 27 наименования.

## 1. ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗА ОСАДКОВ ДЛЯ ТАНЗАНИИ

### 1.1 Географическое положение Танзании

Танзания является самой большой из стран Восточной Африки (Кения, Уганда, Руанда, Бурунди и Танзания). Её территория лежит в регионе от 1° до 12° ю. ш. и от 29° до 41° в. Д.. Танзания граничит с Кенией и Угандой на севере, Руандой, Бурунди и Демократической Республикой Конго на западе, Замбией и Малави на юго-западе и Мозамбиком на юге. Страна характеризуется сильной изменчивостью рельефа, присутствуют горы, как гора Килиманджаро (высочайшая вершина Африки (5895 м)) на северо-востоке, и низменности, например, рифтовая долина Нила в центре на пути к югу. Страна окружена крупными водоемами, такими как озеро Виктория, озеро Танганьика, озеро Ньяса и Индийский океан на востоке, которые имеют значительное воздействие на местные погодные системы и, следовательно, на изменчивость количества осадков по стране в целом. Кроме того, в Танзании много рек, но основными являются Великая Руаха, Руфиджи, Руву, Пангани и Киломберо. Географическое положение Танзании приведение на рисунке 1.1.

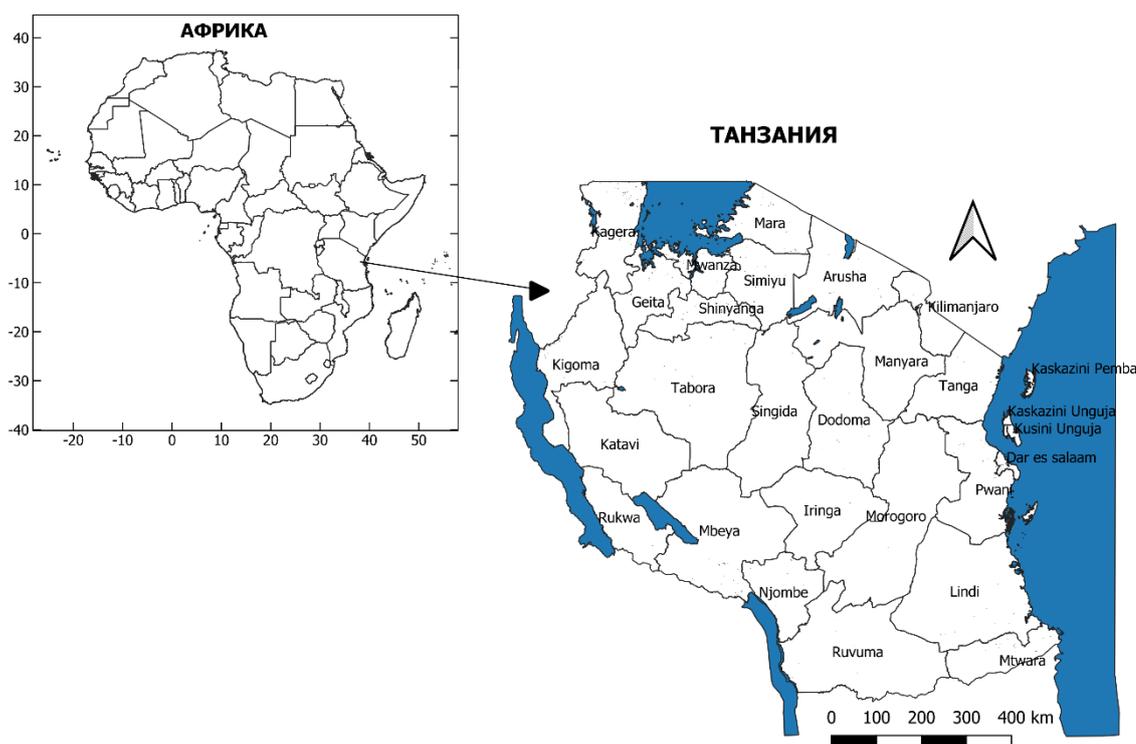


Рисунок 1.1 – Географическое положение Танзании

Танзания разделена на центральное плато, горные районы на севере и юге и прибрежные равнины.

## 1.2 Климатические особенности Танзании

Танзания имеет уникальные и разнообразные климатические характеристики, варьирующиеся от тропических до засушливых и полусушливых низменностей. Климат Танзании отличается от места к месту из-за его географического положения, высоты над уровнем моря, рельефа и растительного покрова. На самом деле климат региона в основном зависит от его близости к экватору, влияния Индийского океана и физиография в целом. Танзания гористая на северо-востоке, где расположены горы Килиманджаро и Меру, климат прохладный в высокогорных районах. Наличие бассейна Конго и явление взаимодействия воздуха и моря, такое как тропический циклон (ТЦ) в Восточной Африке, Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК), диполь в

Индийском океане (ИОД) и субтропический антициклон, такой как антициклон острова святой Елены и Маскарена, также имеют большой вклад в изменчивость количества осадков в Танзании.

Среднегодовое количество осадков колеблется от 500 мм до 2500 мм и выше. Средняя продолжительность сухого сезона составляет от 4 до 6 месяцев. Для Танзании характерны два режима выпадения осадков, т. е. унимодальный и бимодальный режим, из-за движения с севера на юг внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), когда солнце мигрирует с севера на юг и наоборот. На севере, северо-востоке и северном побережье сезоны дождей бывают бимодальными в течение октября-декабря (короткие дожди, ОНД (Vuli)) и март-май (длинные дожди, МАМ (Masika)), в то время как на юго-западном высокогорье, в западной части, центральных и южных районах страны выпадают унимодальные осадки в течение октября/ноября по апрель/май (также известный как Msimu). Короткие дожди сильно варьируют в пространстве и времени. Интенсификация антициклона острова Св. Елены и уменьшение высокого давления в области Азорских островов способствует притоку влаги из Атлантического океана и бассейна Конго, что влияет на количество осадков в некоторых частях Восточной Африки в сезон МАМ. Маскаренский антициклон вызывает юго-восточные ветры над Индийским океаном, которые переносят поток влаги в регионы Танзании во время длинного сезона дождей. Кроме того, воздушные массы из Конго, характеризующиеся влажным воздухом, направляются в сторону исследуемого региона, что усиливает конвекцию и, следовательно, образование осадков над северо-западными и западными районами озера Виктория [4]. Январь и февраль это переходный период (относительно засушливый) для бимодальных районов, а июнь, июль, август и сентябрь засушливые месяцы для всей страны. С июня по август в Танзании сухой сезон. В этот период наблюдается понижение температуры, особенно минимальные температуры в ночное время и ранним утром. Обычно в этом сезоне преобладает сильный южный ветер, который влияет на некоторые виды деятельности, например, прерывание морской деятельности. Самые низкие

минимальные температуры до или ниже 0°С наблюдаются над юго-западными высокогорьями.

Температура воздуха по всей стране обычно характеризуется относительно меньшими колебаниями в течение года. Среднегодовая многолетняя температура на разных станциях страны колеблется от 14,4 °С до 26,4 °С. Регионы с самыми высокими температурами воздуха расположены вдоль побережья и в западной части страны. Сезон высоких значений температуры начинается с октября и продолжается до февраля или марта, а холодный сезон длится с мая по августе. Годовая минимальная температура воздуха ( $T_{\min}$ ) и максимальная температура воздуха ( $T_{\max}$ ) по станциям колеблются от 9,6 °С до 22 °С и от 19,1 °С до 30,7 °С, соответственно [2]. Среднегодовая температура воздуха варьируется от 24°С до 34°С. На плато среднесуточная температура колеблется в пределах 21°С - 24°С, а в высокогорных районах температура колеблется в пределах 15°С - 20°С. Самые жаркие месяцы — с декабря по февраль, а самые прохладные — с июня по август.

### 1.3 Режим увлажнения на территории Танзании

Для анализа режим увлажнения на территории Танзании использованы данные из архива KNMI Climate Explorer [5]. Выбранные для исследования данные это данные наблюдений за осадками за период с 1961 по 2020 год, проведено пространственное осреднение осадков. Созданный архив характеристик режима осадков на территории Танзании приведён в приложении А.

Анализ режима осадков на территории Танзании показывает, что с октября по май в Танзании наблюдается влажный период с максимальным количеством осадков, которые отмечены в марте. С мая по сентябрь количество осадков убывает и минимальное количество осадков наблюдается в июле. На

рисунке 1.2 представлен годовой ход средних многолетних месячных сумм осадков на территории Танзании.

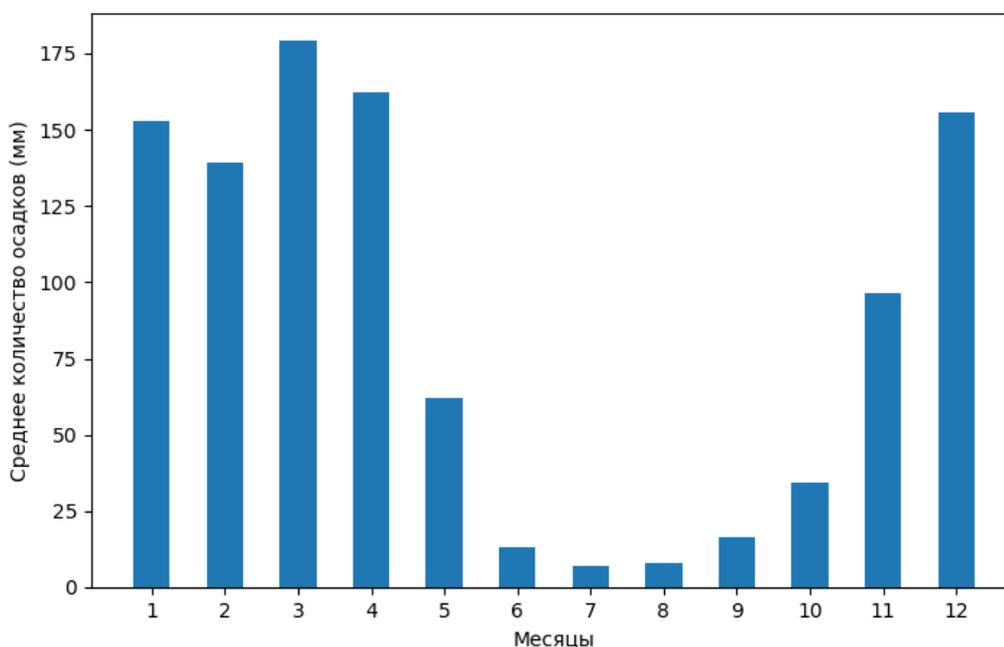


Рисунок 1.2 - Годовой ход средних многолетних значений месячных сумм осадков на территории Танзании

В последние годы в Танзании, а также в Восточной Африке, в районах, где наблюдается бимодальный режим осадков, в течение января и февраля наблюдался влажный период. При этом январь и февраль являются переходным периодом (обычно сухим периодом) от сезона ОНД к сезону МАМ. Эта ситуация также сопровождается поздним началом сезона ОНД над этими районами. Много споров продолжается, есть ли смена сезонов дождей в регионе. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо провести дополнительные исследования.

Также анализ показывает, что на территории Танзании наблюдается тенденция к уменьшению количества осадков. Анализ данных о количестве осадков и характеристики линейного тренда с 1961 по 2020 гг показывают, что количество осадков уменьшается в среднем на 1,932 мм в год ( $-0.161 \times 12$ ). Для оценки характеристики линейного тренда использовалось 12-месячное

скользящее осреднение месячных сумм осадков для удаления сезонного хода. Тренд изменения осадков Танзании с 1961 по 2020 г приведен на рисунке 1.3.

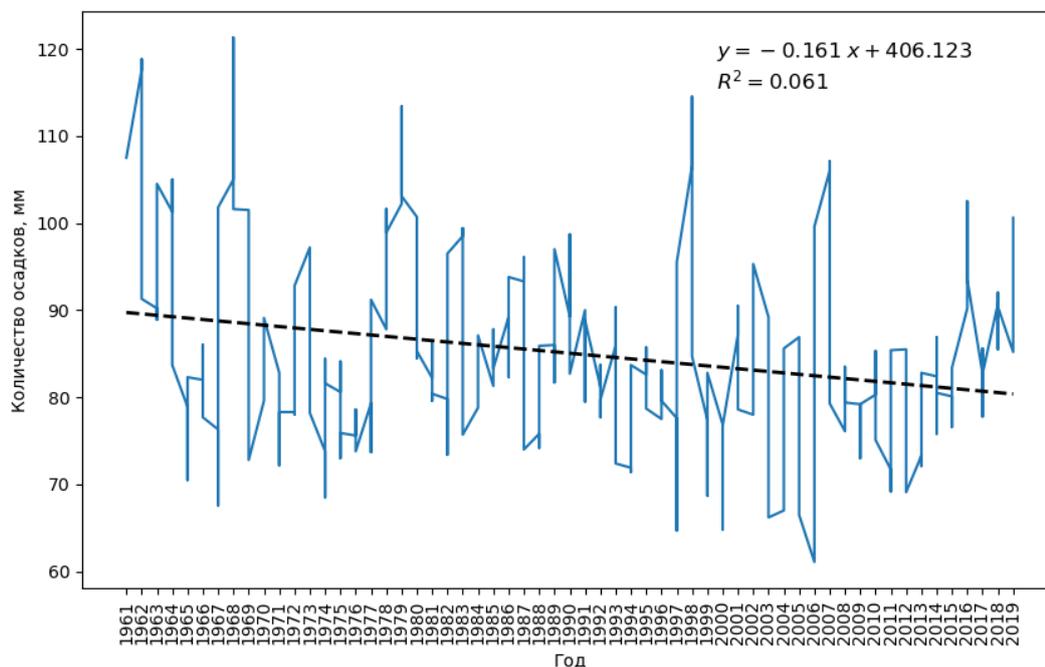


Рисунок 1.3 – 12-месячные скользящие средние суммы осадков в Танзании

Анализ линий тренда в МАМ и ОНД сезонах дождей с 1961 по 2020 год также показывает, что количество осадков уменьшилось, хотя в МАМ сезон уменьшение намного больше, чем ОНД сезон. В среднем количество осадков уменьшилось на 0,522 мм за сезон в МАМ, а для ОНД уменьшился на 0,336 мм за сезон. На рисунках 1.4 и 1.5 показан тренд изменения МАМ и ОНД сезонных осадков в Танзании с 1961 по 2020 год соответственно.

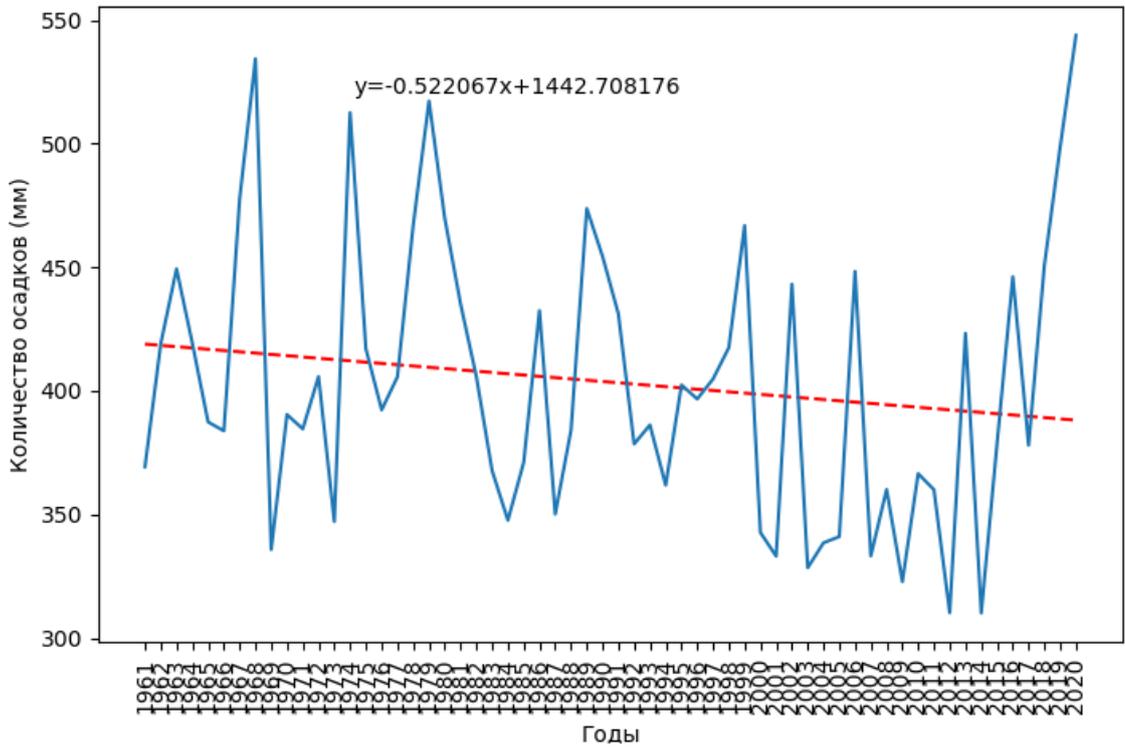


Рисунок 1.4 – тренд изменения МАМ сезонных осадков в Танзании

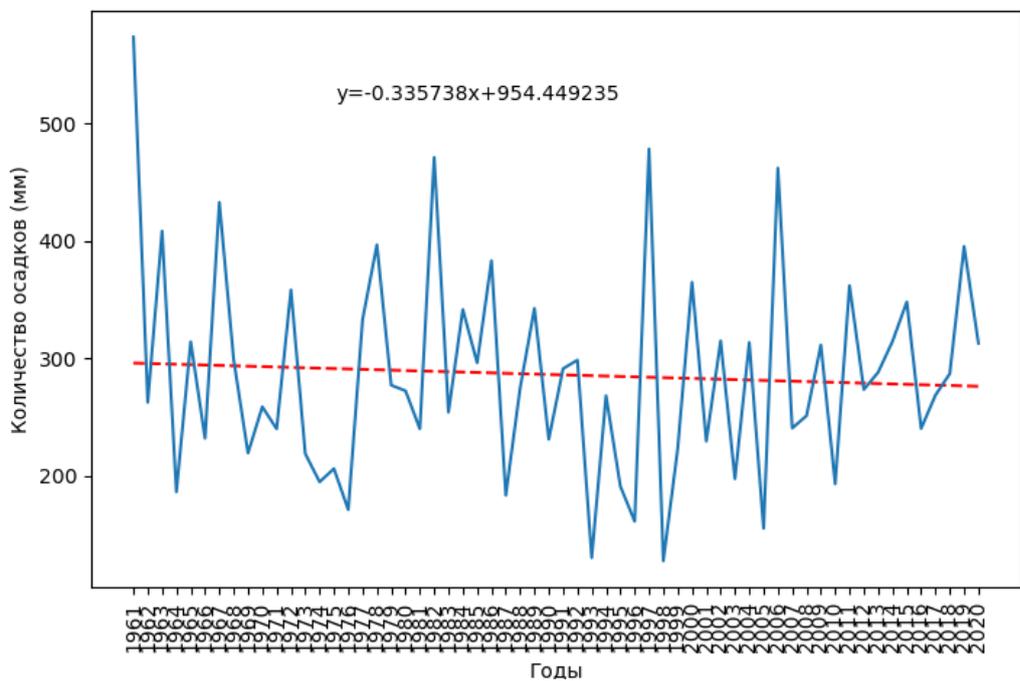


Рисунок 1.5 – тренд изменения ОНД сезонных осадков в Танзании

В целом можно сделать вывод – с 1961 по 2022 г. количество осадков на территории Танзании уменьшается.

## 1.4 Проблема прогноза осадков в Танзании

Осадки являются очень важным погодным и климатическим параметром, влияющим на экономическую деятельность в Восточной Африке, а также в Танзании. Это климатический параметр тропического региона с наибольшей пространственной и временной изменчивостью. Осадки в Танзании прогнозируются в различных временных масштабах, от краткосрочного до долгосрочного прогноза погоды. Сезонные климатические прогнозы — это прогнозы ожидаемых климатических условий на ближайшие три-шесть месяцев. Эти прогнозы могут быть очень полезны для ряда чувствительных к климату секторов (например, сельского хозяйства, здравоохранения и водных ресурсов). Поэтому точные и надежные прогнозы сезонного климата, особенно осадков, по-прежнему имеют первостепенное значение.

Подходы, используемые для подготовки сезонных климатических прогнозов, включают использование

- ✓ физически обоснованных динамических глобальных климатических моделей,
- ✓ региональных климатических моделей,
- ✓ эмпирически основанных статистических моделей или комбинации динамических и эмпирических моделей.

Объективные прогнозы сезонных осадков составляются с использованием либо статистических моделей, либо динамических моделей, таких как модели общей циркуляции (МОЦ). Чтобы выразить существующие неопределенности в процессе прогнозирования, сезонные прогнозы составляются в вероятностной форме [6]. В Танзании, Танзанийское метеорологическое Агентство (ТМА), выпускает свои оперативные сезонные прогнозы осадков на основе статистических моделей (в которых в качестве предикторов используются климатические индексы) и динамических моделей. Это субъективный прогноз, так как включает в себя анализ и консенсус экспертов по климату.

Климатические индексы представляют Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК), состояние Индийского океана и КДЦ.

Статистические модели широко используются во многих странах для прогнозирования сезонного климата. Они основаны на результатах прошлых наблюдений и их основное преимущество в том, что они просты в реализации и эксплуатации. Основная проблема статистических моделей заключается в том, что они основаны на стационарных отношениях между предиктором и предиктантом, что не гарантируется, особенно в условиях меняющегося климата.

Хотя в последние годы сезонные прогнозы значительно улучшились, но есть некоторые проблемы, с которыми сталкиваются разработчики, как краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов погоды в Танзании.

Первая проблема заключается в отсутствии достаточных данных из-за низкой плотности сети станций наблюдения, что влияет не только на процесс прогнозирования, но и на исследования в области климатического мониторинга, атрибуции и обнаружения. Существующей сети наблюдений недостаточно для охвата всех климатических режимов и местного климата. Доступные станции распределены неравномерно, большая часть станций расположена в аэропортах и городских районах. В настоящее время только одна станция в аэропорту Дар-эс-Салама выпускает радиозонды один раз в день - в 15 часов по местному времени (12 UTC). Таким образом, существует большой пробел в данных о вертикальном профиле атмосферы над Танзанией. Хотя использование Skew-T из выходных данных модели WRF-ARW помогает уменьшить разрыв, но это не настоящее наблюдение за атмосферой.

Над Индийским океаном мало морских метеостанций. Эти станции не могут отображать погоду целых прибрежных районов Танзании, поскольку известно, что Индийский океан оказывает большое влияние на изменение погоды в Танзании. Анализ текущих погодных условий очень важен для краткосрочного прогноза погоды. Это дает четкое представление о системе, которая влияет на погоду в данный момент, а также показывает направление

погодной системы. Отсутствие достаточного количества данных будет препятствовать критическому анализу во время прогнозирования, что может снизить точность прогноза. Для долгосрочного прогноза погоды также наличие данных очень важно. Большинство статистических моделей/инструментов для долгосрочного прогноза погоды в Танзании используют данные наблюдений с метеостанций. Использование данных с нескольких станций для прогнозирования на большей части страны приводит к низкой точности прогноза, особенно в некоторых районах, где нет станций или станции находятся слишком далеко от этих районов. Несколько станций не могут дать истинное представление о погоде на больших территориях страны. Климатические модели могут обеспечить только одну реализацию климата, если нет данных для их проверки, а статистическая модель опирается на достаточные обучающие данные. Чтобы восполнить этот пробел, необходимо больше метеостанций. Но пока для восполнения пробела используются наборы спутниковых данных и данных реанализа. Основное преимущество спутниковых продуктов и продуктов реанализа заключается в том, что они предлагают пространственно полные данные и находятся в свободном доступе. Спутниковые оценки количества осадков в настоящее время датируются более чем 30-летней давностью, в то время как продукты реанализа уходят еще дальше во времени. Но наблюдения за характеристиками атмосферы на подстилающей поверхности в реальном времени остаются жизненно важными для мониторинга многих важных параметров погоды и необходимы для оценки других технологий и данных.

Вычислительные мощности являются одной из проблем во многих африканских странах, включая Танзанию. В связи с большой территорией страны необходимы суперкомпьютеры для запуска моделей с высоким разрешением, которые могли бы рассчитывать прогнозы за короткие сроки. Из-за доступной инфраструктуры отдел численного прогноза погоды в ТМА запускает WRF-ARW модель два раза в день (прогон модели от 00 и 12 часов). 00-часовой прогон модели предназначен для краткосрочного прогноза погоды, а

12-часовой прогон модели — для среднесрочного прогноза погоды. Для долгосрочного прогноза погоды (месячные и сезонные прогнозы) только один раз перед периодом или всякий раз, когда это необходимо. Погода динамична, происходят изменения. Обновления очень важны для точного отражения этих изменений и завоевания доверия пользователей информации о погоде.

Как уже отмечалось, в некоторых частях Танзании на сельское хозяйство влияет продолжительность сезонов дождей, в то время как в других районах влияние ограничено общим количеством осадков. В настоящее время среди фермеров возросло осознание и понимание важности информации о погоде и климате. Из-за изменения климата их местные знания по прогнозированию погоды стали недостоверными, потому что значимость большинства индикаторов, которые они используют, уменьшается. Поэтому большинство фермеров обращаются к научным методам прогнозирования для планирования своей сельскохозяйственной деятельности. Сезонный прогноз погоды, который охватывает большую территорию, приносит меньше пользы для их деятельности. Им нужен масштабированный до районного уровня сезонный прогноз. Чтобы вовремя удовлетворить этот спрос, ТМА необходимо увеличить инфраструктуру (суперкомпьютерные мощности) и продолжать содействовать использованию климатической информации.

Ограниченные навыки анализа данных еще одна проблема в прогнозировании погоды. Большинство экспертов занимаются климатом и изменением климата и становятся экспертами по климату. Им не хватает навыков анализа данных и прогнозов погоды. Оперативным синоптикам необходимы навыки, по крайней мере, в области анализа данных, количественных рассуждений и компьютерного программирования. Оперативным синоптикам необходимы навыки, по крайней мере, в области анализа данных, количественных рассуждений и компьютерного программирования. Благодаря усовершенствованию систем численного прогнозирования погоды в результате прогресса в понимании физических процессов, методов ассимиляции данных и вычислительных мощностей, роль

оперативных синоптиков изменилась, особенно в развитых странах. В Танзании роль синоптиков по-прежнему заключается в анализе данных, интерпретации выходных данных модели и предоставлении прогноза погоды. Точность прогноза зависит не только от навыков модели, но и от знаний и опыта экспертов. Требуется дополнительное обучение, чтобы улучшить понимание и знания экспертов в области прогноза погоды.

Одной из основных проблем в Восточной Африке, включая Танзанию, которая является регионом, характеризующимся высокой изменчивостью осадков и население которого зависит от неорошаемого натурального земледелия, является предоставление прогнозов, полезных для сельского хозяйства. Это сложная проблема, поскольку она включает прогнозирование характеристик внутрисезонных осадков, таких как начало, прекращение, частота влажных и засушливых периодов. Несмотря на значительное улучшение точности сезонных прогнозов в целом, внутрисезонные характеристики по-прежнему остаются проблемой. Эти характеристики помогают фермерам планировать свой сельскохозяйственный календарь. Требуется исследование для совершенствования методологии или поиска новых методов прогнозирования внутрисезонных характеристик.

Потребность в информации о погоде и климате продолжает расти в различных секторах, таких как туризм, транспорт, горнодобывающая промышленность и других секторах, которые вносят основной вклад в экономику страны. Экстремальные погодные условия также влияют на их деятельность. Всем этим секторам нужны специализированные погодные продукты. Чтобы удовлетворить огромный спрос на эти услуги, ТМА должна увеличить свою инфраструктуру, экспертов и тренинги для экспертов, чтобы повысить их навыки в предоставлении услуг во всех этих секторах.

## 2. Методы прогноза осадков, используемые Метеорологическим Агентством Танзании (Tanzania Meteorological Authority – TMA)

Детальная эволюция погодных систем или событий может быть непредсказуема для периода от нескольких дней до двух недель из-за хаотической внутренней динамики атмосферных движений. Однако, статистическое поведение погоды, то есть средние значения во времени или пространстве, может быть предсказуемо во временных масштабах от сезона и более из-за взаимодействия между атмосферой и медленно меняющейся нижней границей атмосферы, включая свойства поверхности океана и суши. За последние несколько десятилетий ученые добились огромных успехов в понимании и моделировании изменчивости и предсказуемости климатических систем. В результате прогнозирование сезонно-межгодовых изменений климата и связанных с ними неопределенностей с использованием нескольких динамических моделей стало применяться в метеорологических и гидрологических службах.

В объединенной Республике Танзании Танзанийское Метеорологическое Агентство (ТМА) отвечает за предоставление метеорологического и климатического обслуживания. Доступность надежного и своевременного обслуживания информацией о погоде и климате имеет решающее значение для повышения устойчивости, планирования адаптации и осуществления усилий по уменьшению возрастающих негативных социальных, экологических и экономических последствий изменения и изменчивости климата. Непрерывный мониторинг погоды и климата, а также предоставление точного, своевременного и надежного климатического обслуживания, включая раннее предупреждение о надвигающихся гидрометеорологических опасностях, в значительной степени способствуют уменьшению и управлению последствиями изменения климата и изменчивости климата. В зависимости от заблаговременности и надежности сезонных прогнозов общество может

предпринять ряд упреждающих действий, чтобы свести к минимуму риск опасных климатических условий или извлечь выгоду из климатических возможностей. Например, в случае прогноза засухи фермер может решить сажать засухоустойчивые культуры или вообще не сажать, а управление водными ресурсами водохранилища может осуществлять соответствующий контроль за пусками воды из водохранилища и планировать рациональное использование водных ресурсов. Предсказуемость осадков и их распределение во времени и пространстве в течение сезона имеет решающее значение при подготовке и планировании сельскохозяйственной деятельности, особенно в контексте изменения климата. Количественная оценка предсказуемости осадков определяет степень, в которой будущие тенденции и состояния осадков могут быть предсказаны с использованием знаний о текущих и прошлых тенденциях осадков; это возможно, если есть надежные знания об изменчивости осадков. Осадки считаются предсказуемыми, если их циклы и тенденции согласуются в своем появлении во времени и пространстве, так что будущие тенденции следуют предыдущим моделям и распределениям.

Как уже отмечалось, в Танзании наблюдается два режима осадков, а именно унимодальный и бимодальный режимы осадков. В бимодальных районах бывает два сезона дождей: длинные дожди (с марта по май) и короткие дожди (с октября по декабрь). Эти сезоны дождей обычно определяют урожайность в сельскохозяйственных районах страны. Таким образом, отсутствие сезонных осадков вызывает серьезную озабоченность у местного фермерского сообщества, поскольку большинство из них зависит от неорошаемого земледелия. Кроме того, сезонный прогноз может быть очень полезным инструментом для планирования, поскольку он дает пользователям общее представление о том, как будет развиваться сезон. На точность прогноза влияет текущая предсказуемость океана и погодных систем. Поэтому необходим хороший прогноз, чтобы фермеры и другие пользователи могли планировать виды социально-экономической деятельности. Исследования показывают, что МЭО осадки оказывают сильное влияние на Восточную

Африку с точки зрения наводнений (засухи) из-за их высокой (меньшей) интенсивности и количества по сравнению с другими сезонами дождей. Кроме того, они показали, что общее количество осадков и их тенденция в течение МАМ сезона значительно уменьшаются. Это приводит к серьезным климатическим потрясениям, поскольку экономика восточафриканского региона, включая Танзанию, зависит от неорошаемого земледелия.

Несколько синоптических и мезомасштабных систем влияют на распределение осадков в Танзании. Основной синоптической системой, влияющей на погоду, является внутритропическая зона конвергенции. ВЗК является основной причиной коротких дождей во время её миграции на юг и длинных дождей во время её миграции на север. Дифференциальные интенсивности субтропических систем высокого давления определяют относительное положение ВЗК. Другими системами, вызывающими дождь, являются восточные волны, муссонные ветры и местные факторы, такие как сухопутные и морские бризы. Исследования показали, что существует связь между сезонными осадками и КДК, глобальными ТПО, дипольным режимом Индийского океана и режимами Эль-Ниньо/Южного колебания.

Прогноз погоды и климата на глобальном и региональном уровнях в настоящее время предоставляют информацию, имеющую решающее значение для экономического благосостояния общества и для смягчения ущерба для жизни и имущества. Чтобы сезонные прогнозы приносили пользу обществу и стране, важно определить секторы, которые потенциально будут использовать эти прогнозы и реагировать на их потребности. Для сезонного прогноза осадков ТМА определила следующие сектора:

А. Сельское хозяйство и продовольственная безопасность – Прогнозы сезонных осадков используются для поддержки планирования и принятия решений в сельскохозяйственных системах. Это помогает фермерам узнать время посадки, время сбора урожая и продолжительность вегетационного периода.

Б. Животноводство и рыболовство - Сезонные прогнозы помогают животноводам планировать будущее. Для организации хранения пищи и воды для своих животных, когда ожидается сухая погода или дожди ниже нормы и воспользоваться преимуществом, если ожидается хороший сезон. Сухая погода сокращает пастбища домашнего скота.

В. Туризм и дикая природа - Сектор туризма является одной из крупнейших и наиболее быстрорастущих мировых отраслей и вносит значительный вклад в национальную и местную экономику по всему миру. Климат является одним из доминирующих факторов, влияющих на глобальные туристические потоки. Изменчивость и изменение климата по-разному влияют на туристические направления и туроператоров. Все туристические направления в той или иной степени чувствительны к климату, поскольку на них влияет естественная сезонность спроса, на них положительно или отрицательно влияет межгодовая изменчивость климата, которая приносит волны тепла, холод в тёплый сезон, засуху или штормы и проливные дожди, которые могут повлиять не только на туристический комфорт и безопасность (и тем самым удовлетворение), но и на товары, привлекающие туристов (например, коралловые рифы, дикая природа). Изменчивость климата также влияет на различные аспекты туристической деятельности (например, водоснабжение и качество воды, затраты на отопление и кондиционирование, потребности в орошении, борьба с вредителями, эвакуация населения и временное закрытие территорий). Погода и климат также играют важную роль в планировании, финансовом успехе и качестве обслуживания посетителей на специальных мероприятиях, которые проходят на открытом воздухе, например, музыкальных концертах, культурных фестивалях, спортивных мероприятиях – футболе, гольфе. Многие мероприятия на открытом воздухе проводятся в определенное время года, чтобы воспользоваться определенными климатическими условиями или снизить климатический риск. Во время подготовки сезонного прогноза ТМА также описывает воздействие ожидаемых условий на сектор туризма в сотрудничестве с экспертами по туризму.

Г. Энергия, вода и минералы - Сезонные изменения температуры, осадков, а также частота и серьезность экстремальных погодных явлений влияют на то, сколько энергии необходимо производить, доставлять и потреблять. Сезонные климатические прогнозы могут помочь энергетическим компаниям лучше прогнозировать скачки спроса на энергию заранее, чтобы удовлетворить потребности. Водные ресурсы напрямую зависят от обилия осадков и от того, как сохраняют и используют доступное количество воды. Потенциальное воздействие изменчивости климата на водообеспеченность включает изменения в количестве, интенсивности, времени и характере осадков.

Д. сектор здравоохранения - Сезонные прогнозы могут дать службам общественного здравоохранения беспрецедентную степень раннего предупреждения о вероятности эпидемий на основе анализа климата или экологический анализ до появления патогенов. Несмотря на то, что для использования преимуществ сезонных прогнозов потребуются достаточные знания, чтобы связать параметры климата с явлениями в экологическом секторе, влияющими на патогены, наличие надежных сезонных прогнозов будет способствовать интеграции таких знаний.

Е. управление стихийными бедствиями - Сезонная прогностическая информация имеет решающее значение для принятия упреждающих решений, направленных на преодоление воздействия изменчивости климата. Это помогает ответственным органам принимать превентивные меры и смягчать последствия ожидаемых условий.

Все эти секторы так или иначе получают пользу от сезонного прогноза погоды, выпускаемого ТМА.

В настоящее время существует несколько подходов, используемых для подготовки сезонных климатических прогнозов, включая использование физически обоснованных динамических глобальных климатических моделей, региональных климатических моделей, эмпирически основанных

статистических моделей или комбинации динамических и эмпирических моделей.

Для долгосрочного прогноза осадков на территории Танзании используют эмпирические (статистические) и динамические методы, а также анализ экспертов по климату. При разработке долгосрочных прогнозов сейчас сначала проводится анализ климатических систем и физических условий, после чего анализируются результаты динамических и статистических моделей. Текущие методы сезонного прогнозирования в ТМА в значительной степени зависят от процесса прогнозирования на основе консенсуса. Анализ климатических систем и физических условий включает

- температуру поверхности моря,
- условия Эль-Ниньо/Ла-Нинья,
- диполь Индийского океана,
- субтропический диполь Индийского океана,
- вектор ветра,
- уходящую длинноволновую радиацию,
- низкоуровневые стратосферные колебания/ КДК.

#### i. Температура поверхности океана (ТПО)

Основные характеристики тропической атмосферной циркуляции, усредненные по временным масштабам более одного или двух месяцев, в значительной степени определяются вариациями температуры поверхности океана (ТПО). Многочисленные наблюдения и модельные исследования зафиксировали, как вариации ТПО влияют на межгодовые и десятилетние колебания сезонных осадков в различных частях Африки [7].

Повышение температуры поверхности моря увеличило количество атмосферного водяного пара над океанами, что повлияло на характер осадков во всем мире, поэтому, когда температура океана меняется, характер осадков также имеет тенденцию меняться. Основными океаническими бассейнами, которые влияют на характер осадков в Танзании, являются центральная экваториальная часть Тихого океана, Индийский океан и юго-восточная часть

Атлантического океана (около побережья Анголы). Экваториальная часть Тихого океана – это место, где проводится мониторинг явления Эль-Ниньо/Ла-Нинья. Явление Эль-Ниньо/Ла-Нинья имеет большое влияние на количество осадков на северном побережье, северо-восточном нагорье и в бассейне озера Виктория по сравнению с другими районами страны. Явление Эль-Ниньо связано с количеством осадков выше нормы, в то время как явление Ла-Нинья уменьшает количество осадков до значений ниже нормы, поздним началом сезона дождей и даже засухой. В течение сезона ОНД 2021 года в большинстве частей Восточной Африки, включая Танзанию, выпали дожди экстремально ниже нормы, а в некоторых районах наблюдалась засуха из-за явления Ла-Нинья.

Танзания расположена в юго-западной части бассейна циклонов Индийского океана. Сезон циклонов начинается с ноября по апрель, и в это время в Танзании идет сезон дождей. Наличие циклона над бассейном влияет на погодные условия над Танзанией. Интенсивность и расположение циклонов могут усилить или подавить дождь над страной.

Изменение температуры к юго-востоку от Атлантического океана также влияет на погоду в Танзании, особенно в западных и центральных районах. Более низкая, чем обычно температура поверхности моря связана с высоким давлением. Это условие, вероятно, вызывает поток богатых влагой западных ветров из бассейна Конго в направлении бассейна озера Виктория и западной части страны, в то время как более теплая, чем обычное ПТО вызывает противоположное движение воздушных масс.

ii. Диполь Индийского океана (IOD-Indian Ocean Dipole) и субтропический диполь Индийского океана (SIOD- Subtropical Indian Ocean Dipole)

Диполь Индийского океана (IOD) определяется разницей температур поверхности моря между двумя областями (или полюсами, следовательно, диполем) — западным полюсом в Аравийском море (западная часть Индийского океана) и восточным полюсом в восточной части Индийского океана в юг Индонезии. Изменения температурных градиентов в Индийском

океане приводят к изменению предпочтительных областей подъема и опускания влаги и воздуха. Над Индийским океаном диполь Индийского океана с положительным индексом увеличивает приток влаги к прибрежным и близлежащим районам, что приводит к увеличению количества осадков в большей части страны. Напротив, при отрицательном индексе диполя Индийского океана уменьшает приток влаги, следовательно, уменьшает количество дождей над страной.

Субтропический диполь Индийского океана (SIOD) характеризуется колебаниями температуры поверхности моря, при которых юго-западная часть Индийского океана, то есть юг Мадагаскара, теплее, а затем холоднее, чем восточная часть, то есть у берегов Австралии. Индекс субтропического диполя (SIOD) получают из разности аномалий ТПО между юго-западным полюсом ( $55-65^{\circ}$  в. д.,  $37-27^{\circ}$  ю. ш.) и северо-восточным полюсом ( $90-100^{\circ}$  в. д.,  $28-18^{\circ}$  ю. ш.). Положительная фаза субтропического диполя Индийского океана характеризуется более высокими, чем обычно, температурами поверхности моря (ТПМ) в юго-западной части, к югу от Мадагаскара, и более низкими, чем обычно, температурами поверхности моря у берегов Австралии, вызывающими обильные осадки во многих регионах над Южной и Центральной Африкой. Положительные SIOD события также вызывают увеличение количества летних осадков на значительной части юго-востока Африки, вызывая усиление конвергенции влаги. Более высокие температуры над теплым полюсом в юго-западной части Индийского океана приводят к повышенному испарению, и этот влажный воздух поступает в Мозамбик и восточную часть Южной Африки, что усиливается аномалией низкого давления, возникающей над этим теплым полюсом. Это явление связано с увеличением вероятности развития тропических циклонов в юго-западной части бассейна Индийского океана. Отрицательная фаза SIOD характеризуется противоположными условиями, с более теплыми ТПМ в восточной части и более холодными над юго-западной частью.

iii. Вектор ветра и уходящая длинноволновая радиация

Зональный ветер важен для сезонных прогнозов осадков, поскольку он многое говорит об адвекции влажности, конвергенции и т. д. Многие исследования продемонстрировали связь между явлениями западного/восточного ветра среднего уровня и влажными/сухими периодами. Это обобщение справедливо для прибрежных регионов, но наоборот отношения существуют в западных частях страны. В горной местности влажные/засушливые периоды связаны с аномалиями западного/восточного ветра на уровне 700 гПа. У побережья преобладает противоположная картина аномалии. Восточная аномалия вдоль побережья Танзании указывает на адвекцию влаги из океана, тогда как западная аномалия над западными областями указывает на адвекцию влаги из Конго и может распространяться до прибрежных районов. Рассмотрение зональных ветров на разных уровнях также может помочь в прогнозировании, если обратиться к динамике атмосферы (ссылаясь на сдвиг ветра, взаимосвязь теплового ветра и т. д.).

Уходящая длинноволновая радиация (Outgoing Longwave Radiation - OLR) — это мера количества энергии, излучаемой в космос земной поверхностью, океанами и атмосферой. Таким образом, он является критическим компонентом радиационного баланса Земли. Оценки OLR являются ключевым компонентом стандартной диагностики осцилляции Маддена-Джулиана (Madden-Julian Oscillation - МДО), которая используется для изучения МЮ и для оценки моделей климата. Осцилляция Маддена – Джулиана является доминирующим компонентом внутрисезонной изменчивости тропической атмосферы. Для него характерны распространяющиеся на восток, экваториальные бароклинные колебания в поле тропического ветра. Во время типичного события МДО положительная аномалия конвекции/дожда развивается над западной частью Индийского океана, в то время как конвекция имеет тенденцию подавляться дальше на восток над западной частью Тихого океана. В течение следующих 40–50 дней усиленная конвективная аномалия в Индийском океане усиливается и медленно распространяется на восток (3–5 м/с) в центральную часть Тихого океана.

Уходящее длинноволновое излучение говорит о расположении систем низкого давления и поверхностной конвекции. Данные об уходящей длинноволновой радиации в верхних слоях атмосферы наблюдаются с помощью усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (AVHRR) на борту полярно-орбитального космического корабля NOAA. Данные сосредоточены в экваториальных областях от 160° восточной долготы до 160° западной долготы. Необработанные данные преобразуются в стандартизированный индекс аномалий. Отрицательные (положительные) OLR указывают на усиленную (подавленную) конвекцию и, следовательно, на большую (меньшую) облачность (типично для эпизодов Эль-Ниньо/Ла-Нинья). Больше (меньше) конвективной активности подразумевает более высокие (нижние) более холодные (теплые) вершины облаков, которые излучают в космос гораздо меньше (больше) инфракрасного излучения.

iv. Низкоуровневые стратосферные колебания/Квазидвухлетнее колебание-КДК

Квазидвухлетнее колебание (КДК) представляет собой тропическую, наблюдающуюся в нижней стратосфере и распространяющуюся вниз зональную вариацию ветра со средним периодом 28 месяцев. Хотя КДК является тропическим явлением, оно влияет на стратосферный поток от полюса к полюсу, модулируя эффекты внетропических волн. Важность влияния КДК заключается в том, что оно доминирует над изменчивостью экваториальной стратосферы (16-50 км) и легко рассматривается как нисходящий режим восточного и западного ветра. КДК также важно для сезонного прогнозирования, а КДК контролирует стратосферный озон и изменчивость водозапаса атмосферы, который может модулировать поверхностное ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение.

## 2.1 Эмпирические (Статистические) методы сезонного прогноза

Эмпирические методы используют статистические взаимосвязи между предиктором – переменными, используемыми для составления прогноза, и предиктантом — прогнозируемой переменной, обычно с использованием какой-либо регрессионной модели с использованием данных наблюдений. Одним из примеров такого подхода является использование индекса Ниньо-3,4 (предиктор) для прогнозирования сезонного количества осадков (предиктант).

Предикторы идентифицируются посредством физического анализа механизмов, контролируемых предикторы. Например, многие Региональные форумы по ориентировочным прогнозам климата (Regional Climate Outlook Forums (RCOFs)) во всем мире используют наблюдаемые ТПО тропического океана за предыдущий месяц в качестве предиктивного поля для прогнозирования осадков и температуры поверхности суши на целевой сезон.

Хотя существует большое разнообразие статистических методов разного уровня сложности, наиболее часто используемые модели строятся с использованием линейной регрессии (ЛР). Построение статистической модели включает вычисление значений коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в уравнении регрессии:

$$Y = \alpha X + \beta \quad (2.1)$$

где  $Y$  – предиктант,  
 $X$  – предиктор,  
 $\alpha, \beta$  – коэффициенты

Модели, непосредственно использующие значение предиктора, обычно называются простыми моделями линейной регрессии; при использовании нескольких предикторов они называются моделями множественной линейной регрессии (МЛР). Чтобы свести к минимуму ошибки мультиколлинеарности (предикторы не являются полностью независимыми) и ошибки кратности

(слишком много предикторов), обычно выполняется уменьшение размерности пространства предикторов путем вычисления эмпирических ортогональных функций (EOF) переменной предиктора. Когда модель регрессии использует EOF предиктора в качестве  $X$ , модель называется регрессией основных компонентов [8].

Основное преимущество статистических методов заключается в том, что они просты в реализации и эксплуатации, а недостатком является тот факт, что они основаны на стационарных отношениях между предиктором и предиктантом, что не гарантируется в условиях меняющегося климата.

В эмпирическом методе используются программные пакеты: Инструменты прогнозирования климата (IRI Climate Predictability Tool (CPT) и SADC Climate Forecasting Tool (CFT)) и SEAFORDS.

#### 2.1.1 Пакет SEAFORDS

Это набор статистических инструментов, предназначенных для анализа климата и масштабирование долгосрочного прогноза погоды. Он разработан и поддерживается Meteo France Reunion. Он разработан с использованием статистического языка R с открытым исходным кодом. Инструменты оценки изменчивости климата включают:

- Анализ главных компонентов;
- Композитный анализ;
- Ежегодный анализ;
- Канонический корреляционный анализ.

Разукрупнение долгосрочного прогноза выполняется с помощью статистического модель (регрессия), основанная на связях между крупномасштабными и локальными или параметризацией регионального масштаба.

Статистическое масштабирование выполняется с использованием регрессионной модели, которая использует корреляцию между крупномасштабными параметрами глобальных климатических моделей и

данными локального масштаба. Связи между паттернами корреляции в большом и локальном масштабе определяется с помощью канонического корреляционного анализа. Сокращение количества переменных (каждая точка сетки является переменной) и независимость между переменными достигается с помощью анализа главных компонент.

### 2.1.2 Инструмент прогнозирования климата (IRI Climate Predictability Tool (CPT))

CPT предназначен для создания статистических долгосрочных прогнозов сезонного климата с использованием либо выходных данных моделей глобального климата (Global Climate Models (GCMs)), либо с использованием полей температуры поверхности океана или аналогичных предикторов. Хотя программное обеспечение специально разработано для этих приложений, его можно использовать в более общих условиях для выполнения канонического корреляционного анализа (canonical correlation analysis (CCA)), регрессии основных компонент (principal components regression (PCR)) или множественной линейной регрессии (multiple linear regression (MLR)) для любых данных и для любого приложения [9]. Для всех методов анализа требуется два набора данных: набор данных «X-переменные» или «X-предикторы» и «Y-переменные» или «Y-предиктанты». Переменные X используются для прогнозирования переменных во втором наборе данных, который должен содержать «переменные Y». Переменные X используются для прогнозирования переменных во втором наборе данных, который должен содержать «переменные Y». Чаще всего набор данных Y содержит набор суммы сезонных осадков или средних температур по станциям. На рисунке 2.1 показан стартовый экран CPT.



Рисунок 2.1 – Стартовый экран инструмента прогнозирования климата

В инструменте СРТ можно использовать три типа данных: форматы данные на сетке точек, данные на станциях и данные без географической привязки. Данные для разработка на СРТ загружаются из библиотеки данных IRI (The International Research Institute for Climate and Society). Используемые предиктанты — это группа климатических опасностей со стационарными данными (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)), а предикторы — это глобальные температуры поверхности океана, среднее давление на уровне моря, геопотенциальная высота, ветер на разных уровнях и ретроспективный прогноз осадков полученные из моделей глобального климата (МГК). ССА идеально подходит, когда есть много предикторов (например, пространственные данные об осадках) и много предикторов. Из-за этого атрибута ССА рекомендуется для уменьшения масштаба МГК. В этой процедуре взвешенные суммы предикторов сопоставляются со взвешенными суммами предиктантов. Навыки моделей определяются на основе корреляционного и дисперсионного анализа. Исследования показывают, что инструмент имеет хорошие навыки прогнозирования сезонов дождей с октября по декабрь, но плохие навыки

прогнозирования сезонов дождей с марта по май [10]. На рисунке 2.2 показан сезонный прогноз МАМ 2022 и навывк (корреляция между предиктором и предиктором).

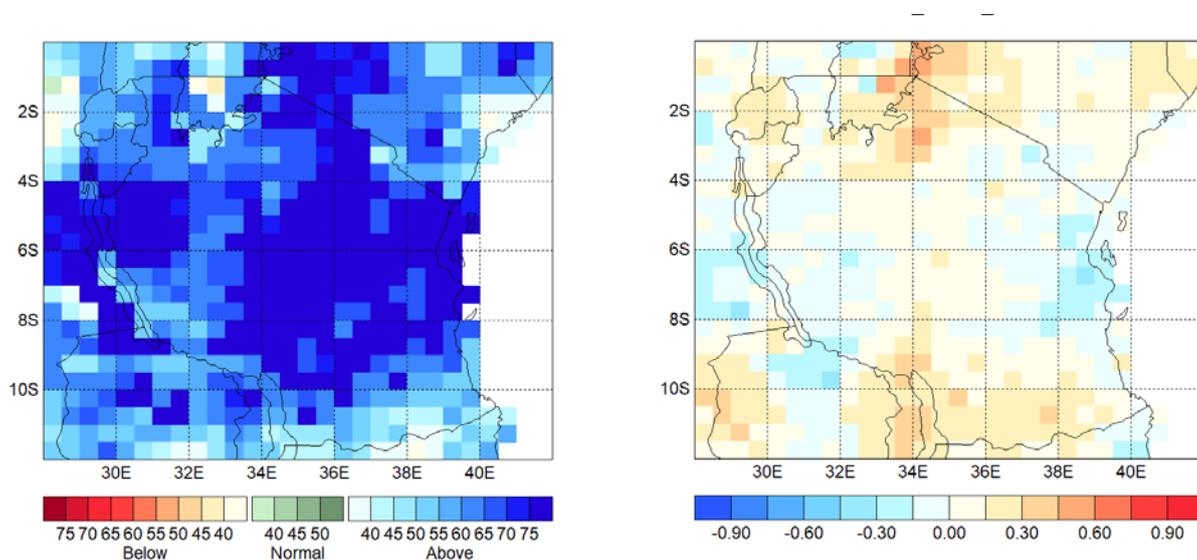


Рисунок 2.2 – Прогноз осадков на март-май 2022 г. (левая панель); корреляция между предиктором и предиктантом (правая панель)

CFT позволяет настраивать параметры. Опция климатологического периода позволяет указать период, используемый для расчета терцилей (или других пороговых значений), используемых для прогнозов. Категории и вероятности прогноза будут рассчитаны с использованием нового климатологического периода. Результаты прогноза можно просмотреть в виде вероятностных прогностических карт или прогностических значений или же доступна более подробная информация для прогнозов в отдельных точках сетки, станциях или временных рядах.

### 2.1.3 Регрессионный анализ с использованием инструмента прогнозирования климата (Climate Forecasting Tool (CFT))

Инструмент климатического прогнозирования (Climate Forecasting Tool CFT) — это статистический инструмент сезонного прогнозирования, разработанный центром климатического обслуживания в рамках проекта

Южноафриканских региональных климатических информационных служб для развития устойчивости общества к стихийным бедствиям. Он использует основные утилиты географической информационной системы (Quantum Geographic Information System (QGIS)) версии 3 и программируется на языке программирования python. Основной целью этого инструмента является поддержка центров климатического обслуживания и Национальных метеорологических и гидрологических служб в автоматизации создания климатической продукции.

Инструменту требуются предикторы (данные станций/CHIRPS) в формате csv и предиктанты (температуры поверхности моря, среднее давление на уровне моря и т. д.) в формате netCDF/csv и он использует два метода: линейную регрессию (ЛР) и нейронные сети (многослойный перцептрон – Multi-Layer Perceptron (MLP)) для составления прогноза. Многослойный перцептрон использует искусственную нейронную сеть, которая изучает взаимосвязь между линейными и нелинейными данными. На рисунке 2.3 показан МАМ 2022 сезонный прогноз осадков с помощью СФТ.

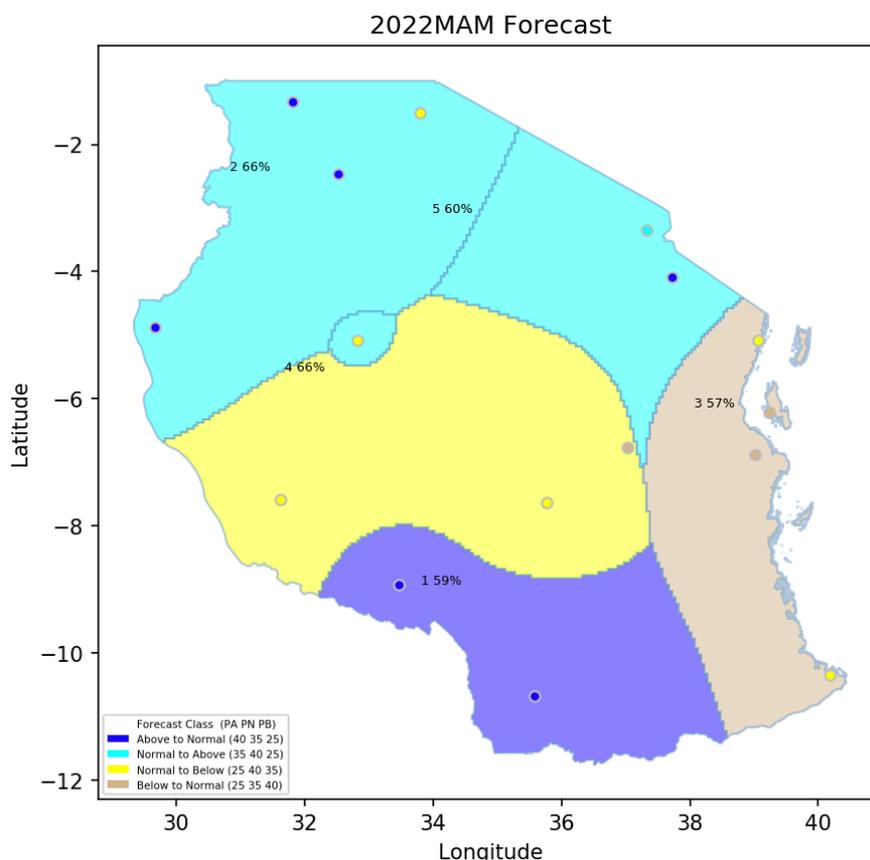


Рисунок 2.3 – Долгосрочный прогноз осадков Танзании с Марта по Май 2022 с помощью SFT

#### 2.1.4 Прогноз на основе аналогов

Годы-аналоги – это предыдущие года, когда поведение ТПО в океанских бассейнах наиболее похоже к текущему году. В этом методе сравнивают временную изменчивость и значения ТПО за исторические годы (с 1981 г. по настоящее время) с текущим годом и прогнозом на следующие три месяца. Предварительный выбор лет-аналогов осуществляется путем анализа данных о сезонных аномалиях ТПО и их временной изменчивости в регионе ЭНЮК (Нинью 3.4).

Год выбирается заранее, если он имеет почти одинаковые значения в течение, как минимум 6 месяцев и аналогичные в течение следующих трех месяцев. Подход состоит в сравнении карт месячных (3 месяца назад) и сезонных (2-3 предыдущих сезона) аномалий ТПО с картами текущего года.

Затем эволюция атмосферы в аналоговые годы является основой прогноза для целевого года [11].

2.2 Гидродинамические методы (включая модель WRF-ARW, которая используется в отделе численного прогнозирования погоды в ТМА)

Гидродинамическое прогнозирование использует полные трехмерные модели климата для точного моделирования возможных изменений в атмосфере и океане в течение следующих нескольких месяцев в зависимости от текущих условий. Гидродинамическое прогнозирование очень ресурсоемко и требует доступа к обширной вычислительной инфраструктуре, как для прогнозов, так и для анализа и создания начальных условий (процесс, который также требует инфраструктуры для усвоения данных и приема глобальных наблюдений на месте и со спутников в режиме реального времени) для различных компонентов земной системы. Их основные преимущества заключаются в том, что они способны улавливать нелинейные взаимодействия атмосферы, суши и океана и адаптируются к изменениям климата. Однако они страдают от общей проблемы, заключающейся в том, что разброс членов ансамбля имеет тенденцию быть слишком узким (чрезмерно самоуверенным) а климатология моделирования не всегда согласуется с соответствующими наблюдениями [12].

При подготовке сезонного прогноза для Танзании используется несколько гидродинамических моделей, в том числе WRF, ECMWF, IRI, NOAA, ведущий центр ВМО по долгосрочным прогнозам мультимodelей ансамбля и анализ аномалий температуры поверхности моря, зональных ветров, среднего давления на уровне моря, температуры поверхности и прогноза осадков. Выход гидродинамических моделей может быть детерминированным или вероятностным прогнозом. Детерминированный сезонный прогноз представлен в виде средних по ансамблю аномалий на один или три месяца вперед. Аномалии среднего по ансамблю представляют собой разность между

средним по ансамблю прогнозов и модельным «климатологическим» средним. Вероятности прогноза выражены для трехмесячных средних и основаны на прогнозе аномалии вероятности для разных категорий (ниже нормы, около нормы и выше нормы). Отображение вероятностей прогноза в сочетании с климатическим порогом, полученным на основе наблюдаемого климата, может помочь в интерпретации вероятностного прогноза. Что касается среднего детерминированного прогноза по ансамблю, вероятности прогноза должны отображаться в сочетании с соответствующими вероятностными оценками навыков.

Танзания, как и другие страны Восточной Африки, предоставляет субъективный сезонный прогноз после достижения консенсуса экспертов по климату путем анализа статистических и динамических моделей. На рисунке 2.4 показан консенсусного ОНД 2021 прогноза сезонных осадков в Танзании. в бимодальных районах (северная часть Танзании)

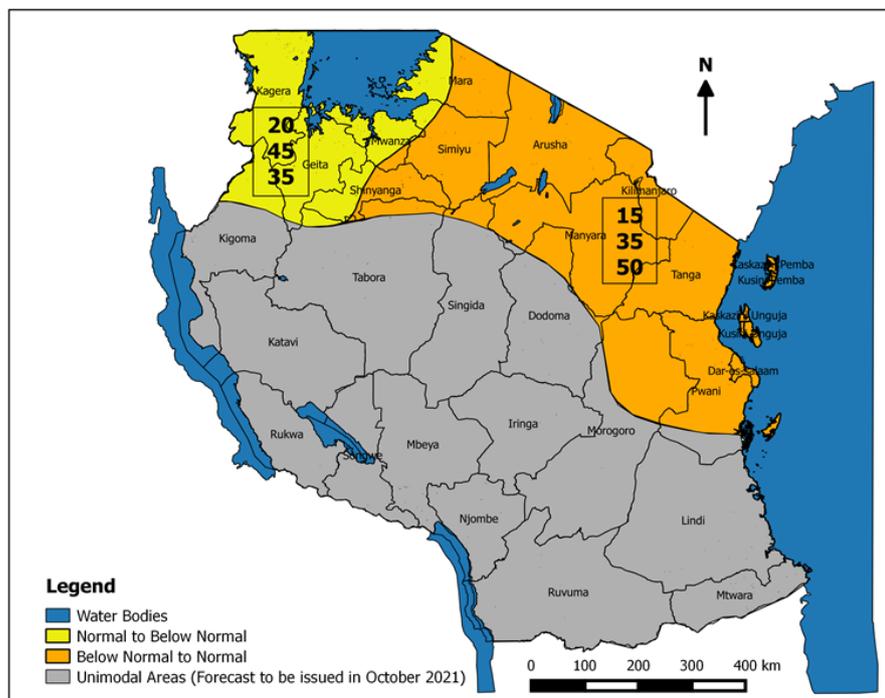


Рисунок 2.4 – Пример консенсусного прогноза сезонных осадков в Танзании на октябрь-декабрь 2021 г. в бимодальных районах (северная часть Танзании) [13]

После разработки сезонного прогноза ТМА готовит Национальный форум по прогнозам, на котором собираются эксперты из различных секторов для обсуждения и подготовки ожидаемых воздействий сезонного прогноза. Окончательное заявление о сезонном прогнозе включает прогноз, краткое объяснение ожидаемых климатических систем, ожидаемых воздействий и рекомендации.

### 3. Потенциальные предикторы долгосрочного прогноза осадков Танзании

Формирование осадков в Танзании, как и в любом другом районе Земли, определяется направлением и интенсивностью воздушных переносов, степенью увлажнения и стратификацией воздушных масс и особенностями региональных физико-географических условий. Значительные аномалии режима осадков непосредственно связаны с соответствующими преобразованиями атмосферной циркуляции. Длительные и крупномасштабные изменения интенсивности и географической локализации основных циркуляционных систем, являющихся звеньями общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Поскольку крупномасштабная атмосферная циркуляция напрямую связано со многими аспектами региональной изменчивостью климата. Изучение связей между моделями атмосферной циркуляции над Танзанией и количеством осадков там и в других местах имеет важное значение для понимания крупномасштабной изменчивости климата. Поэтому совершенствование и создание методов месячного и сезонного прогнозов погоды во всех странах основано на изучении закономерностей процессов преобразования атмосферной циркуляции и их связей с деятельным слоем океана и суши. Сезонный прогноз осадков обычно включают в себя оценку глобальных систем климата и его последствий для предстоящего сезона. К числу основных факторов, которые принимаются во внимание при разработке сезонных прогнозов осадков, относится температура поверхности океана в тропических бассейнах Тихого, Индийского и Атлантического океанов.

### 3.1 Выбор предикторов для долгосрочного прогноза осадков Танзании

Выбор потенциальных предикторов для долгосрочного прогноза осадков на территории Танзании осуществлялся на основе представлений, влияющих на общую циркуляцию атмосферы в тропической зоне. В их число включены:

- Явление Эль-Ниньо/Южное колебание;
- Диполь Индийского океана;
- Квазидвухлетнее колебание.

### 3.2 Оценка прогностического потенциала предикторов для долгосрочного прогноза осадков Танзании

#### 3.2.1 Явление Эль-Ниньо (Ла-Нинья) и Южное колебание

Явление Эль-Ниньо (Ла-Нинья) оказывает большое влияние на глобальный режим осадков. Явление Эль-Ниньо и Ла-Нинья – это длительные морские поверхностные аномалии температуры воды больше  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наблюдаемые в центральной тропической части Тихого океана. Когда наблюдается аномалия температуры водной поверхности Тихого океана выше  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (или ниже  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) свыше пяти месяцев, то это классифицируется как условие Эль-Ниньо (Ла-Нинья). Это естественное явление и происходит с нерегулярными промежутками в 2–7 лет и, обычно, продолжается один или два года. События Эль-Ниньо (Ла-Нинья) обычно бывают слабыми или умеренными, но иногда случаются сверхсильные или «супер» и нарушают нормальный цикл циркуляции в системе океан–атмосфера.

Южное колебание измеряется с использованием изменений приземного давления между экваториальной западной и восточной частью Тихого океана, в

частности, между участками в Дарвине, Австралия, и на Таити. Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК) является главнейшей формой изменения тропического климата, так как оно возникает, развивается в широком бассейне Тихого океана, и его последствия распространяются на внетропические регионы [14].

Первые признаки Эль-Ниньо следующие:

- ✓ Повышение воздушного давления над Индийским океаном, Индонезией и Австралией;
- ✓ Падение воздушного давления над Таити и в центральной и восточной частями Тихого океана;
- ✓ Пассаты в экваториальной части Тихого океана ослабляются или направляются на восток;
- ✓ Теплый воздух появляется рядом с Перу, вызывая дожди в пустынях;
- ✓ Теплая вода распространяется от западной части Тихого океана к восточной. Она несет с собой дождь, вызывая его в тех районах, где обычно бывает сухо [15].

Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) является наиболее заметной межгодовой вариацией климата на Земле, оказывающей большое экологическое и социальное воздействие. ЭНЮК является результатом сильной динамической связи между экваториальной частью Тихого океана и вышележащей атмосферой. ЭНЮК состоит из взаимосвязи между океаном (Эль-Ниньо: ЭН) и атмосферой (Южное Колебание: ЮК). Уоркер в 1923 г. впервые ввел термин «Южное колебание» для того, чтобы описать в многолетнем масштабе чередование системы высоких и низких давлений наблюдающихся в Тихом океаном. Индекс Южного колебания (разность аномалий давления между Таити и Дарвином) является характерным индексом изменения ЭНЮК.

Вначале слово «Эль-Ниньо» обозначало тёплое прибрежное течение вдоль побережья Перу и Чили, которое приносило в холодные воды этих

регионов «чудесных» рыб необыкновенных форм и расцветок. Каждый раз с периодом от 2 до 7 лет это тёплое течение происходило в течение нескольких месяцев, вследствие чего наблюдалась угроза уничтожения или миграции многих видов промысловых рыб. Более того, это потепление приносит значительные локальные ухудшения погоды и изменяет границу засухи между тропической зоной северного Перу и аридными регионами на юге.

Первое упоминание термина «Эль-Ниньо» относится к 1892г., когда капитан Камило Каррило сообщил на конгрессе Географического общества в Лиме, что перуанские рыбаки называли теплое северное течение «Эль-Ниньо», так как оно наблюдалось накануне Рождества. «Эль-Ниньо» - в переводе с испанского «младенец». В научный оборот названия этих явлений впервые введены в 1923 году Гилбертом Томасом Уолкером.

Индекс ЭНЮК определяется средним значением аномалии температуры поверхности воды в центральной части Тихого океана. Существует несколько районов мониторинга явления Эль-Ниньо.

- Ниньо 1+2 (от 90° з.д до 80° з.д ; от 10° с.ш до 0°),
- Ниньо 3 (от 150° з.д. до 90° з.д. ; от 5° с.ш. до 5° ю.ш.),
- Ниньо3.4 (от 170° з.д. до 120° з.д. ; от 5° с.ш. до 5° ю.ш. ),
- Ниньо4 (от 160° в.д до 150° з.д; от 5° с.ш до 5° ю.ш).

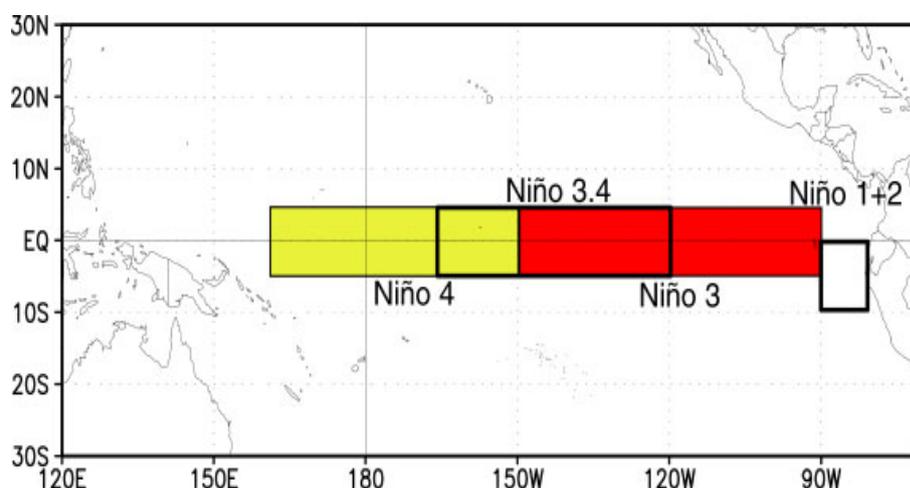


Рисунок 3.1 – Регионы мониторинга Эль-Ниньо в экваториальной части Тихого океана

В общем, явление ЭНЮК определяется своими различиями от нормальных условий, при которых восточные переносы в Тихого океана приводят к подъему глубинных холодных вод вдоль экватора; слой температурного скачка (термоклин) приближается к поверхности и охлаждает поверхностные воды. Более того, эти восточные переносы отодвигают тёплые воды в западной части Тихого океана, который представляет собой источник конвективной активности. При этом, теплый и влажный воздух поднимается, теряет постепенно свою влажность, а затем его уносят вверх западные переносы. Потом этот воздух опускается в атмосфере Тихого океана и присоединяет сухие регионы южной Америки к «ячейке Уолкера».

На рисунке 3.2 представлены нормальные условия (a) системы океан-атмосфера в экваториальной части Тихого океана и условия при явлении Эль-Ниньо (b) и Ла-Нинья (c).

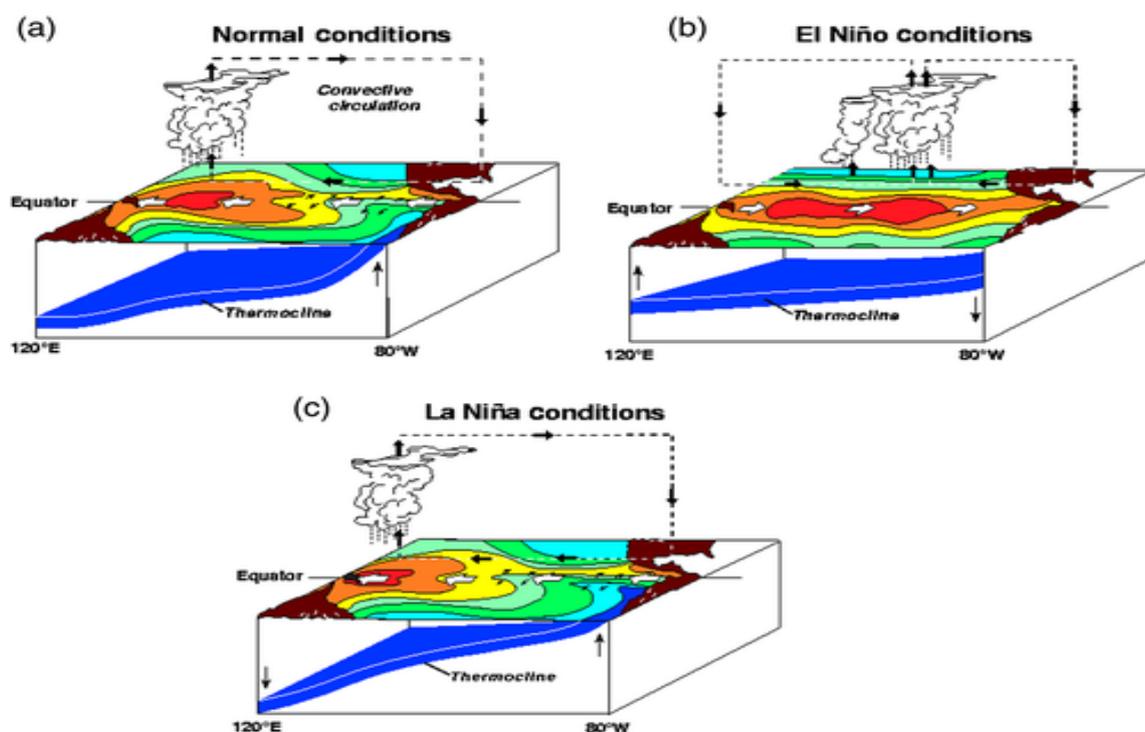


Рисунок 3.2 – Условия образования явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья [16]

В нормальных условиях более теплые воды (27–28 °С) располагаются на западе Тихого океана, а более холодные (22 – 23 °С) на востоке. В нормальных условиях термоклин наклонён с востока на запад. Над теплой водой в западной части Тихого океана развиваются мощные конвективные облака и выпадают осадки. В период Эль-Ниньо теплые воды смещаются на восток, термоклин поднимается на западе и углубляется на востоке, зона конвекции и осадков перемещается вслед за теплой водой на центральные и восточные районы Тихого океана. В период Ла-Нинья, наоборот, увеличивается угол наклона, осадки интенсифицируются над западной частью Тихого океана, пассаты усиливаются. Во время Эль-Ниньо тёплые воды Тихого океана распространяются на весь экваториальный бассейн и уносят с собой конвективные зоны. Данное явление развивается и часто достигает пика в декабре месяце, а затем постепенно убывает. За ним может следовать явление Ла-Нинья, характеризующееся усилением сезонного цикла и интенсификацией переносов и экваториального холодного языка, проникающего больше в западную сторону.

Важно отметить, что ЭНЮК неравномерно переключается между Эль-Ниньо и Ла-Нинья каждые два-семь лет. Каждая фаза вызывает предсказуемые нарушения в полях температуры, осадков и ветра в тропической части Тихого океана. Эти изменения нарушают крупномасштабное движение воздуха в тропиках, что вызывает каскад побочных глобальных эффектов.

Над Восточной Африкой отмечаются кратковременные дожди и ослабление юго-восточной циркуляции. Таким образом, наблюдается чистое воздействие ЭНЮК и поэтому осадки в Танзании являются результатом комплексного согласования и взаимодействия между несколькими потенциальными источниками изменчивости климата. В последние годы повышение интенсивности, связанное с глобальным потеплением, может значительно сместить тонкий баланс между различными источниками климатологической изменчивости климата Восточной Африки во время ЭНЮК [17].

Некоторые глобальные последствия, связанные с ЭНЮК. Наиболее сильное воздействие испытывают те страны, которые находятся вблизи тропического тихоокеанского происхождения ЭНЮК. Изменения приземной температуры, ветра и влажности влияют на интенсивность и характер осадков, что может привести к экстремальным явлениям, таким как наводнения и засухи. Во время явления Эль-Ниньо в Перу, Эквадоре и юго-восточных частях Южной Америки выпадают проливные дожди. В северной Бразилии могут возникнуть более сухие условия или даже засуха. Индонезия, Южная Азия и некоторые районы Австралии также более подвержены засухе во время фазы Эль-Ниньо. Изменение погодных условий, связанное с Эль-Ниньо, может сильно повлиять на экономику, в частности на сельское хозяйство, водные ресурсы, рыболовство и здравоохранение.

ЭНЮК в 1982/83 гг., являясь сильным рекордным событием до начала настоящих событий 1997/98 гг., несет ответственность за широко распространенные случаи засух, наводнений и ураганов во всем мире, в результате чего было зарегистрировано несколько сотен смертей и нанесен значительным ущерб.

Существенные изменения режима осадков при явлении Эль-Ниньо отмечаются в восточной и южной части Африки и приносят существенный ущерб экономике этих стран.

В 2015/16 гг. наблюдался один из трех мощных явлений Эль-Ниньо за последние 65 лет. Температура поверхности океана в центральной и восточной тропической части Тихого океана превысила  $+2,0$  °C выше среднего в период с октября 2015 года по февраль 2016 г [18].

Прогностический потенциал явления Эль-Ниньо при долгосрочном прогнозе осадков Танзании оценивался по корреляции индекса Ниньо 3.4 с наблюдаемыми суммами сезонных осадков. Для рассмотрения связи между ЭНЮК и осадками на территории Танзании были использованы данные по осадкам на 19 станциях за период с 1980 по 2020 гг, из Танзанийского Метеорологического Агентства, в качестве предиктора использовались данные,

полученные из NOAA [19]. Расположение метеостанций (используемых в исследовании) на территории Танзании приведены на рисунке 3.3.

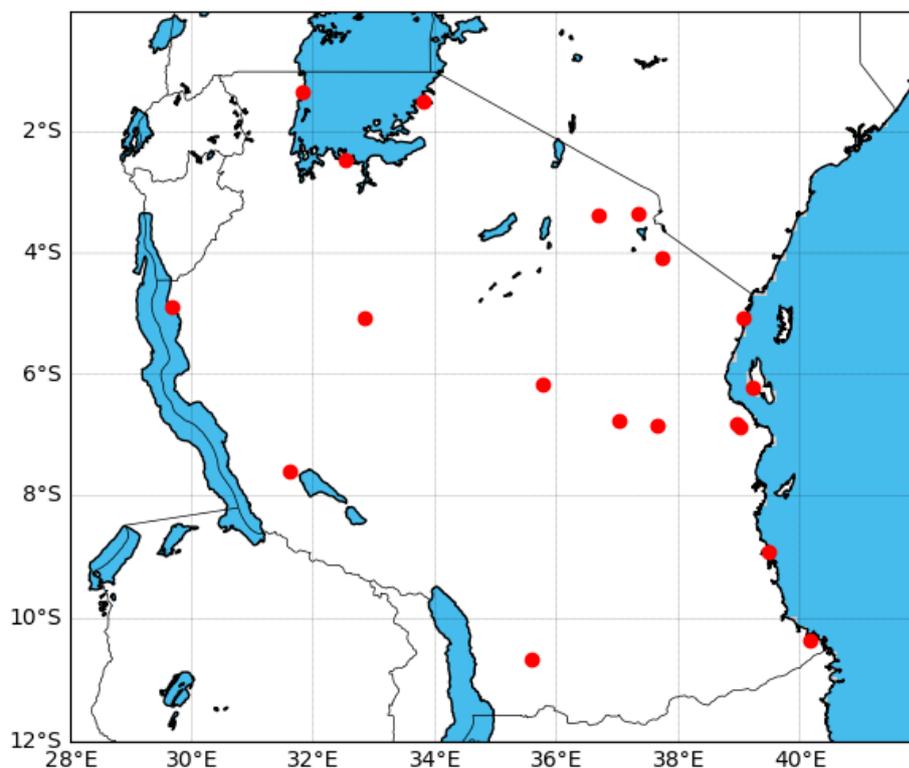


Рисунок 3.3 - Географическое расположения метеостанций (используемых в исследовании) на территории Танзании.

Методы обработки и оценки связи между режимом увлажнения и предикторами заключается в том, что рассчитываются коэффициенты корреляции Пирсона ( $r$ ) между рядами сезонных осадков и предикторов. Коэффициент корреляции является хорошим индикатором, поскольку он определяет величину взаимосвязи между двумя физическими переменными. Корреляция Пирсона была рассчитана с использованием программы Питон, а также  $p$ -значения для проверки статистической значимости (при уровне значимости 5%). Коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) рассчитываются по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

где  $X_i$  – текущие значения предиктора,  
 $Y_i$  – текущие значения предиктанта,  
 $\bar{X}$  – среднее значение в рассматриваемый период наблюдений,  
 $\bar{Y}$  – среднее значение в рассматриваемый период наблюдений,  
 $N$  – количество лет в выбранном периоде наблюдений.

Анализ корреляционной связи показывает, что с марта по май (МAM сезон) мало данных об осадках на станциях хорошо коррелируют с индексами ЮК. Например, на метеостанциях Танга, Килва, Сумбтаванга, Занзивар и Додома, но не является статистически значимыми при уровне значимости 5%. Так что индекс ЮК (Ниньо 3,4) не может использоваться в качестве предиктора для долгосрочного прогноза в сезоне МAM. Результаты расчета корреляции Пирсона для сезона МAM представлены на рисунке 3.3.

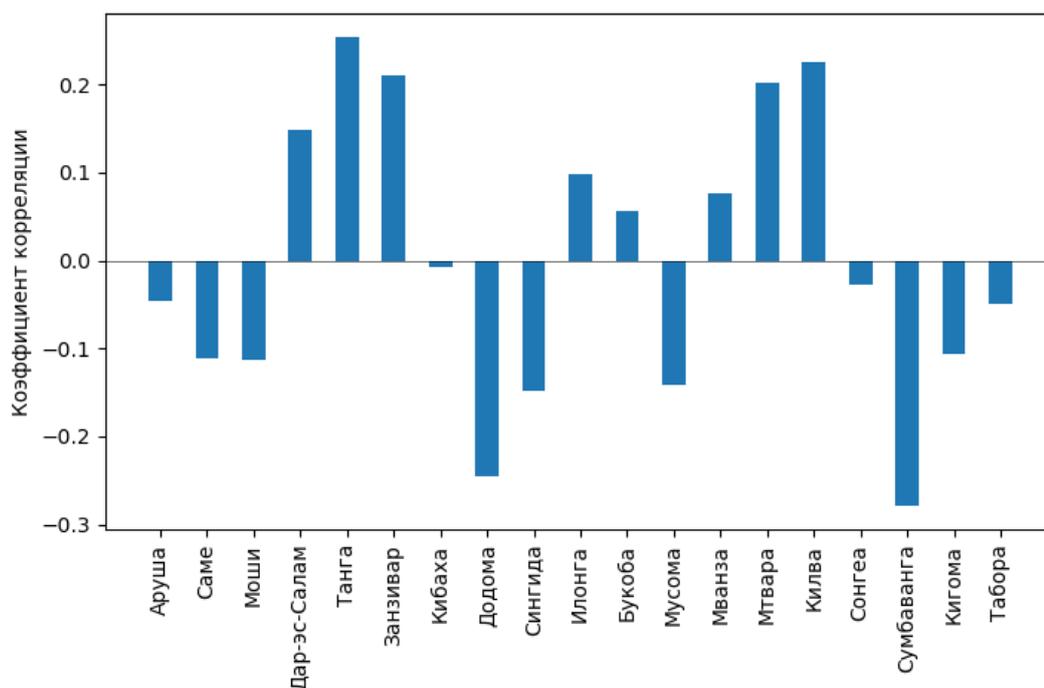


Рисунок 3.4 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами МАМ сезонных осадков и Ниньо 3,4

Для ОНД сезона осадки на большинстве станций показывают хорошую корреляцию по Пирсону с индексом ЭНЮК, особенно осадки на станциях, расположенные на севере страны, где наблюдается бимодальный режим осадков. Осадки на станции Кигома, расположенной на западе страны, слабо коррелируют с индексом ЭНЮК. Для ОНД сезона можно использовать индекс Ниньо 3.4 в качестве потенциального предиктора для прогноза осадков на станциях Аруша, Саме, Моши, Танга, Додома, Занзибар, Илонга, Букоба, Мусома, Мванза, Килва и Сонгеа. На этих метеостанциях существуют значимые значения корреляции по Пирсону. На рисунке 3.5 показаны результаты расчета корреляции по Пирсону между рядами ОНД сезонных осадков и Ниньо 3,4.

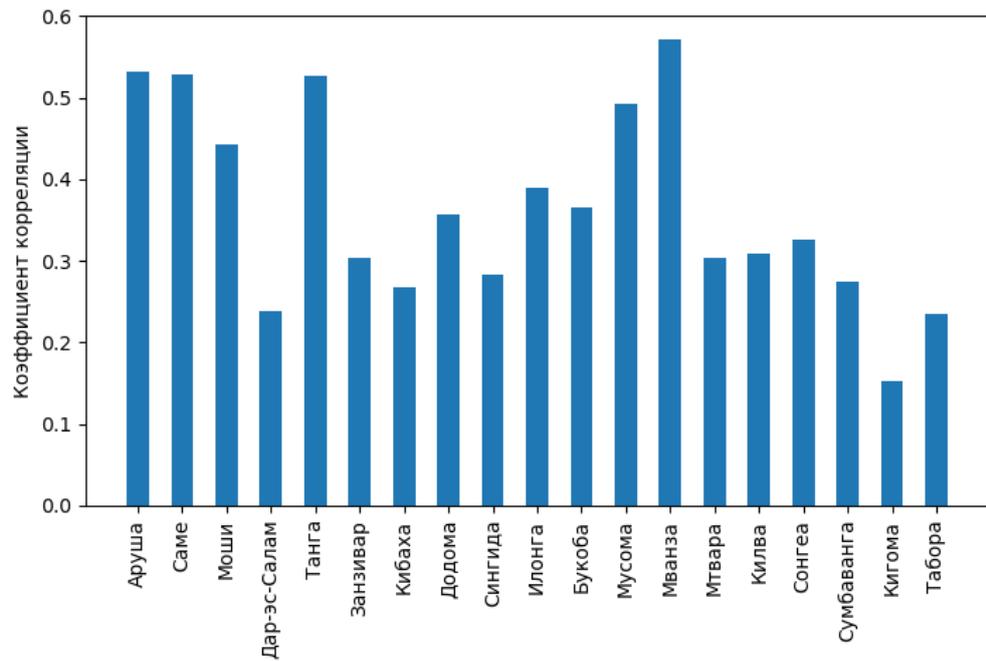


Рисунок 3.5 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами ОНД сезонных осадков и Ниньо 3,4

Для иллюстрации временные ряды нормированных аномалии Ниньо 3,4 и ОНД осадков на некоторых метеорологических станциях представлены на рисунке 3.6.

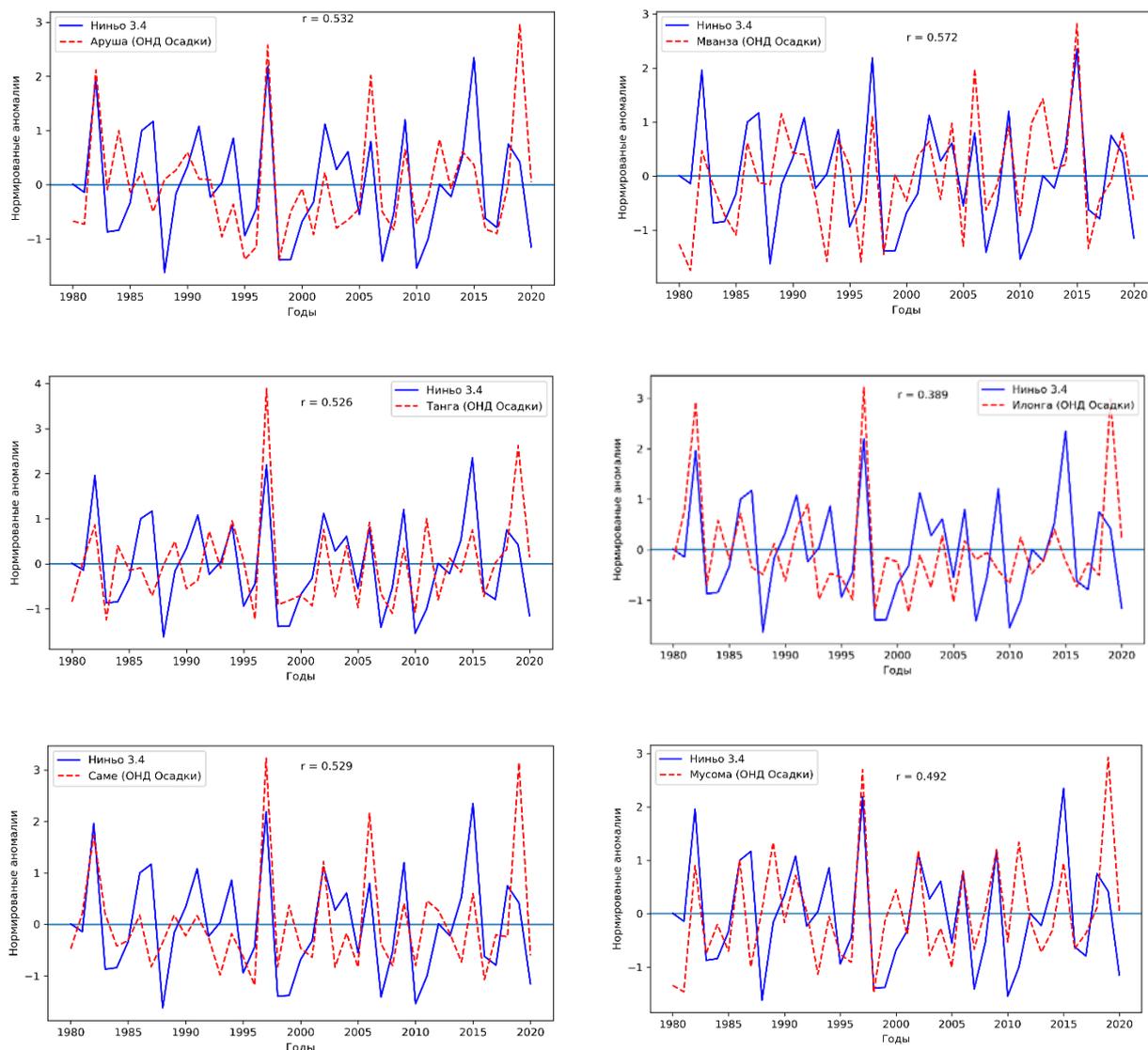


Рисунок 3.6 – Временные ряды нормированных аномалии Ниньо 3,4 и ОНД осадков на некоторых метеорологических станциях.

Из анализа рисунка 3.6 видно, что не только есть хорошие корреляции, но и в 1997 г. наблюдается избыток осадков на многих метеостанциях при явлении Эль-Ниньо. Это было одно из сильнейших Эль-Ниньо, сопровождавшееся наводнением на большей части восточной Африки. В общем, можно использовать явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья (Ниньо 3,4) в качестве потенциального предиктора для долгосрочного осадков Танзании в сезоне ОНД в большинстве районов страны по сравнению с сезоном МАМ. Потому что в сезон МАМ большинство станций имеют слабую корреляцию с Ниньо 3,4.

### 3.2.2 Диполь Индийского океана (IOD – Indian Ocean Dipole)

Диполь Индийского океана (IOD) представляет собой нерегулярное колебание температуры поверхности моря, при котором западная часть Индийского океана становится попеременно теплее (положительная фаза), а затем холоднее (отрицательная фаза), чем восточная часть океана. Распространение бароклинных волн Кельвина и Россби, возбуждаемых аномальными ветрами, играет важную роль в развитии аномалий температуры поверхности океана, связанных с ИОД. Поскольку средний термоклин в Индийском океане более глубокий по сравнению с термоклином Тихого океана, долгое время считалось, что Индийский океан пассивен и лишь реагирует на атмосферное воздействие. IOD включает в себя периодические колебания температуры поверхности океана между положительной, нейтральной и отрицательной фазами. Положительный IOD характеризуется теплой аномалией ТПО над западной экваториальной частью Индийского океана ( $50^{\circ}$  –  $70^{\circ}$  в.д.,  $10^{\circ}$  С –  $10^{\circ}$  N) и холодной аномалией ТПО в юго-восточной экваториальной части Индийского океана ( $90^{\circ}$  –  $110^{\circ}$  в.д.,  $10^{\circ}$  S – экватора) а и отрицательный IOD наоборот. Положительные и отрицательные явления IOD часто совпадают с явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, соответственно, но могут происходить независимо друг от друга. В положительной фазе IOD происходит уменьшение температуры поверхности океана в юго-восточной части Индийского океана, у северного побережья Австралии, восточного побережья Японии и Индонезии, а увеличение ТПО в западной экваториальной части Индийского океана, у восточного побережья Африки, от северной части Мадагаскара до северного Сомали. Таким образом, конвективные образцы увеличиваются в северной части Африки, Индии и у восточного побережья Африки. Обратные условия существуют во время отрицательного события IOD.

IOD представляет собой зональную дипольную структуру различных связанных параметров океана и атмосферы, таких как ТПО, преземное давление, уходящая длинноволновая радиация и аномалии высоты поверхности моря. Исследования показывают, что аномалии ТПО в Индийском океане оказывают существенное влияние на региональную атмосферную циркуляцию и аномалии осадков, распространяющиеся в восточной и южной частях Африки. Положительный IOD связан с более высоким, чем в среднем, количеством осадков во время восточноафриканских коротких дождей в период с октября по декабрь. Более высокое количество осадков во время с октября по декабрь связано с высокими температурами поверхности моря в западной части Индийского океана и низкими западными ветрами в экваториальной области океана, что приносит влагу в регион Восточной Африки. Было обнаружено, что увеличение количества осадков, связанное с положительным IOD, привело к увеличению наводнений в Восточной Африке.

IOD оказывает большое влияние на сезоны дождей в странах, окружающих тропический Индийский океан, включая экваториальную Восточную Африку, Индию и Индонезию. Над Африкой IOD связан с влажными и засушливыми условиями вдоль побережья Индийского океана, простирающегося от Сомали до Мозамбика, в течение сентября-декабря. В Азии IOD связан с влажными и засушливыми условиями в октябре-декабре над центральным и северным Афганистаном и в августе-декабре над южным Китаем. IOD связан с широко распространенными влажными и засушливыми условиями в Австралии. Восточная и южная Австралия чувствительны к IOD в июле-октябре [20]. За последние десятилетия произошло два экстремально положительных IOD: один в 1997 г., а другой в 2019 г. В 1997 г. экстремальный IOD привел к засухе и лесным пожарам в Индонезии и Австралии, тогда как наводнения в восточной части Африки.

IOD был определен в 1999 году группой ученых, работающих в рамках Программы климатических вариаций Системы пограничных исследований

глобальных изменений Японского центра морской науки и технологий. На рисунках 3.7 и 3.8 показаны схематическая диаграмма аномалии температуры поверхности океана (красная штриховка обозначает потепление, синяя – охлаждение) при положительной и отрицательной диполи события IOD, белые пятна свидетельствуют о повышении активности конвективной деятельности со стрелками, указывающими направление ветра.

Positive Dipole Mode

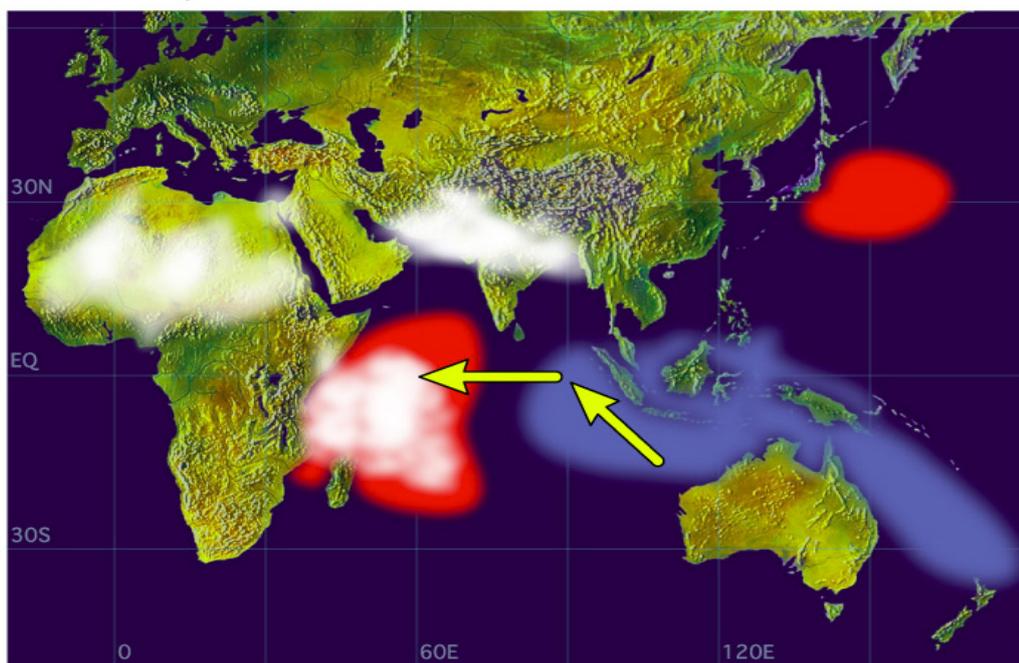


Рисунок 3.7 – Схема положительной дипольной моды (Адаптированный: А. Сурясахандра Пао, институт по исследованиям глобальных изменений, город Йокохама, Япония)

### Negative Dipole Mode

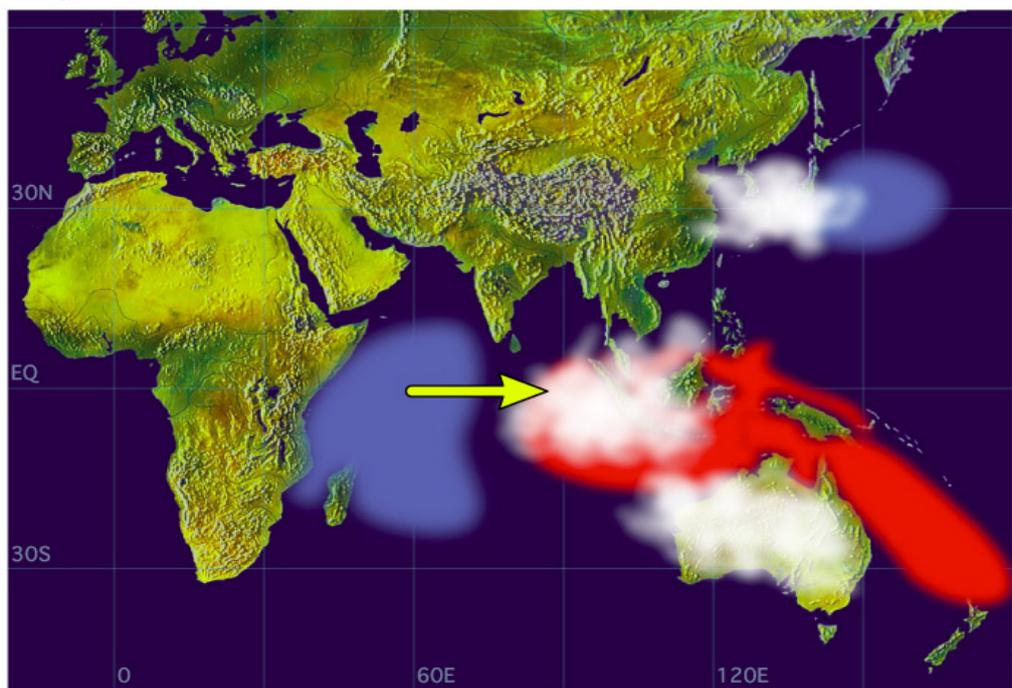


Рисунок 3.8 – Схема отрицательной дипольной моды (Адаптированный: А. Сурьясхандра Пао, институт по исследованиям глобальных изменений, город Иокохама, Япония).

Для рассмотрения связи между IOD и осадками были использованы данные индекса IOD, полученные из NOAA [21]. Анализ корреляционной связи показывает, что с марта по май (МAM сезон) также, как при явлении Эль-Ниньо, мало осадков на станциях хорошо коррелируют с индексами IOD. Осадки только на двух станциях показывают хорошую корреляцию: Букоба (положительная корреляция) и Табора (отрицательная корреляция). Но в основном коэффициенты корреляции сезонных (МAM) сумм осадков между станциями не является статистически значимым при уровне значимости 5 % кроме метеостанции Табора, где IOD можно использовать в качестве предиктора в течение сезона МAM. Результаты расчета корреляции по Пирсону между рядами МAM сезонных осадков и IOD представлены на рисунке 3.9.

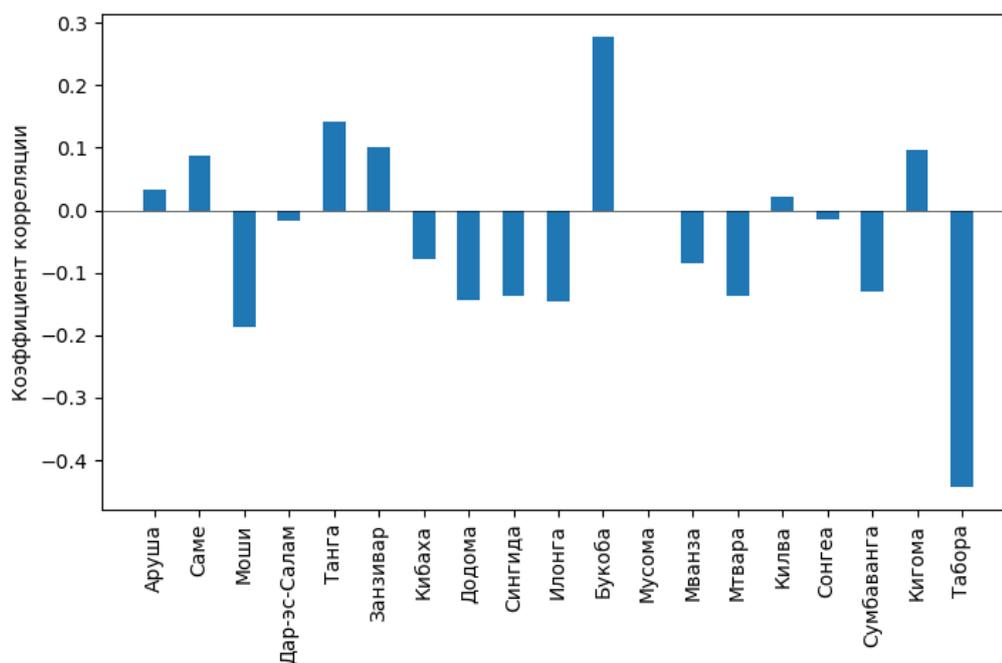


Рисунок 3.9 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами МАМ сезонных осадков и IOD

Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами ОНД сезонных осадков и IOD показывают, что на большинстве метеостанций количество осадков имеют хорошую корреляцию с индексом IOD со статистической значимостью на уровне значимости 5%, за исключением осадков на метеостанциях Мтвара, Кигома и Табора. Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами ОНД сезонных осадков и IOD представлены на рисунке 3.10.

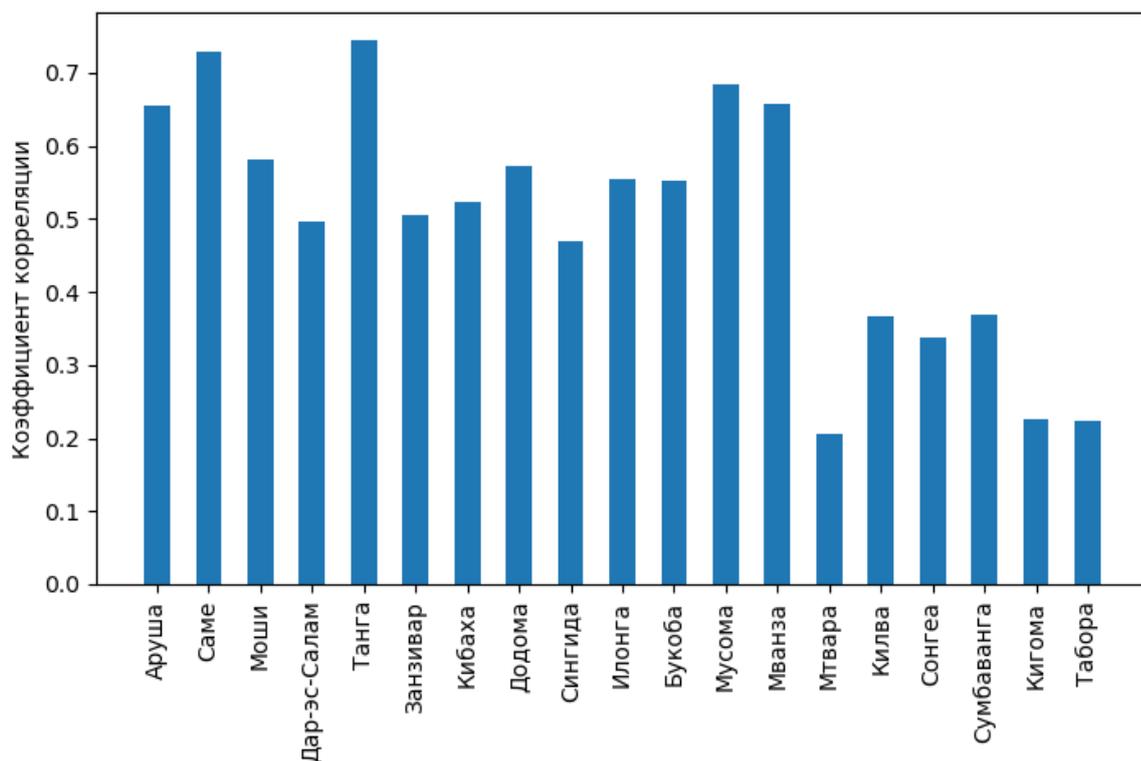


Рисунок 3.10 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами ОНД сезонных осадков и IOD

Анализ временных рядов стандартизированных аномалий между количеством осадков OND и индексом IOD показывает почти аналогичную тенденцию для большинства станций, использованных в этом исследовании. Временные ряды стандартизированных аномалий между количеством осадков OND и индексом IOD показаны на рис. 3.11.

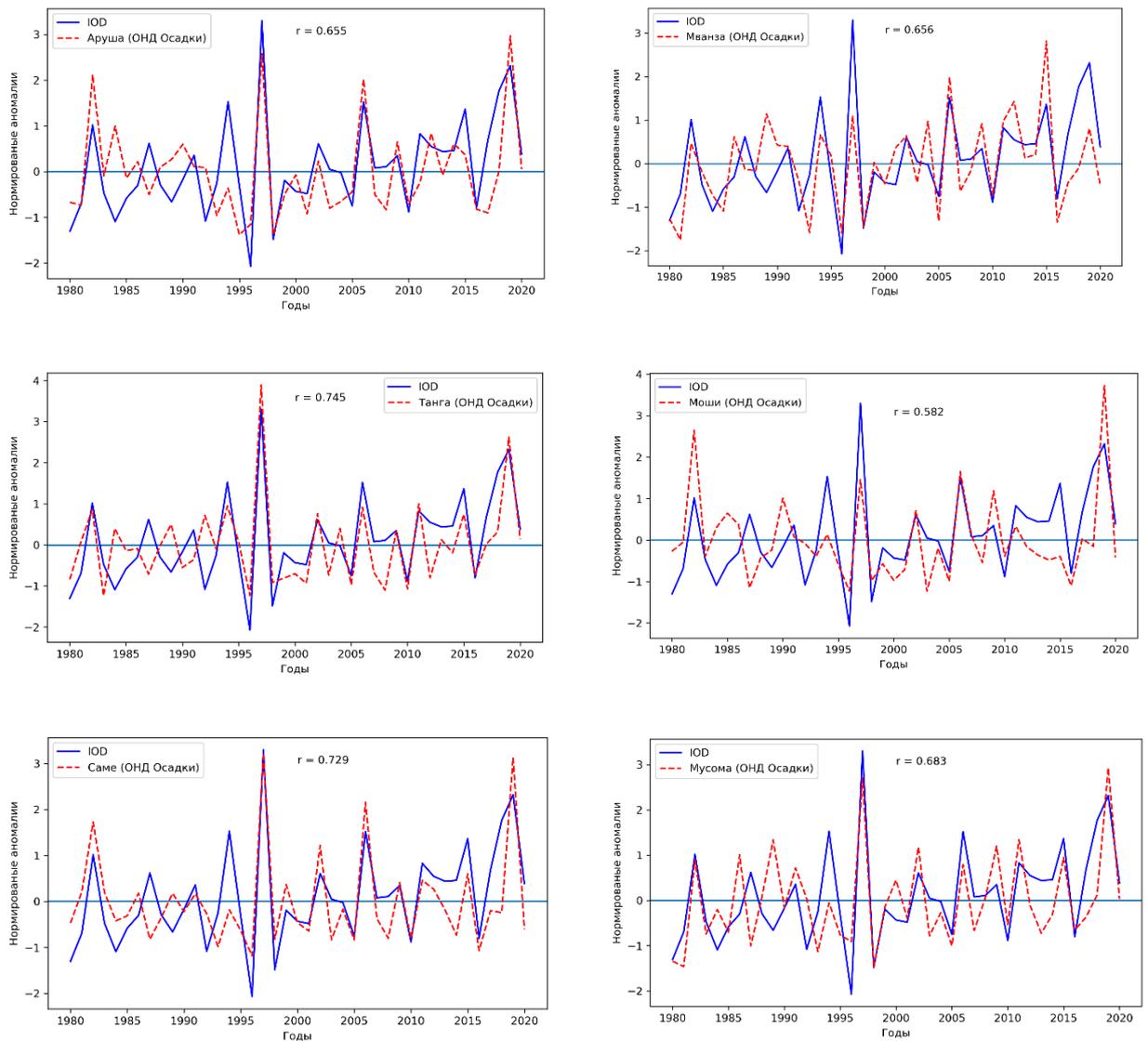


Рисунок 3.11 – Временные ряды нормированных аномалии IOD и ОНД осадков на некоторых метеорологических станциях.

Также в 1997 г. над Индийским океаном наблюдались сильные положительные ИОД, совпадающие с Эль-Ниньо в результате значительное выше нормы осадков в сезоне ОНД над большей частью Танзании. В целом можно делалъ вывод, что в качестве предиктора для прогноза осадков на территории Танзании, индекс IOD можно использовать для прогноза осадки в сезоне с Октября по Декабрь (ОНД).

### 3.2.3 Квазидвухлетняя цикличность в стратосферной циркуляции экваториальной зоны

Квазидвухлетнее колебание (КДК) - это режим ветра восточных и западных направлений в экваториальной стратосфере, охватывающий высоты примерно от 16 до 50 км, распространяющийся в стратосфере из верхних слоев в более низкие с периодом, составляющим около 26 – 28 месяцев. КДК — одно из самых замечательных явлений в земной атмосфере, высоко над экватором в стратосфере, где обнаруживаются сильные зональные ветры, дующие в непрерывном цикле вокруг Земли. Ветер может начинаться как западный, но со временем он ослабевает и в конечном итоге меняется на сильный восточный. Пиковая амплитуда западного ветра медленно мигрирует вниз и при приближении к основанию стратосферы около 80 гПа рассеивается.

Согласно нескольким гипотезам, этот цикл возникает в результате взаимодействия между океаном, континентом и атмосферой, включающей не только тропические зоны, но и внетропические. Квазидвухлетний цикл стратосферной циркуляции состоит в следующем: на высотах 20 – 40 км в широтной зоне  $8^{\circ}$  с.ш. –  $8^{\circ}$  ю.ш. наблюдается чередование во времени западных и восточных зональных ветров так, что примерно один год здесь преобладают западные ветры, а в следующем году – восточные. При этом изменение ветрового режима осуществляется путем постепенного опускания противоположной системы ветров из средней стратосферы (40 км) в нижнюю (20 км) со средней скоростью примерно 1 км/мес. Средний период смены ветров составляет примерно 26 – 28 месяцев. Именно это обстоятельство и приводит к нарушениям четкой двухлетней периодичности: годы с одноименным направлением ветра иногда могут идти один за другим [22]. КДК зонального ветра сопровождаются аномалиями температуры, примесей и средней меридиональной циркуляции. КДК преобладает в экваториальной нижней и средней стратосфере и влияет на другие области атмосферы, включая

тропическую тропосферу, тропическую верхнюю стратосферу и мезосферу, а также внетропическую среднюю атмосферу зимой. Эффекты КДК включают смешивание стратосферного озона вторичной циркуляцией, вызванной КДК, модификацию муссонных осадков.

На рисунке 3.11 показано изменение направления квазидвухлетней цикличности в экваториальной зоне.

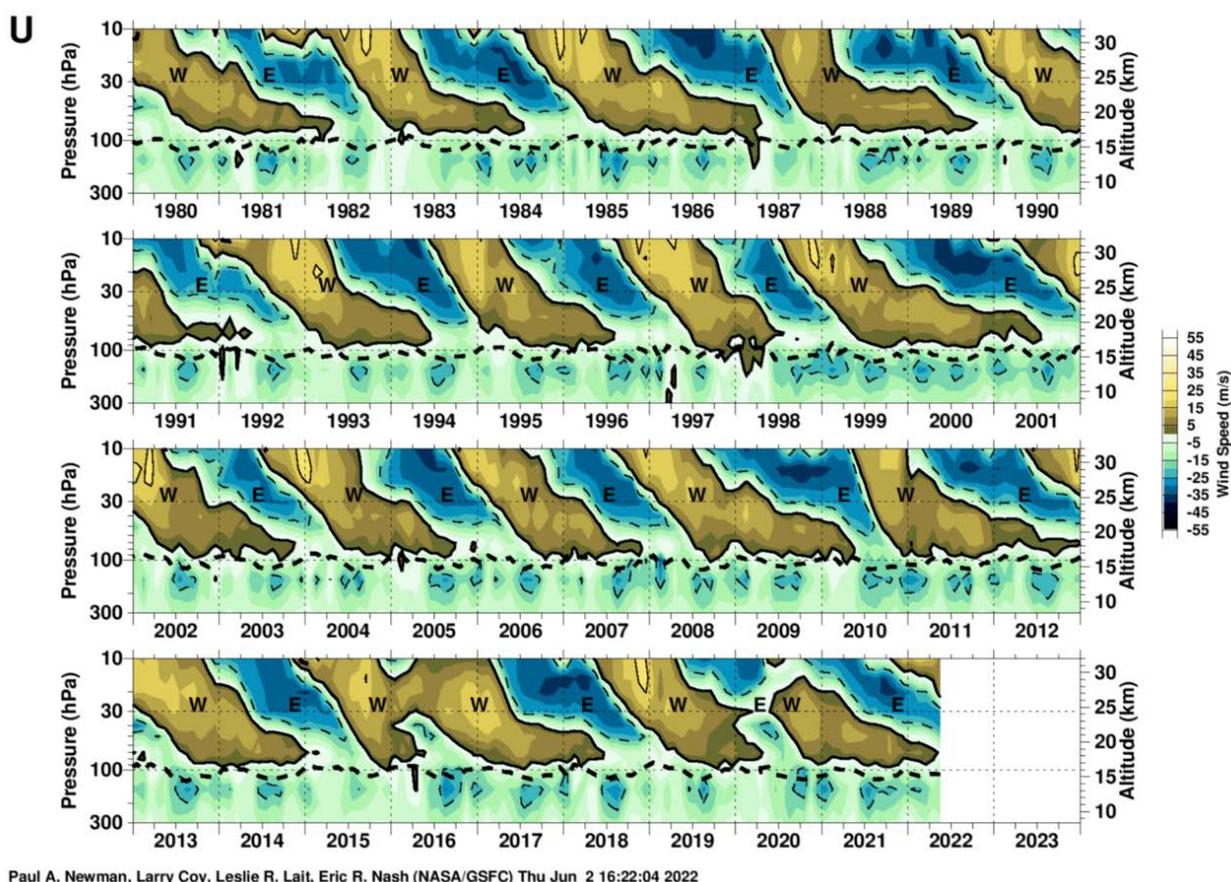


Рисунок 3.11 – Типичная эволюция фаз КДК в нижней стратосфере [23]

На рисунке 3.11 серой заливкой выделены ветры западного направления. При изменении направления зонального переноса в экваториальной зоне изменяется режим осадков в различных регионах земного шара.

КДЦ более регулярен, чем Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК), но не раз в два года и не синхронизирован с сезонным циклом иным образом.

Зональные переносы, связанные с КДЦ, вызывают аномальные меридиональные циркуляции. Аномалии сдвигов западных переносов, спускающихся в тропическую тропопаузу, вызывают аномальное экваториальное движение, которое, в свою очередь, приводит к нисхождению воздуха и, разумеется, к формированию более тёплой и низкой тропопаузы. Компенсирующие восхождения в субтропических зонах вызывают противоположные, но слабые по величине, аномалии температуры и высоты тропопаузы. Обратные связи наблюдаются во время восточной фазы КДЦ. В то же время можно сказать, что тропические конвективные облака, которые достигают тропопаузы более мощные при восточной фазе и слабеют при западной фазе КДЦ [24].

Зональные переносы КДК могут воздействовать на высоту конвективных облаков и сильный сдвиг воздуха из верхней стратосферы может нарушить внутреннюю связность конвективных нижних облаков. Восточная и западная фазы КДЦ приводит к сильному сдвигу в зависимости от того состояния, преобладающего в тропопаузе. Поскольку пассаты в верхней тропосфере изменчивы в тропиках, то сдвиг связан с обеими фазами КДК, поэтому в некоторых местах высота облаков уменьшается, а в других регионах возникают мощные конвективные облака.

Вихревые колебания в верхней тропосфере могут быть связаны с другим механизмом, с помощью которого КДК модулирует конвекцию. Слабые замкнутые вихри на верхней границе облаков ведут к оттоку массы, что в свою очередь, способствует росту облаков. Западная фаза КДК может привести к отклонениям антициклонических вихрей в тропиках в верхней тропосфере, стимулируя, таким образом, рост конвективных облаков, проникающих в тропопаузу. Обратный процесс происходит при восточной фазе КДК. Чем глубже конвективное облако, тем большее его диаметр.

Существует два важнейших явления: аномалии зональных переносов и температуры КДК, которые незначительно проникают вниз через тропопаузу. Это приводит к тому, что температурное распределение на уровне тропопаузы

довольно мало по сравнению с годовым ходом температуры: а во вторых, известно, что тропическая тропосфера имеет свой собственный цикл, которой не имеет прямой связи с стратосферным КДК. Тропосферный КДК неравномерен по времени и несимметричен по долготе. Это главное отличие между стратосферными и тропосферным КДК, которое медленно распространяется к востоку с большой амплитудой около Индонезии. Тропосферный отклик КДК распространяется быстрее над Атлантикой, и немного медленно над Тихим океаном по сравнению со стратосферным [24].

Для оценки прогностического потенциала КДК рассчитывались коэффициенты корреляции ( $r$ ) между рядами сезонных осадков (предиктант) и рядами предиктора в сезоне МАМ и ОНД. Результаты расчета корреляции Пирсона представлены на рисунках 3.12 и 3.13. В ходе данного исследования было получено, что осадки на некоторых станциях Танзании коррелируют с КДЦ, хотя и слабая на большинстве метеостанций.

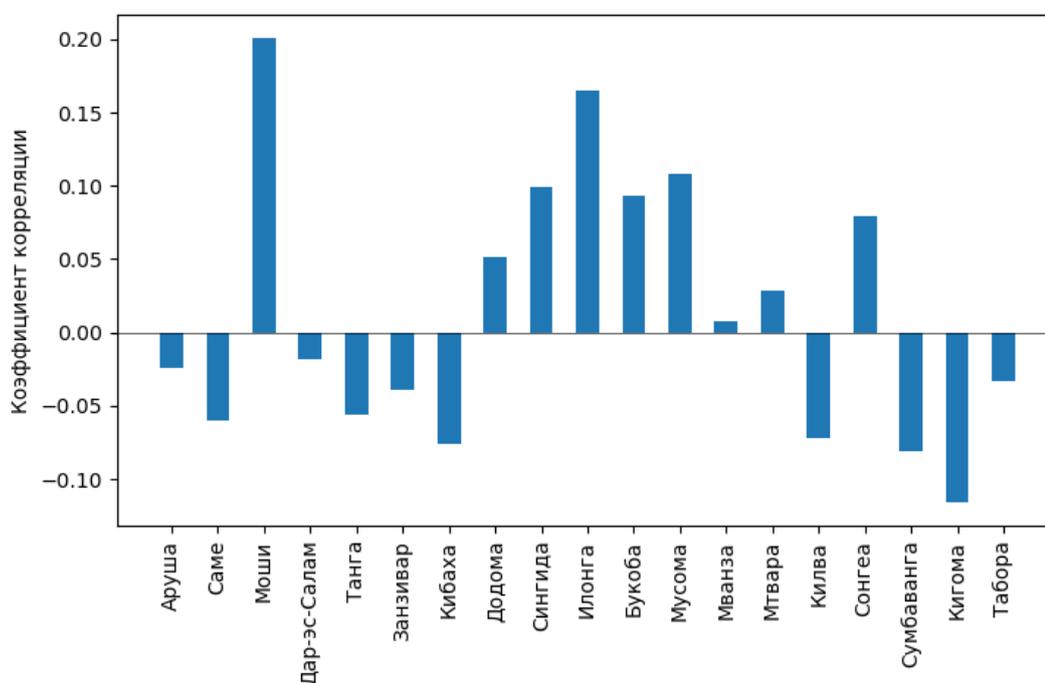


Рисунок 3.13 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами МАМ сезонных осадков и КДЦ

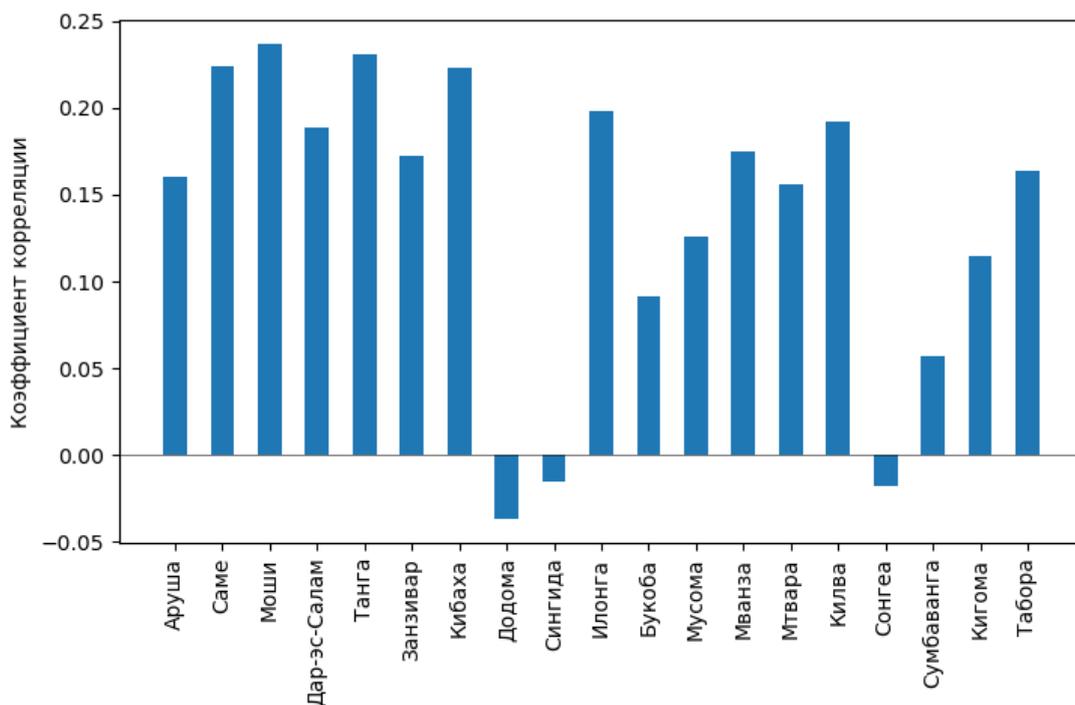


Рисунок 3.14 – Результаты расчета корреляции Пирсона между рядами  
ОНД сезонных осадков и КДЦ

Анализ корреляционной связи выявил, что не существуют значимые значения коэффициентов корреляции между сезонным осадком и КДЦ в МАМ или ОНД. Следовательно, в качестве предиктора КДК не может использоваться в прогнозе осадков на территории Танзании в сезон МАМ или ОНД. Необходимо провести дополнительные исследования, просматривая соотношение в каждом месяце или находя корреляцию с запаздыванием.

## 4. Описание численных экспериментов

### 4.1 Описание численной гидродинамической мезомасштабной модели WRF

Численное прогнозирование погоды реализуется путем интеграции моделей на основе примитивных уравнений. Уравнения решаются путем замены производных по времени конечными разностями, а по пространству либо конечно-разностными схемами либо спектральными методами. Состояние атмосферы описывается в ряде узлов сетки набором переменных состояния, таких как температура, скорость, влажность и давление. Метеорологические наблюдения, сделанные во всем мире, используются для расчета наилучшей оценки начальных условий системы. Некоторые из этих наблюдений, например, наблюдения с метеозондов или радиозондов, проводятся в определенное время в фиксированных местах. Другие данные, например, с самолетов, кораблей или спутников, не фиксируются в космосе. Как правило, существует большая изменчивость в плотности сети наблюдения. Данные по океаническим районам, в частности, характеризуются очень низким разрешением. Наблюдения нельзя использовать непосредственно для интегрирования модели, но их необходимо модифицировать динамически согласованным образом, чтобы получить подходящий набор данных. Этот процесс обычно называют ассимиляцией данных [25]. Одной из моделей численного прогноза погоды является мезомасштабная модель WRF (Weather Research Forecasting) .

Гидродинамическая модель WRF - это мезомасштабная численная модель прогноза погоды и система моделирования атмосферы созданная с целью обеспечить потребности, как в оперативном прогнозировании, так и в исследованиях атмосферы. Разработка WRF представляла собой межведомственную работу по созданию модели мезомасштабного прогноза следующего поколения и системы усвоения данных для улучшения понимания

и прогнозирования мезомасштабной погоды и ускорения внедрения достижений исследований в практическую деятельность.

Разработка модели велась совместно многими исследовательскими организациями США и учеными университетов из разных стран, в основном это национальный центр атмосферных исследований США - NCAR (National Centers for Atmospheric Research`s), национальное управление океанических и атмосферных исследований - NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration`s), лаборатория исследования системы Земля — ESRL (Earth System Research Laboratory ) и национальный центр прогнозирования окружающей среды - NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

WRF имеет два динамических ядра; Advanced Research WRF (ARW) и негидростатическую мезомасштабную модель (Nonhydrostatic Mesoscale Model NMM). Динамическое ядро включает в основном адвекцию, градиенты давления, Кориолиса, плавучесть, фильтры, диффузию и временной шаг. Оба являются динамическими ядрами Эйлера с рельефом, имеющим вертикальные координаты.

Гидродинамическая система WRF состоит из следующих основных блоков:

- блока предварительной обработки (WRF Preprocessing System, WPS) и инициализации.

- Интерполяция реальных данных для реальных прогнозов,

- программа для добавления дополнительных наблюдений в анализ,

- модели WRF (динамических модулей ARW или NMM и параметризации)

- программы инициализации для реальных и (для ARW) идеализированных данных.

- программа численного интегрирования.

- системы подготовки и вывода модельной продукции (WRF-POST) — постпроцессинга и визуализация. Для модели ARW существует дополнительный блок трехмерного вариационного усвоения наблюдений.

Система предварительной обработки WPS представляет собой комплекс из трех программ, который готовит входные данные для программы инициализации при расчетах по реальным начальным данным. В первой программе Geogrid определяются модельные области и производится интерполяция географических и статических переменных в узлы сетки. Кроме того вычисления широты, долготы и масштабного множителя в каждой точке сетки, Geogrid будет интерполировать категории почвы, категорию землепользования, высоту местности, среднегодовую температуру почвы на глубине, месячную долю растительности, месячное альbedo, максимальное альbedo снега и уклон подстилающей поверхности в модельную сетку по умолчанию. Помимо интерполяции наземных полей по умолчанию, программа Geogrid достаточно универсальна, чтобы иметь возможность интерполировать большинство непрерывных и категориальных полей в области моделирования. Выходные данные Geogrid записываются в формате WRF I/O API, и, таким образом, выбрав формат ввода-вывода NetCDF, можно настроить Geogrid для записи своих выходных данных в NetCDF для упрощения визуализации с помощью внешних программных пакетов, включая ncview и NCL.

Во второй программе Ungrib выбираются поля из сводок grib (сейчас из сводок grib2). Программа Ungrib считывает файлы grib, «расшифровывает» данные и записывает данные в простом формате, называемом промежуточным форматом. Файлы GRIB содержат изменяющиеся во времени метеорологические поля и обычно взяты из другой региональной или глобальной модели, такой как модели NAM NCEP или Глобальной системы прогнозирования (GFS). Файлы grib обычно содержат больше полей, чем необходимо для инициализации WRF. Обе версии формата grib используют различные коды для идентификации переменных и уровней в файле grib. Ungrib использует таблицы этих кодов, называемые Vtables, для «таблиц переменных», чтобы определить, какие поля извлекать из файла grib и записывать в промежуточный формат.

В третьей программе Metgrid производится горизонтальная интерполяция метеорологических полей промежуточного формата, извлеченные программой Ungrib в узлы модельных сеток, определенных в программе Geogrid. Интерполированные выходные данные Metgrid затем могут быть обработаны реальной программой WRF. Диапазон дат, который будет интерполирован metgrid, определяется в «Общий доступ» к записи списка имен файла списка имен WPS, а диапазоны дат должны быть указаны отдельно в списке имен для каждого домена моделирования. Поскольку работа программы metgrid, как и работы программы ungrib, зависит от времени, metgrid запускается каждый раз, когда инициализируется новая симуляция. Управление интерполяцией каждого метеорологического поля обеспечивается файлом METGRID.TBL. Файл METGRID.TBL предоставляет по одному разделу для каждого поля, а внутри раздела можно указать такие параметры, как методы интерполяции, которые будут использоваться для поля, поле, которое действует как маска для маскированных интерполяций, и смещение сетки. (например, U, V в ARW; H, V в NMM), к которым интерполируется поле. Выходные данные из Metgrid записываются в формате WRF I/O API, и, таким образом, выбрав формат ввода-вывода NetCDF, можно заставить metgrid записывать свои выходные данные в NetCDF для упрощения визуализации с помощью внешних программных пакетов [26].

WRF состоит из двух частей: динамического ядра и набора параметризации физических процессов.

Модель WRF дает большое количество погодных и атмосферных параметров (давление, температура, относительная влажность, скорость ветра, кинетическая энергия и т. д.), которые зависят от физических параметров, выбранных для моделирования.

## 4.2 Система уравнений модели WRF-ARW

Модель WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты  $\eta$ , которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что она определяется не через полное давление  $p$ , а через его гидростатическую составляющую  $p_h$ .  $\eta$  изменяется от значения 1 на поверхности до 0 на верхней граница модельной области.

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \quad (4.1)$$

$$\mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (4.1a)$$

где  $p_{hs}$  и  $p_{ht}$  гидростатическое давление на нижней и верхней границах области;  
 $p_h$  гидростатический компонент давления;  
 $\mu$  масса единичного столба сухого воздуха.

Ниже представлена система уравнений в потоковой форме, на которых базируется модель:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\nabla \cdot Vu) + \mu \alpha \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = F_U \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot Vv) + \mu \alpha \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = F_V \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (\nabla \cdot Vw) - g \left( \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} - \mu \right) = F_W \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\nabla \cdot V \theta)_{\eta} = F_{\theta} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (\nabla \cdot V q_m)_{\eta} = F_{Q_m} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\nabla \cdot V \mu)_{\eta} = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\mu} [(V \cdot \nabla \Phi)_{\eta} - gW] = 0 \quad (4.8)$$

Эти прогностические уравнения дополняются диагностическими

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = -\alpha_d \mu, \quad (4.9)$$

А также уравнением состояния:

$$P = P_0 \left( \frac{R_d \theta_m}{P_0 \alpha_d} \right)^{\gamma}, \quad (4.10)$$

где

$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$ ,  $V = \mu v = (U, V, W)$  — скорости в горизонтальном и вертикальном

направлениях,  $\Theta = \mu \theta$

В системе (4.2) — (4.10) использованы следующие обозначения:

$u$ ,  $v$  и  $w$  — компоненты скорости,

$$\nabla \cdot V_a = \frac{\partial U_a}{\partial x} + \frac{\partial V_a}{\partial y} + \frac{\partial W_a}{\partial \eta}$$

$$V \cdot \nabla a = U \frac{\partial a}{\partial x} + V \frac{\partial a}{\partial y} + \Omega \frac{\partial \Omega a}{\partial \eta}$$

$\dot{\eta}$  — вертикальная скорость в орографических координатах.

$\alpha$  — удельный объем, содержащий помимо сухого воздуха водяной пар и гидрометеоры: , где  $q$  — отношения смеси водяного пара, облачности, дождя, льда и т.д.

$$\alpha_d = \frac{1}{\rho_d} \text{ — удельный объем сухого воздуха.}$$

$\theta_m = \theta \left( 1 + \frac{R_d}{R} \right) q_v \approx \theta (1 + 1.61 q_v)$  — виртуальная потенциальная температура.

Для численного решения системы уравнений в модели WRF-ARW используется подход с расщеплением по времени. Медленные или низкочастотные моды, связанные с процессом переноса, интегрируются с использованием схемы Рунге-Кутты третьего порядка по времени, а высокочастотные акустические моды, связанные с процессом адаптации полей давления и скорости, интегрируются с меньшим шагом по времени для сохранения вычислительной устойчивости. Горизонтально распространяющиеся акустические моды (включая внешнюю моду, присутствующую в уравнениях массы с использованием верхнего граничного условия на уровне постоянного давления) и гравитационные волны интегрируются с использованием полунеявной схемы интегрирования по времени, а вертикально распространяющиеся акустические моды и колебания связанные с силой плавучести интегрируются с использованием неявной схемы (с использованием шага по времени для акустических волн).

Для пространственной дискретизации используется сетка C по классификации Аракавы, то есть горизонтальные составляющие скорости смещены на половину длины шага сетки от термодинамических переменных.

При разработке гидродинамических моделей атмосферы оформилось направление, которое называется параметризацией атмосферных процессов

подсеточного масштаба. Целью этого направления является отыскание параметров или структурных элементов модели атмосферы, которые рассчитываются при интегрировании прогностических уравнений, и связей между этими параметрами или элементами модели с некоторыми величинами, которые отражают результирующий или суммарный эффект процессов подсеточного масштаба на крупномасштабные атмосферные процессы [26]. Одним из основных преимуществ модели WRF являются большие возможности параметризации. Действительно, можно выбирать между широким спектром вариантов физики и микрофизики, которые можно комбинировать разными способами.

В гидродинамической модели WRF параметризации описывают такие процессы как:

- кучевая конвекция;
- микрофизика облаков и осадков;
- радиация (коротковолновая и длинноволновая);
- турбулентность и диффузия;
- процессы в планетарном пограничном слое и приземном слое;
- процессов на поверхности и в почве.

Схемы параметризации, используемые в этом исследовании:

схема Каина-Фритша (КФ), ансамблевая схема Грелла-Дэвени и схема Тидтке для параметризации конвективных облаков,

схема WRF Single-Moment 3-class (WSM3) для представления микрофизических процессов в облаках,

модель переноса излучения (Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)) для длинноволнового излучения,

схема Dhudia для коротковолнового излучения,

схема Мони́на-Обухова для приземного слоя,

схема NOAH для подстилающей поверхности и почвы;

схема университета Енсей для пограничного слоя.

Схема КФ представляет собой схему описания потока массы. Она использует метод лагранжевого переноса, включая динамику вертикального импульса, чтобы оценить, существует ли неустойчивость, станет ли любая существующая неустойчивость доступной для роста облака и какими могут быть свойства любых конвективных облаков. Эта параметризация предполагает, что воздух с отрицательной плавучестью вытекает из облака, а воздух с положительной плавучестью втекает в облако. Такой процесс смешения оценивается послойно и обеспечивает двусторонний обмен между облаком и его окружением. Термодинамические характеристики в области восходящих движений рассчитываются в предположении, что поднимающаяся частица сохраняет эквивалентную потенциальную температуру и общее водное вещество (сумму водяного пара и гидрометеоров). По умолчанию конвективные осадки мгновенно появляются на поверхности Земли, но в программе предусмотрен переключатель, который может активировать обратное действие осадков, начиная с уровня их образования, уровня конденсации.

Ансамблевая схема Грелла-Дэвени это ансамблевая схема кучевых облаков, в которой эффективно несколько схем и вариантов кучевых облаков запускаются в каждой ячейке сетки, а затем результаты усредняются, чтобы дать обратную связь модели. В принципе, усреднение может быть взвешено для оптимизации схемы, но по умолчанию используется равный вес. Все схемы представляют собой схемы типа потока масс, но с различными параметрами втока и оттока восходящего и нисходящего потоков, а также осадки. Эти различия в статическом контроле сочетаются с различиями в динамическом контроле, который является методом определения потока облачной массы.

Схема Тидтке представляет собой схему потоков масс и параметризует глубокую, мелкую и среднюю конвекцию. Она представляет облачный ансамбль с помощью объемной модели облаков и учитывает приток, вынос и нисходящие потоки. Она использует индекс CAPE (Convective Available Potential Energy) для определения силы глубокой и средней конвекции и поверхностное испарение для мелкой конвекции. Чтобы ограничить глубокую

конвекцию в более засушливых регионах, минимальная относительная влажность 80% устанавливается для средней относительной влажности между нижней и верхней границей облаков [26, 27].

Модель переноса излучения (RRTM) представляет собой схему спектральных диапазонов, использующую метод коррелированного  $k$ . Он использует предварительно установленные таблицы для точного представления длинноволновых процессов, связанных с водяным паром, озоном,  $\text{CO}_2$  и трайсеровыми газами (если они присутствуют), а также для учета оптической толщины облаков. RRTM делит длинноволновую область спектра на 16 полос, выбранных из-за однородности составляющих их частиц и свойств переноса излучения. В RRTM все оптические толщины в данной полосе спектра представлены небольшим набором характерных значений, которые используются для описания переноса излучения. Процедура определения этих характерных значений начинается с создания  $k$ -распределения, в котором каждому коэффициенту поглощения  $k(\nu)$  присваивается значение  $g$  ( $0 \leq g \leq 1$ ), представляющее долю коэффициентов поглощения в полосе меньше  $k(\nu)$ .

## 5. Анализ и оценка результатов численных экспериментов

В настоящее время численные модели являются основным инструментами, используемыми для прогнозирования погоды и климатических прогнозов. Первая попытка численного предсказания погоды была предпринята Ричардсоном в 1922 году. Впоследствии был предложен ряд простых численных и аналитических моделей для объяснения общей циркуляции атмосферы. Существующие современные модели постоянно оцениваются и уточняются с помощью наблюдений и теории, чтобы лучше понять погоду и климат. Модель WRF (Weather Research and Forecasting) является одной из наиболее универсальных и современных систем моделирования атмосферы. Являясь свободно распространяемым программным продуктом, она широко и успешно используется для метеорологического прогнозирования в научных центрах и метеорологических службах различных стран и продолжает непрерывно развиваться. Это эффективный инструмент для решения многих задач физики атмосферы, также модель используется в исследовательских целях.

При адаптации модели WRF-ARW для территории Танзании сначала была определена расчётная область и выбрано разрешение по горизонтали и вертикали. Для экспериментов по долгосрочному прогнозу осадков в Танзании была создана модельная область размером 310 узлов с запад на восток и 300 узлов с юга на север, горизонтальным разрешением 10 км и 35 уровнями по вертикали. Для корректного описания процессов в экваториальной зоне используется цилиндрическая проекция Меркатора в декартовой системе координат.

Таким образом, область моделирования охватывает всю территорию Танзании, а также некоторые страны восточной Африки. Область моделирования представлена на рисунке 5.1.

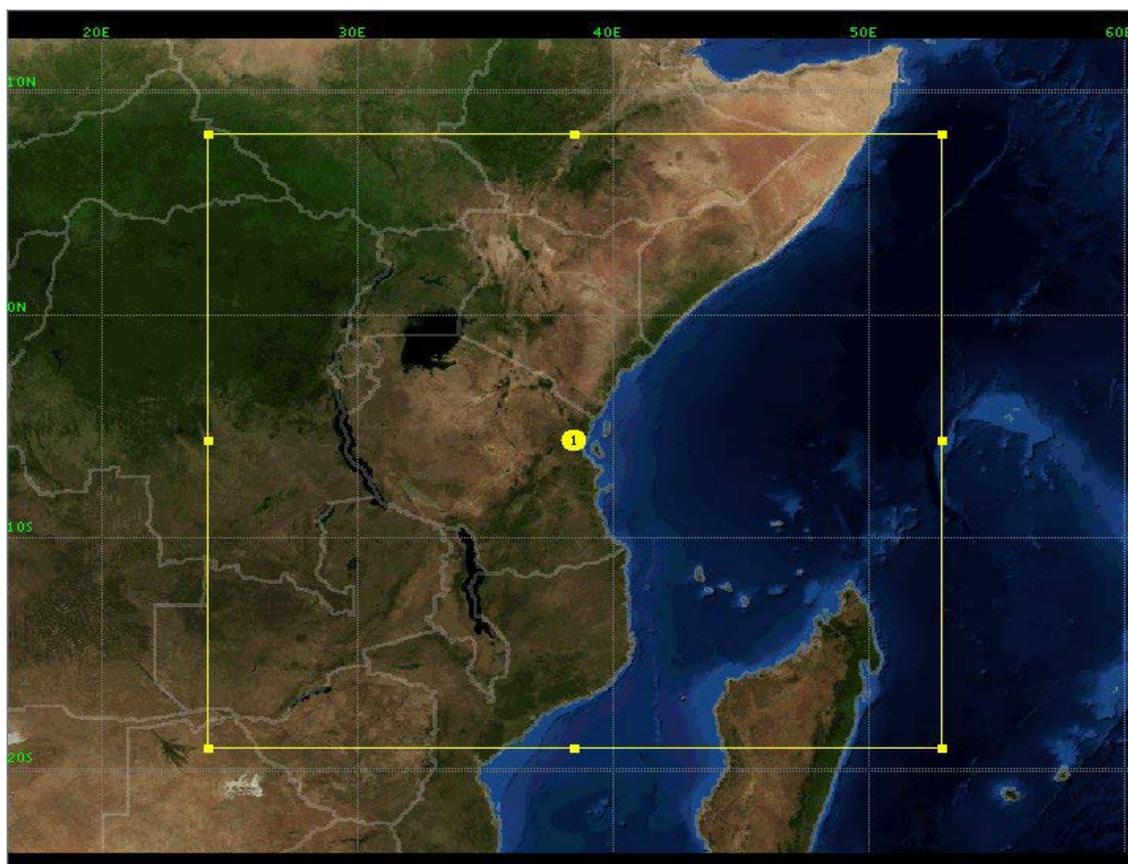


Рисунок 5.1 – Область моделирования

Для того чтобы решать задачу прогноза погоды необходимо определить начальные и граничные условия. В качестве начальных условий необходимо задать трехмерные распределения трех компонент скорости, температуры, давления и влажности, а граничные условия поставить для температуры, влажности и компонент скорости на боковых и на вертикальных границах, а также значения потоков тепла, влаги и импульса на нижней границе расчётной области, прилегающей к поверхности Земли.

Результаты модели WRF чувствительны к начальным условиям, граничным условиям, размеру домена и различным схемам параметризации. В данной работе, использованы начальные и граничные из данных реанализа национального центра охраны окружающей среды США (NCEP), которые были доступны на сервере РГГМУ.

Для адаптации модели WRF к моделированию процессов на территории Танзании были проведены численные эксперименты. В этом исследовании WRF используется для моделирования сезонных осадков в периоды:

- с октября по декабрь (ОНД), 2017 года,
- с июля по август (ИИА), 2017 года,
- с марта по май (МММ) 2020 года.

Эти периоды для экспериментов были выбраны, так как они связаны с сезонными осадками (ОНД и МММ) и засушливым (ИИА) в Танзании.

Как уже отмечалось, сезонные дожди в Танзании в основном происходят за счет миграции внутритропической зоны конвергенции – относительно узкой полосы очень низкого давления и сильных осадков, что образует рядом с экватором Земли. Точное положение ВЗК изменяется в течение года: мигрирует на юг через Танзанию в октябре-декабре, перемещается на юг страны в январе и феврале и возвращается на север в марте, апреле и мае. Это приводит к тому, что север и восток Танзании испытывает два различных влажных периодов - "коротких" дождей в октябре-декабре и "длинных" дождей в марте-мае, в то время как в южных, западных и центральных частях отмечается влажный сезон продолжительностью с октября по апрель или май. Количество осадков, выпадающих в эти сезоны, как правило, 50-200мм в месяц, но в значительной степени варьируется между регионами и может достигать около 300 мм в месяц в самых влажных регионах во влажные сезоны. Продолжительность и интенсивность этих дождей в значительной мере зависят от миграции положения ВЗК, чувствительного к изменениям температуры водной поверхности Индийского океана, и изменяются ежегодно. Во время «коротких дождей», ВЗК мигрирует быстро на юг и срок осадков непродолжителен. В отличие от этого, в течение «длинных дождей» ВЗК движется медленнее и поэтому осадки отмечаются в течение нескольких недель. Осадки на территории Танзании связаны не только с циркуляциями синоптического масштаба (ВЗК, муссонной циркуляцией), но и с мезомасштабными

циркуляциями, вызванными региональными факторами, такими как наличие больших водоемов и сложного рельефа.

Результаты прогнозов осадков, разработанных в рамках данного исследования, сравнивались с фактическими значениями на метеорологических станциях и спутниковыми данными.

Качество прогноза оценивалось по средней абсолютной ошибке  $\varepsilon$  (Mean Absolute Error, MAE) и среднеквадратической ошибке  $\varepsilon_k$  (Root Mean Square Error, RMSE) по формулам (5.1) и (5.2).

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{\text{факт}} - X_{\text{прог}}| \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{факт}} - X_{\text{прог}})^2}{N}} \quad (5.2)$$

где	$X_{\text{факт}}$	Фактическое значение,
	$X_{\text{прог}}$	Прогностическое значение,
	N	Количество наблюдений

В качестве исходных материалов для верификации использованы CHIRPS (The Climate Hazard Infrared Precipitation with Station) данные из архива IRI Climate Data Library [28] и результаты наблюдения за осадками на 6 метеорологических станциях на территории Танзании

- Букоба,
- Мванза,
- Аруша,
- Дар эс Салам,
- Танга,
- Занзибар.

Результаты прогноза по модели интерполировались в точку с координатами этих метеорологических станций с помощью CDO (Climate Data Operator). CHIRPS — это данные о количестве осадков, полученные в результате спутниковых наблюдений, объединенные с данными станций.

Для сезона осадков с октября по декабрь 2017 г. негидростатическая модель WRF с использованием схем КФ и Ансамблевая схема Грелла-Дэвени занижает количество осадков над восточной, северо-восточной и южной частями Танзании, но над западными частями и бассейном озера Виктория модель показывает хороший результат. Но модель уменьшает количество осадков на большей части территории страны, если используется схема Тидтке. На рисунке 5.2 представлено пространственное распределение осадков по выходным данным модели WRF-ARW – 3 схемы параметризации конвективных облаков и данные CHIRPS.

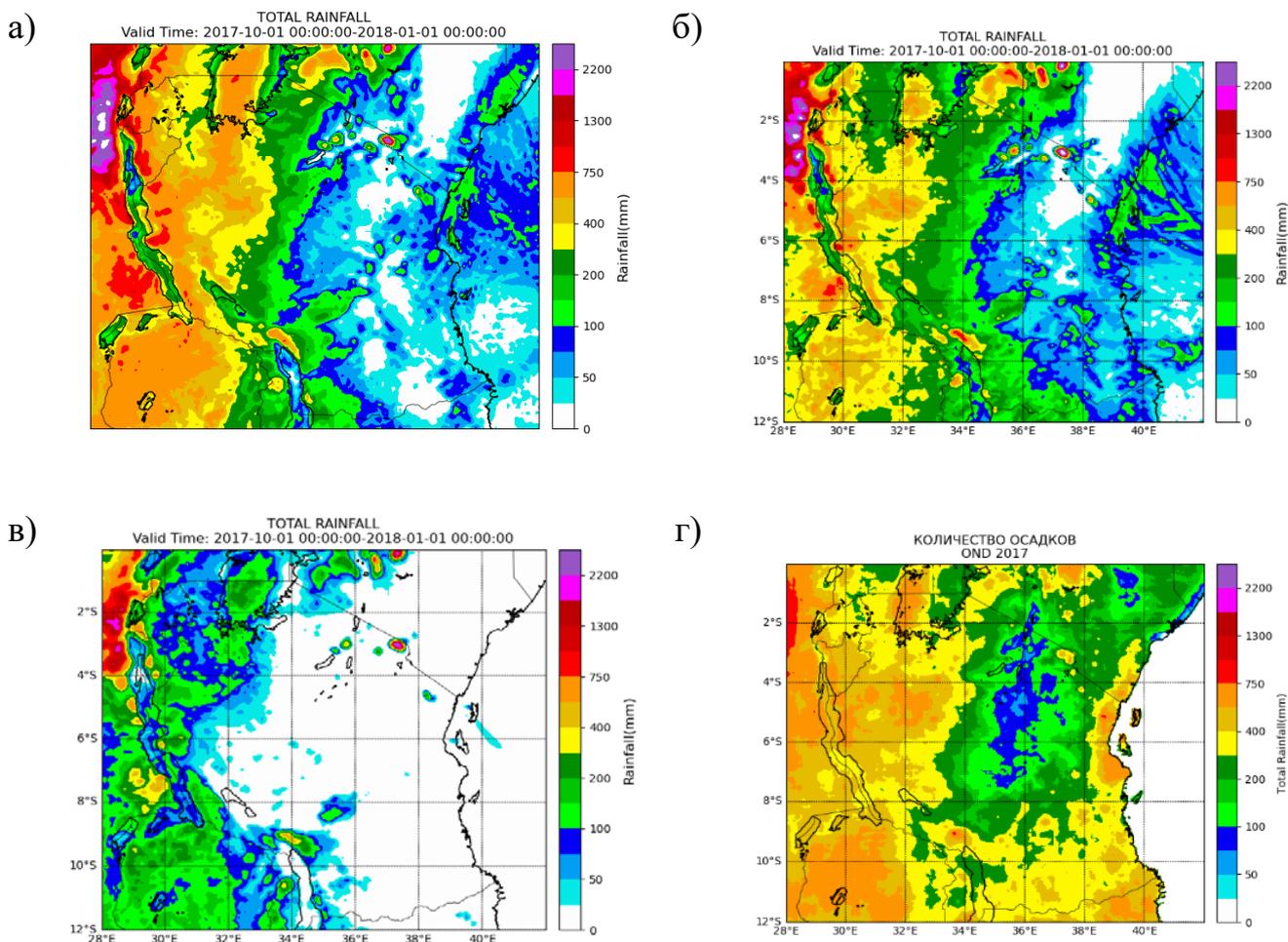


Рисунок 5.2 – Распределение количества осадков на территории Танзании с октября по декабрь 2017 г. Прогноз осадков а – схема Каина-Фритш, б – ансамблевая схема Грелла-Дэвени, в – схема Тидтке, г – CHIRPS данные

Из анализа результатов численных экспериментов, представленных в таблице 5.1, видно, что в период с октября по декабрь 2017 г прогноз осадков на метеорологической станции в Аруше имеет минимальную ошибку по сравнению с прогнозами на других станциях, использованными при анализе. Средняя абсолютная ошибка в Аруше колеблется от 11,5 (схема KF) до 12,4 мм/10 дней (схема GD) и среднеквадратическая ошибка от 16,4 (схема KF) до 18,3 мм/10 дней (схема GD). Прогноз в Букоба показывает максимальную среднюю абсолютную ошибку для всех схем от 71,8 до 95,5 мм/10 дней и среднеквадратичную ошибку от 87,1 до 108 мм/10 дней.

Таблица 5.1 – Средние абсолютные ошибки и среднеквадратические ошибки прогнозов для трех схемы параметризации конвекции за период с октября по декабрь 2017

Станция	Средняя абсолютная ошибка (MAE )			Среднеквадратическая ошибка (RMSE )		
	Схема			Схема		
	KF	GD	TD	KF	GD	TD
Букоба	71.8	80.6	95.5	87.1	94.0	108.0
Мванза	47.4	44.6	51.9	56.7	53.5	67.2
Аруша	11.5	12.4	11.7	16.4	17.0	18.3
Дар-Эс-Салам	36.4	32.0	39.2	62.5	54.4	66.7
Танга	27.7	27.9	32.5	44.4	44.6	51.4
Занзибар	52.0	59.1	64.0	79.3	92.4	96.8

В сезон с июня по август 2017 все схемы прогнозируют одинаковую пространственную структуру осадков над прибрежными районами. Хотя модель прогнозировала большое количество осадков в этих районах, над бассейном озера Виктория с использованием конвективной схемы Тидтке модель прогнозирует мало количество осадков по сравнению с другими схемами и данными CHIRPS. Над островами модель предсказала очень большое количество осадков в этот засушливый сезон. На рисунке 5.3 показано результаты пространственного распределения прогностических осадков по выходным данным модели WRF с июня по август 2017 г.

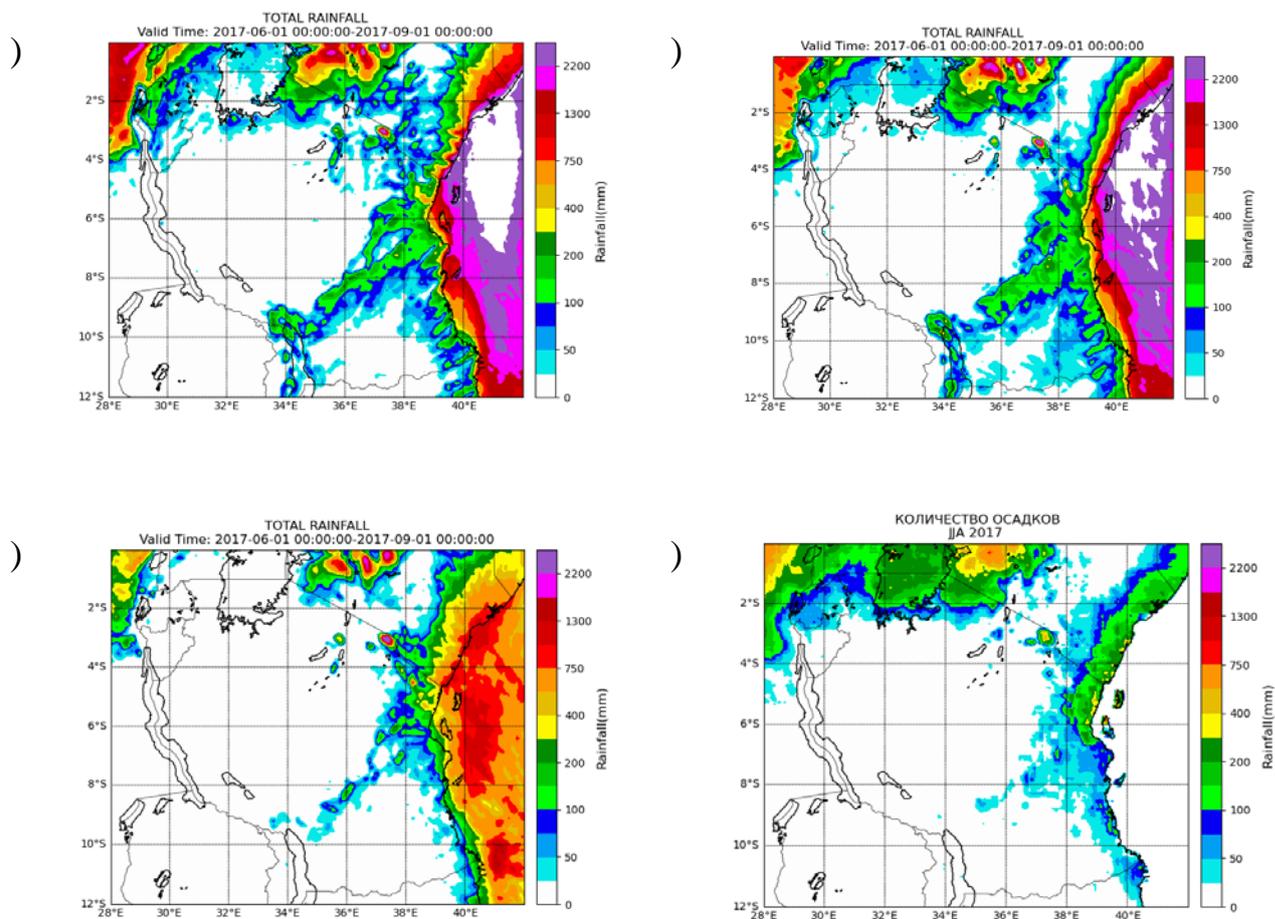


Рисунок 5.3 – Распределение количества осадков на территории Танзании с Июня по Август 2017 г . Прогноз осадков а – схема Каина-Фритша, б – ансамблевая схема Грелла-Дэвени, в – схема Тидтке, г – CHIRPS данные

Также в период ИИА 2017 по результатам модели были рассчитаны средняя ошибка и среднеквадратичное отклонение ошибки, среднее прогностическое и среднеквадратичное прогностическое значения для каждой схемы параметризации конвекции. Результаты расчетов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Средние абсолютные ошибки и среднеквадратические ошибки прогнозов для трех схемы параметризации конвекции за период с июня по август 2017

Станция	Средняя абсолютная ошибка (MAE )			Среднеквадратическая ошибка (RMSE )		
	Схема			Схема		
	KF	GD	TD	KF	GD	TD
Букоба	16.7	15.4	18.0	21.0	20.5	22.2
Мванза	2.9	2.9	2.5	4.8	4.6	4.7
Аруша	12.9	7.1	5.7	16.3	10.4	7.5
Дар-Эс-Салам	5.2	19.9	12.5	7.0	43.6	29.6
Танга	35.7	28.0	30.1	45.4	46.0	45.0
Занзибар	105.3	69.8	37.1	130.2	115.1	68.8

Анализ показывает наилучшую оценку оправдываемости прогноза осадков по Мванзе при использовании всех схем. Средняя абсолютная ошибка изменяется от 2,5 мм/10 дней до 2,9 мм/10 дней, а среднеквадратическая ошибка — от 4,6 мм/10 дней до 4,8 мм/10 дней.

Как и ранее, прогноз осадков в Арише имеет самые низкие средние абсолютные ошибки и среднеквадратические ошибки – 5,7 мм/10 дней и 7,5 мм/10 дней,

Прогноз осадков в Дар-эс-Саламе – MAE составляет 5,1 мм/10 дней, а RMSE — 7,0 мм/10 дней.

Самая высокая ошибка приходится на Занзибар со средней абсолютной ошибкой 105,3 мм/10 дней и среднеквадратичной ошибкой 130,2 мм/10 дней.

В период с марта по май 2020 г. прогноз модели WRF со схемой KF показывает аналогичные характеристики ошибок прогноза осадков на большей части территории Танзании при сравнении с пространственными данными CHIRPS.

В отличие от ОНД 2017 г во время МАМ 2020 г модель WRF прогнозировала большое количество осадков в прибрежных районах. Схема Тидтке и ансамблевая схема Грелла-Дэвени уменьшают количество осадков на большей части территории, за исключением некоторых районов вдоль

побережья. На рисунке 5.4 представлены результаты пространственного распределения осадков по выходным данным модели WRF – три схемы параметризации конвективных облаков и данные CHIRPS.

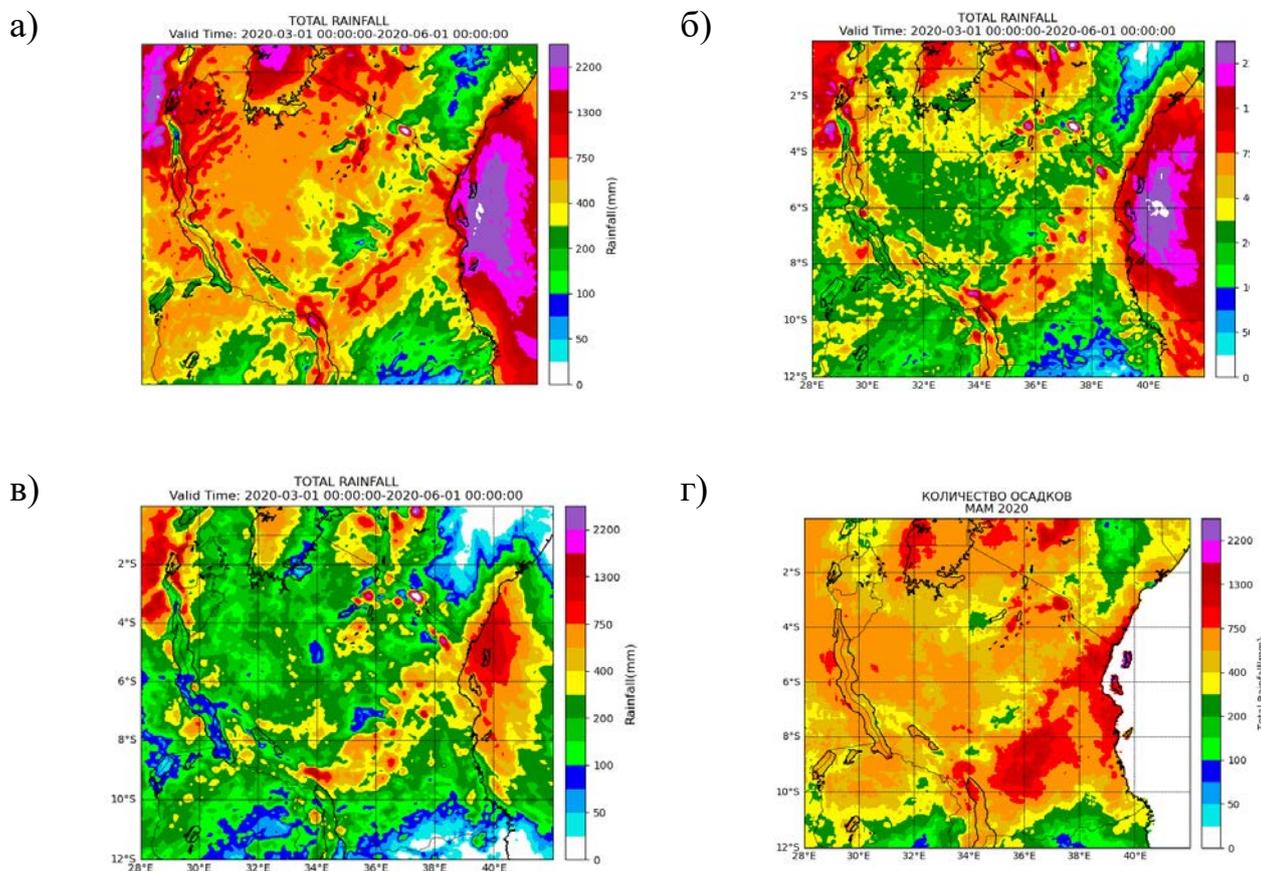


Рисунок 5.4 – Распределение количества осадков на территории Танзании с марта по май 2020 г. Прогноз осадков а – схема Каина-Фритша, б – ансамблевая схема Грелла-Дэвени, в – схема Тидтке, г – CHIRPS данные

Анализ результатов численных экспериментов (таблица 5.3) показывает, что с марта по май 2020 г. наименьший разброс средней абсолютной ошибки прогноза изменяется с 20,8 до 37,6 мм/10 дней, а среднеквадратическая ошибка прогноза — с 26,9 до 50,5. мм/10 дней над Мванзой. Все схемы показывают худший прогноз над Занзибаром с MAE от 100,9 до 121 мм/10 дней.

Таблица 5.3 – Средние абсолютные ошибки и среднеквадратические ошибки прогнозов для трех схемы параметризации конвекции за период с марта по май 2020

Станция	Средняя абсолютная ошибка (MAE )			Среднеквадратическая ошибка (RMSE )		
	Схема			Схема		
	KF	GD	TD	KF	GD	TD
Букоба	62.6	57.7	69.7	73.3	74.3	95.3
Мванза	20.8	31.5	37.6	26.9	45.3	50.5
Аруша	42.0	57.1	62.6	54.8	66.7	82.4
Дар-Эс-Салам	36.1	42.9	64.1	61.9	53.7	73.8
Танга	67.6	43.2	66.4	101.6	49.0	98.3
Занзибар	100.9	102.0	121.0	120.2	134.1	168.7

Количественные оценки выявили, что схема Каина-Фритша, схема ансамблевая схема Грелла-Дэвени и схема Тидтке показали наилучшую оценку оправдываемости прогноза осадков с октября по декабрь 2017 в метеостанции Аруша.

В периоде с июня по август 2017 все три схемы показали наилучшую оценку оправдываемости прогноза в метеостанции Мванза, а схема Грелла-Дэвени и схема Тидтке в Аруше и схема Каина-Фритша в Дар-эс-Саламе.

С марта по май 2020 г схема Каина-Фритша показала наилучшую оценку оправдываемости прогноза осадков в Мванзе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точные сезонные прогнозы осадков жизненно важны для многих секторов Танзании. Танзания, как и другие страны Восточной Африки, является регионом, который очень уязвим к изменчивости осадков, поскольку постоянное количество осадков жизненно важно для сельскохозяйственных культур и домашнего скота. Экстремальные явления имеют серьезные последствия для общества и экономики. Таким образом, сезонное прогнозирование этих событий, если оно сделано умело, может предоставить пользователям информацию для смягчения последствий или предотвращения гуманитарных катастроф.

Для решения задачи долгосрочного прогноза осадков на территории Танзании создана база пространственно осредненных месячных и годовых сумм осадков за период с 1961 по 2020 гг. и проведен климатический анализ режима осадков Танзании, который показывает 5 месяцев засушливого периода и 7 месяцев влажного периода.

Согласно характеристикам линейного тренда количества осадков в Танзании видно уменьшение количества осадков с 1961 по 2020 год. Это может быть связано с изменением климата, которое влияет на механизм образования осадков (для подтверждения этого необходимы дополнительные исследования). Анализ также показывает, что количество осадков в сезоны МАМ уменьшается больше, чем в сезоны ОНД.

Хотя точность сезонных прогнозов погоды в Танзании в последние годы продолжает повышаться, все же существуют проблемы, которые препятствуют этому прогрессу. Самая большая проблема, которая присутствует и в других странах Африки, - это отсутствие данных наблюдений из-за низкой плотности метеостанций. Наблюдаемые данные о погоде используются не только в прогнозе погоды, но и для калибровки и проверки численных моделей. Отсутствие данных по некоторым регионам также сказывается на

исследованиях. Другие проблемы включают в себя возможность предоставления сезонных прогнозов в уменьшенном масштабе до районного уровня для всей страны и точность прогнозирования внутрисезонных характеристик (начало, окончание сезона, влажные и засушливые периоды). Это очень важно для планирования в большинстве секторов, особенно в сельскохозяйственном секторе.

Для долгосрочного прогноза осадков на территории Танзании можно использовать эмпирические (статистические) методы.

В качестве потенциальных предикторов долгосрочного прогноза осадков в Танзании рассматривались следующие предикторы :

- явление Эль-Ниньо (Ла-Нинья), Южное колебание и индекс NINO 3,4;
- Диполь Индийского океана (IOD);
- Квазидвухлетняя цикличность (КДЦ) стратосферной циркуляции в тропической зоне.

Прогностический потенциал долгосрочных предикторов осадков в Танзании был оценен с помощью корреляции Пирсона между предикторами и предиктантами (сезонные осадки).

На основе анализа явления Эль-Ниньо и диполя Индийского океана установлено, что эти предикторы могут быть использованы для прогнозирования сезонных дождей в течение сезона ОНД над большей частью территории Танзании, но в течение сезона МАМ существует небольшая взаимосвязь между NINO 3.4, IOD и сезонными осадками МАМ. Анализ показывает, что КДК имеет связь с сезонными дождями на некоторых станциях, но эта связь незначительна. Это означает необходимость поиска дополнительных предикторов для долгосрочного прогноза осадков в Танзании, особенно для сезона МАМ.

Для адаптации модели WRF-ARW к моделированию процессов на территории Танзании были проведены численные эксперименты. В этом исследовании WRF-ARW используется для моделирования сезонных осадков в периоды:

- с октября по декабрь (ОНД), 2017 года,
- с июля по август (ИИА), 2017 года,
- с марта по май (МММ) 2020 года.

Эти периоды для экспериментов были выбраны, так как они связаны с сезонными осадками (ОНД и МММ) и засушливым (ИИА) в Танзании.

Результаты прогноза осадков сравнивались с фактическими значениями на метеостанциях и спутниковыми данными. Качество прогноза оценивалось по средней абсолютной ошибке и среднеквадратической ошибке.

Всего в исследовании участвовало три различных схемы параметризации конвекции: Каина-Фритша, ансамблевая схема Грелла-Дэвени и Тидтке.

С октября по декабрь 2017 г. (ОНД сезон) негидростатическая модель WRF с использованием схем КФ и Ансамблевая схема Грелла-Дэвени занижает количество осадков над восточной, северо-восточной и южной частями Танзании. Но модель сильно уменьшает количество осадков на большей части страны, используя схему Тидтке. Анализ численных экспериментов с октября по декабрь 2017 г, лучшей схемой является схема Каина-Фритш и Тидтке в Аруше со средней абсолютной ошибкой 11,5 мм/10 дней и 11,7 мм/10 дней соответственно.

В сезоне с июня по август 2017 все три схемы прогнозируют одинаковую пространственную структуру осадков над прибрежными районами. Но над островами (Занзибар) прогнозировалось очень большое количество осадков по сравнению с наблюдаемым. Также из анализа результатов численных экспериментов с июня по август 2017 г на метеостанции Мванза все три схемы были лучшие. В Аруше лучшей схемой является схема Каина-Фритш и Тидтке и в Дар-Эс-Саламе схема Каина-Фритш.

В период с марта по май 2020 г. прогноз модели WRF со схемой КФ показывает аналогичные характеры осадков на большей части территории Танзании при сравнении с пространственными данными CHIRPS. Схема Тидтке и ансамблевая схема Грелла-Дэвени уменьшают количество осадков на большей части территории, за исключением некоторых районов вдоль побережья.

Анализ результатов численных экспериментов показывал, что с марта по май 2020 г. наименьший разброс средней абсолютной ошибки прогноза изменяется с 20,8 мм/ 10 дней над Мванзей. Все схемы показывают худший прогноз над Занзибаром с MAE от 100,9 до 121 мм/10 дней.

Анализ потенциальных предикторов и численный прогноз погоды не дали убедительных или хороших результатов в некоторые сезоны, особенно сезон МАМ. Поэтому необходимо продолжить это исследование в будущем, чтобы повысить точность долгосрочного прогноза погоды в Танзании.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. TMA Statement on the Status of Tanzania Climate in 2020 [Text]/ Tanz Basalirwa, C.P.K. The climatological regions of Tanzania based on the rainfall characteristics [Text] / C.P.K. Basalirwa, J. O. Odiyo, R. J. Mngodo and E. J. Mpeti // Int. J. Climatol.–1999.–Vol.19.–P.69 – 80.ania Meteorological Authority, 2021
2. TMA Statement on the Status of Tanzania Climate in 2020 [Text]/ Tanzania Meteorological Authority, 2021
3. McSweeney, C. UNDP Climate Change Country Profiles [Text] / C. McSweeney, M. Newand G. Lizcano.–Tanzania, 2006/
4. Philimone H. K, Paul T S L Inter-Annual Variability of March to May Rainfall over Tanzania and its Association with Atmospheric Circulation Anomalies
5. [https://climexp.knmi.nl/selectfield\\_obs2.cgi?id=someone@somewhere](https://climexp.knmi.nl/selectfield_obs2.cgi?id=someone@somewhere)
6. Caio A.S Simone M.S Challenges for integrating seasonal climate forecasts in user applications//www.sciencedirect.com
7. Zewdu T. Segele //Sensitivity of Horn of Africa Rainfall to Regional Sea Surface Temperature Forcing// Zewdu T. Segele, Lance M. Leslie and Aondover A. Tarhule
8. Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting [Text]/ World Meteorological Organization WMO-No 1246
9. The international research institute (IRI) for climate and society // Earth Institute/Columbia university [Electronic resource]–Point access: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cpt/>
10. Hannah R. Y. Skill of Seasonal Rainfall and Temperature Forecasts for East Africa [Text]/ Hannah R. Y. and Nicholas P.K.//Journal of American Meteorological Society DOI: 10.1175/WAF-D-19-0061.1
11. John E. Walsh Analog Method for Seasonal Forecasting in Northern High Latitudes/ John E. Walsh, Brian Brettschneider, Nathan P. Kettle, Richard L. Thoman// Scientific research publishing Atmospheric and Climate Sciences Vol.11 No.3, July 2021
12. Adrew Schepen Combining the strengths of statistical and dynamical modeling approaches for forecasting Australian seasonal rainfall/Adrew Schepen,

Wang Q.J., David E. R. // Journal of Geophysical Research, Vol. 117, D20107, DOI:10.1029/2012JD018011, 2012

13. [https://www.meteo.go.tz/weather\\_forecasts/seasonal-weather-forecast](https://www.meteo.go.tz/weather_forecasts/seasonal-weather-forecast)
14. Wang C. A unified oscillator model for the El Niño/Southern Oscillation/ Wang C //J. Climate 14 (2001) 98-115.
15. Николаев Г. Н. Союз океана и атмосферы правит климатом // Наука и жизнь, 1998.- № 1.-С. 27-33.
16. <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams>
17. Sodem B.J. The sensitivity of the tropical hydrological cycle to ENSO/ B.J. Sodem// J. Climate 13(2000)538-549.
18. El Niño/La Niña Update/<http://public.wmo.int/en/media/news/el-niñola-niña-update-3>
19. <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
20. <https://fews.net/indian-ocean-dipole-and-precipitation>
21. [https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/DMI/](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/DMI/)
22. Huesmann A.S., and M.H. Hitchman, 2001: The stratospheric quasibiennial oscillation in the NCEP reanalyses: Climatological structures. J. Geophys. Res., 106, 11859-11874.
23. [https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/qbo/qbo.html](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html)
24. Reid, G.C and K.S Gage, 1981: On the annual variation in height of the tropical tropopause. J.Atmos. Sci., 38, 1928-1938.
25. Roberto Buizza Chaos and weather prediction January 2000 // European Centre for Medium-Range Weather (ECMWF)
26. William C. Skamarock A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4/ William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimy Dudhia, David O. Gill // NCAR TECHNICAL NOTE July 2021
27. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д., Численные методы прогноза погоды
28. <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/.CHIRPS/>

## Приложение А

## Пространственно-осредненные месячные суммы осадков Танзании

Таблица А.1- Месячные суммы осадков (мм)

Годы	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1961	100.6	180.1	156	158.5	54.8	11.2	24	7.7	22.8	80.6	238.8	254.5
1962	222.3	141.8	188.5	169.4	61.2	14.2	6.1	14.5	15.3	53.1	79.8	129.7
1963	208.7	156.4	206.8	187.8	54.8	16.2	4.9	2.9	6.5	12.3	215.2	181
1964	171.2	186.1	221.5	174.5	23.2	14.1	7.9	8.4	11.3	21.9	45.6	118.9
1965	112.8	138.1	186.9	157.3	43.2	4.7	3	5.5	21.8	43.5	79.7	191
1966	109.4	158.5	213.8	131.1	38.9	17.5	4.1	9.4	17.3	29.7	82.4	120
1967	93.1	123.4	144.1	220.8	112.8	17.5	22.1	13.4	40.7	39.4	149.2	244.5
1968	131.6	205.9	243.7	235.3	55.4	29.2	4.1	4.4	11.1	26.4	105	167.6
1969	129.6	151.4	142.6	132.4	60.8	8.8	5.9	10.7	11.5	29.5	96.9	93
1970	212.1	171.4	225.7	130.6	34.1	3.8	6.6	5.7	20	20.2	54.3	184.2
1971	137.2	135.6	134.4	197.2	53	12.5	12	6.9	11.2	25.8	76.4	137.9
1972	136.9	159.5	161.8	141.7	102.3	14.2	6.5	8.5	23.5	58.7	134.5	165.2
1973	190	143.7	128.3	171.2	47.6	11.1	3.3	7.3	17.3	23.7	82.6	112.6
1974	136.3	81.1	172.7	252.6	87.2	20.3	19.2	4.9	9.6	18.2	55.6	121
1975	125.3	100.8	194.9	162.2	59.9	13.4	10.6	4.8	32.8	25.9	41	139.2
1976	121.9	136.1	178.2	146.5	67.6	25.9	10.8	8.1	19.4	26.6	47.8	96.7
1977	187.8	120.1	127.4	204.5	73.8	7.7	5	13.1	21.4	39.1	123.7	170.3
1978	148	144.6	267.8	167.3	32	10.3	3.4	7	9.9	26.2	159.4	211.2
1979	187.8	214.4	215.9	223.8	77.7	19.3	8.1	5.4	8	15.9	79.7	181.7
1980	158.9	88.4	188.9	193.8	87.1	2.4	3.5	13.3	15.4	28.8	94.5	149.1
1981	121.7	127.5	196.9	147.5	90.8	8.4	4.5	10.5	16.9	31.7	49.8	158.4

1982	114.7	104.3	143	153.6	109.2	22.3	13.7	7.6	18.8	88.1	198.3	184.9
Годы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1983	137.8	101.7	156.6	128.6	82.5	15.1	9.3	9.9	12.7	35.3	56.6	162.3
1984	174.8	135.3	131	175.6	41	19.3	13	5.5	7.4	38.2	128.1	175.5
1985	105.4	189.8	153.8	162	55.3	6.5	11.3	5.6	13.4	20.4	129.4	146.5
1986	176.8	106.3	168.9	183.9	79.7	9.8	2.7	6	7.9	51.5	103.1	228.7
1987	170.6	140.9	148.5	129.1	72.6	9.9	7.2	9.9	15.5	26.6	80.1	76.6
1988	193.2	121	215.1	138.1	30.8	17.7	6.7	13.8	19.2	28.5	84.2	161.9
1989	194.6	100.7	184.7	200.9	88.3	17.9	7.3	11.1	15.9	34	96.3	212.4
1990	102	179	219.4	189.6	45.4	4.6	3	4.5	13.3	30.2	75.6	125.3
1991	189.7	113.1	197.9	151.4	82	9.3	9.6	8.2	13.2	43.5	81	166.9
1992	98.2	142.7	126.9	179.9	71.8	14.8	7.6	4.1	11.6	30	118.6	150
1993	172.6	147.6	174.8	150.3	61.1	12.8	4.8	8.7	6.3	17	59.3	53.8
1994	166	171.9	182.1	120	59.8	6.9	9.6	10	9.5	30.8	90.1	147.4
1995	153.1	160.1	192.9	131.6	77.9	7.1	3	11.3	15.7	37.8	38.2	115.1
1996	139.2	224.3	191	136.8	68.9	6.5	7.3	6.1	13.6	22	43.8	95.4
1997	115.9	105.6	154.8	188.5	61.5	27.2	6.3	3.8	3.4	60.6	157.3	260.6
1998	249.6	187.4	156.5	192.1	68.9	11.3	4.2	4	14.6	23.6	46.5	57.4
1999	162.5	83.2	260.4	166.3	40.2	21.9	9.4	13.3	13.6	17.7	102.3	102.7
2000	91.6	79.6	184	107.1	51.6	17.3	4.2	11.2	8.7	21.7	141.5	201.7
2001	217.7	117.7	160.4	132.5	40.2	12.9	6.7	8.1	17.7	27.7	63	138.8
2002	210	131.1	232.3	161.1	49.9	8.4	3.1	13.1	19.2	37.1	105	172.9
2003	137.6	100.4	129.8	115.1	83.4	8.8	3.4	5	13.2	31.4	42.4	123.7
2004	146.9	179.4	154.1	170.3	14.1	11.1	1.3	5	31	39.9	101.9	171.8
2005	162.8	110.6	161.6	112	67.4	5.3	3.1	7.3	12.4	32.2	41.8	81.3
2006	98.4	131.3	177	188.8	82.5	13.8	11	10	20.5	33.9	165.3	263
2007	174.6	144.8	172.5	108.8	51.9	9.9	8.6	14.1	25.8	28.8	55.7	156.1
2008	136.7	174.3	211.4	115.4	33.4	6.4	2.9	2.5	18.3	48.8	95.9	106.5

2009	134.2	157	177.2	107.2	38.4	8	2.1	2.1	13.3	34.6	105.3	171.5
2010	146.3	160.5	176.9	129.3	60.4	20.1	1.6	3.2	10	18.8	54	120.3
Годы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2011	105.5	139.9	175.5	131.4	53.1	17	3.6	6.5	30.6	40.9	118.8	202.4
2012	106	95.8	109.4	158.1	42.7	17.9	2.4	12.8	10	32.4	81.9	159.2
2013	157.4	80.7	214.9	169.2	39.1	3.6	2.5	7.5	30.2	25.5	100.2	162.6
2014	152.4	135.4	109.9	140.6	59.6	9.3	4.6	8.8	31.3	43.2	112.3	159
2015	147.5	92.6	122.3	183.3	73.2	17.3	2.5	3.6	10.5	42.4	122.1	183.7
2016	229	157.4	164.3	223.4	58.4	13.1	13.4	7.2	15.2	22.1	73.3	145
2017	99.4	180.3	164.4	141.6	72	22.4	6.5	4.5	33.1	57.6	99.8	111.3
2018	194.6	117.8	207.9	176	66.9	7.5	8.1	8.1	11.1	34.6	85.7	166.7
2019	132.1	136.4	193.4	175.2	130	18.1	6.3	7.4	12.3	55.6	110.5	229.5
2020	236	145.3	299.7	199.5	44.6	15.8	10.2	5.3	16.2	43.6	113.7	155.6

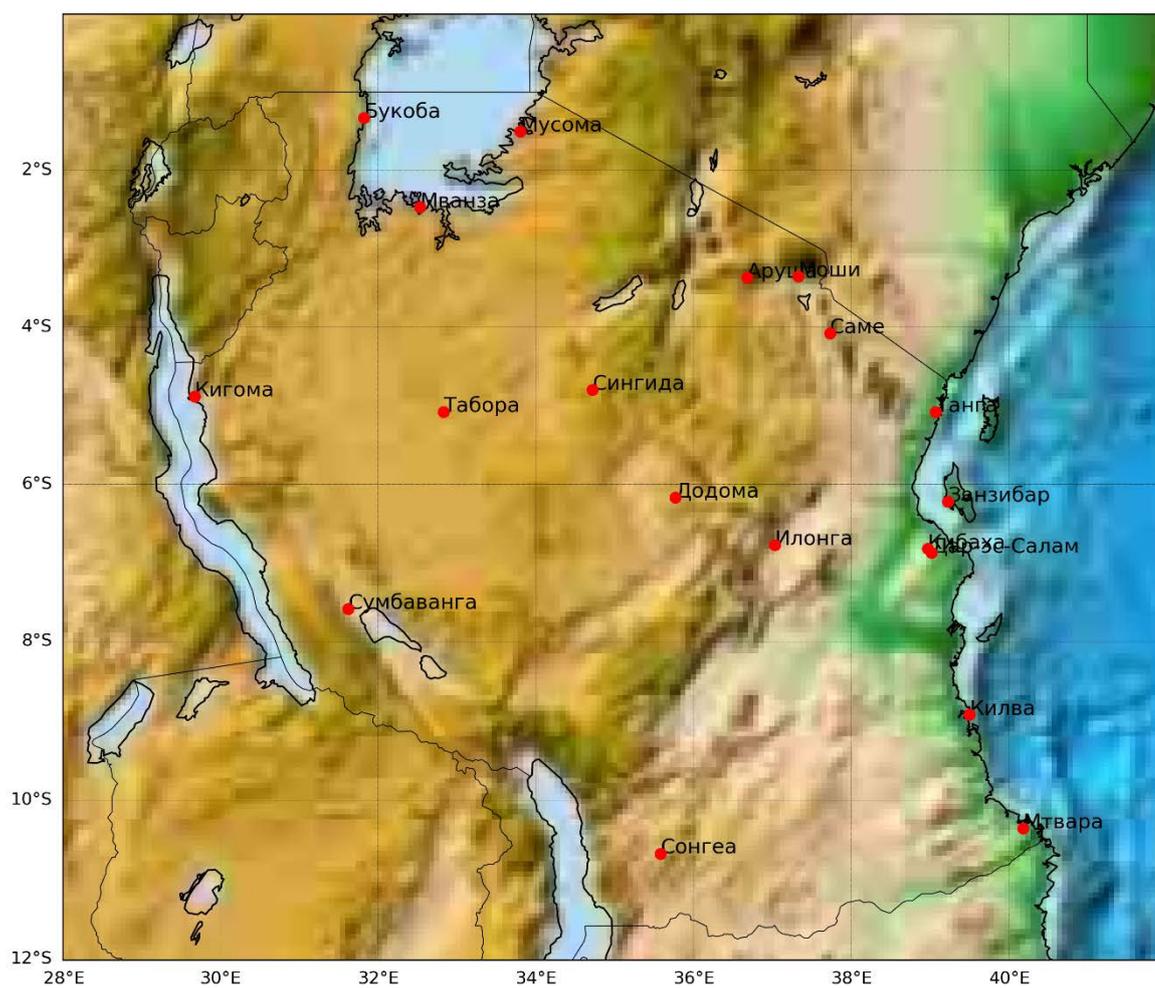
## Приложение Б

Метеорологические станции (используемых в исследовании) на территории  
Танзании

Таблица Б: Список станции

	Название станции	Долгота	Широта	Высота (м)
1	Букоба	31.82	-1.33	1144
2	Мусома	33.8	-1.5	1147
3	Мванза	32.53	-2.47	1140
4	Аруша	36.68	-3.37	1372
5	Додома	35.77	-6.17	1120
6	Саме	37.73	-4.08	860
7	Табора	32.83	-5.08	1233
8	Кигома	29.67	-4.88	822
9	Сонгеа	35.58	-10.67	1036
10	Мтвара	40.18	-10.35	113
11	Дар-эс-Салам	39.02	-6.87	53
12	Занзибар	39.23	-6.22	58
13	Танга	39.07	-5.08	54
14	Моши	37.33	-3.35	813
15	Килва	39.5	-8.92	14
16	Илонга	37.03	-6.77	502
17	Сингида	34.72	-4.80	1307
18	Кибаха	38.97	-6.82	167
19	Сумбаванга	31.62	-7.58	1824

Рисунок Б: Географическое расположение метеостанции



Приложение В  
Индекс Ниньо 3,4

Таблица В: Индекс Ниньо 3,4

Годы	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	0.54	0.22	0.03	-0.07	0.08	0.21	-0.06	-0.38	-0.28	-0.26	-0.1	0.05
1981	-0.36	-0.64	-0.64	-0.53	-0.57	-0.46	-0.64	-0.53	-0.19	-0.3	-0.41	-0.2
1982	0.13	-0.17	0.13	0.21	0.45	0.53	0.37	0.73	1.49	1.99	1.92	2.2
1983	2.35	1.94	1.38	0.95	0.9	0.54	-0.11	-0.27	-0.52	-1.16	-1.29	-1.03
1984	-0.67	-0.19	-0.52	-0.68	-0.73	-0.9	-0.5	-0.24	-0.34	-0.67	-1.19	-1.34
1985	-1.16	-0.72	-0.79	-1.18	-1.03	-0.91	-0.74	-0.56	-0.7	-0.49	-0.37	-0.41
1986	-0.66	-0.71	-0.42	-0.33	-0.53	-0.31	-0.11	0.32	0.53	0.81	1.01	1.12
1987	1.14	1.13	0.98	0.58	0.62	0.92	1.29	1.57	1.65	1.24	1.07	0.94
1988	0.9	0.28	0.1	-0.44	-1.25	-1.74	-1.74	-1.19	-1	-1.9	-2.05	-1.96
1989	-1.97	-1.47	-1.21	-1.08	-0.88	-0.59	-0.57	-0.53	-0.3	-0.4	-0.45	-0.13
1990	0.01	0.21	0.04	0.08	0.08	-0.08	0.09	0.22	0.22	0.21	0.1	0.35
1991	0.49	0.32	0.03	0.19	0.26	0.52	0.76	0.68	0.42	0.86	1.2	1.69
1992	1.84	1.78	1.38	1.2	1.04	0.58	0.22	0.05	-0.06	-0.3	-0.28	-0.15
1993	0.14	0.41	0.39	0.59	0.78	0.35	0.23	0.13	0.35	0.06	0	0.16
1994	0.1	0.06	0.11	0.26	0.31	0.32	0.24	0.53	0.48	0.75	1.11	1.25
1995	1.02	0.73	0.46	0.28	-0.11	-0.14	-0.21	-0.63	-0.84	-0.88	-1.1	-0.95
1996	-0.86	-0.86	-0.61	-0.47	-0.38	-0.44	-0.44	-0.22	-0.45	-0.44	-0.41	-0.64
1997	-0.53	-0.37	-0.25	0.16	0.64	1.09	1.56	1.89	2.13	2.36	2.41	2.29
1998	2.38	2.03	1.34	0.78	0.57	-0.39	-0.99	-1.28	-1.26	-1.46	-1.46	-1.69
1999	-1.69	-1.32	-0.95	-1.11	-1.15	-1.19	-1.17	-1.22	-1.09	-1.23	-1.58	-1.74
2000	-1.77	-1.55	-0.98	-0.87	-0.86	-0.79	-0.67	-0.49	-0.52	-0.7	-0.79	-0.92

2001	-0.73	-0.63	-0.48	-0.49	-0.34	-0.19	-0.04	-0.05	-0.2	-0.14	-0.37	-0.41
2002	-0.15	-0.04	0.01	0.02	0.31	0.72	0.74	0.87	1.09	1.25	1.47	1.37
2003	0.6	0.64	0.36	-0.14	-0.61	-0.29	0.21	0.26	0.27	0.42	0.33	0.43
2004	0.27	0.23	0.12	0.07	0.06	0.13	0.49	0.76	0.81	0.73	0.66	0.74
2005	0.66	0.36	0.45	0.26	0.3	0.04	-0.23	-0.05	-0.04	-0.06	-0.59	-0.92
2006	-0.91	-0.67	-0.71	-0.32	-0.09	0	0.01	0.31	0.6	0.7	0.99	1.14
2007	0.7	0.13	-0.18	-0.32	-0.47	-0.35	-0.59	-0.72	-1.11	-1.39	-1.54	-1.58
2008	-1.68	-1.67	-1.21	-0.99	-0.84	-0.68	-0.3	-0.13	-0.25	-0.35	-0.46	-0.86
2009	-0.89	-0.79	-0.69	-0.35	0.06	0.31	0.48	0.56	0.68	0.89	1.46	1.74
2010	1.52	1.25	0.9	0.38	-0.22	-0.69	-1.07	-1.39	-1.6	-1.69	-1.64	-1.6
2011	-1.54	-1.11	-0.93	-0.77	-0.52	-0.38	-0.43	-0.65	-0.8	-1.05	-1.19	-1.06
2012	-0.87	-0.67	-0.61	-0.5	-0.32	0.02	0.25	0.47	0.38	0.26	0.16	-0.25
2013	-0.53	-0.52	-0.25	-0.25	-0.4	-0.42	-0.39	-0.38	-0.18	-0.2	-0.14	-0.17
2014	-0.49	-0.62	-0.28	0.08	0.32	0.23	-0.06	-0.03	0.29	0.44	0.75	0.71
2015	0.51	0.42	0.47	0.7	0.92	1.18	1.46	1.93	2.21	2.36	2.72	2.66
2016	2.57	2.26	1.62	0.91	0.3	-0.03	-0.48	-0.58	-0.58	-0.74	-0.76	-0.5
2017	-0.43	-0.08	0.03	0.22	0.37	0.34	0.25	-0.16	-0.43	-0.56	-0.97	-0.98
2018	-0.98	-0.78	-0.8	-0.51	-0.2	0.04	0.12	0.09	0.47	0.9	0.9	0.89
2019	0.65	0.71	0.81	0.62	0.55	0.45	0.35	0.04	0.03	0.48	0.52	0.52
2020	0.6	0.37	0.48	0.36	-0.27	-0.34	-0.3	-0.59	-0.83	-1.26	-1.42	-1.15

Приложение Г:  
Дипольный индекс ТПО Индийского океана (IOD)

Таблица Г: Дипольный индекс Индийского океана (IOD)

Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	-0.093	-0.12	-0.317	-0.02	0.014	-0.268	-0.564	-0.71	-0.639	-0.498	-0.294	-0.413
1981	-0.136	0.056	0.127	0.168	0.062	-0.126	-0.463	-0.516	-0.651	-0.447	-0.204	0.05
1982	0.209	0.246	0.154	0.194	0.302	0.369	0.362	0.369	0.548	0.783	0.407	-0.093
1983	-0.416	-0.507	-0.652	-0.481	0.021	0.484	0.621	0.457	0.037	-0.128	-0.22	-0.031
1984	-0.158	-0.069	-0.022	0.125	-0.225	-0.243	-0.269	-0.385	-0.502	-0.494	-0.295	-0.209
1985	-0.401	-0.547	-0.441	-0.125	-0.143	-0.516	-0.307	-0.346	-0.132	-0.339	0.197	-0.348
1986	-0.047	-0.056	-0.1	-0.211	-0.074	-0.165	-0.449	-0.288	-0.036	0.111	-0.12	-0.205
1987	-0.015	0.121	-0.037	-0.081	0.244	0.223	0.304	0.409	0.499	0.414	0.072	0.222
1988	0.418	-0.074	-0.212	-0.053	-0.434	-0.158	-0.053	-0.177	-0.288	-0.365	-0.06	0.226
1989	-0.215	0.035	-0.219	-0.405	-0.515	-0.666	-0.35	-0.209	-0.119	-0.253	-0.215	-0.097
1990	-0.033	-0.209	-0.043	-0.31	-0.269	-0.455	-0.149	-0.279	-0.077	-0.186	0.029	0.073
1991	0.131	-0.017	0.063	0.364	0.459	0.376	0.366	0.17	0.205	0.129	0.164	0.153
1992	-0.256	-0.309	-0.571	-0.478	-0.47	-0.747	-0.382	-0.656	-0.727	-0.467	-0.276	-0.247
1993	-0.131	0.115	-0.195	-0.106	0.053	0.006	-0.055	-0.193	-0.064	0.004	-0.026	-0.136
1994	0.09	-0.066	0.302	0.426	0.624	0.546	0.654	0.923	0.635	0.867	0.41	0.332
1995	0.205	0.243	0.05	-0.146	-0.172	0.036	-0.073	-0.032	-0.074	-0.207	-0.171	0.16
1996	0.045	0.047	0.015	-0.293	-0.186	-0.281	-0.546	-0.568	-0.606	-0.949	-0.674	-0.344
1997	-0.045	0.159	0.143	0.129	0.105	0.195	0.544	0.746	0.877	1.033	1.402	0.932
1998	0.59	0.502	0.045	0.122	0.219	0.261	-0.288	-0.467	-0.39	-0.584	-0.53	-0.266
1999	-0.065	0.042	0.202	0.073	-0.106	-0.032	0.208	0.135	0.056	-0.03	0.007	-0.079
2000	-0.06	0.071	0.24	0.217	0.192	0.091	0.174	0.243	0.01	0.017	-0.183	-0.178

2001	-0.366	0.063	0.09	0.212	0.217	0.241	-0.043	-0.189	-0.117	-0.291	-0.122	0.019
2002	-0.077	-0.018	0.108	-0.277	-0.249	-0.076	-0.164	-0.096	0.392	0.565	0.22	-0.088
2003	-0.174	0.097	0.061	-0.024	-0.084	0.252	0.228	0.22	0.045	-0.084	-0.036	0.258
2004	0.109	0.194	0.177	-0.005	-0.485	-0.27	-0.204	-0.02	0	0.155	-0.03	-0.063
2005	-0.058	-0.48	-0.332	0.16	0.046	-0.062	-0.287	-0.233	-0.428	-0.276	-0.149	-0.23
2006	-0.07	-0.225	-0.126	0.06	-0.128	0.055	0.137	0.341	0.534	0.736	0.624	0.241
2007	0.29	0.23	0.216	0.175	0.349	0.144	0.141	0.349	0.341	0.227	0.1	-0.157
2008	0.18	0.008	0.197	-0.078	0.258	0.329	0.343	0.237	0.192	0.188	-0.005	0.016
2009	0.097	0.243	0.2	0.201	0.336	0.214	-0.095	0.008	0.003	0.147	0.056	0.23
2010	0.359	0.103	0.558	0.445	0.05	-0.026	0.096	0.051	-0.162	-0.277	-0.372	-0.142
2011	0.257	0.322	0.467	0.229	-0.01	0.169	0.319	0.457	0.308	0.516	0.459	-0.059
2012	0.111	0.002	0.126	-0.196	-0.29	0.115	0.643	0.764	0.559	0.27	0.024	0.337
2013	0.001	0.269	0.183	-0.222	-0.426	-0.383	-0.083	-0.082	-0.204	-0.009	0.323	0.21
2014	-0.036	-0.009	-0.051	0.017	-0.012	0.086	-0.266	-0.26	-0.039	0.3	0.133	0.116
2015	-0.034	-0.265	-0.141	0.067	0.32	0.41	0.322	0.68	0.4	0.642	0.47	0.341
2016	0.331	-0.03	0.091	0.222	-0.034	-0.329	-0.661	-0.332	-0.331	-0.212	-0.259	-0.241
2017	-0.02	0.181	0.457	0.574	0.616	0.537	0.617	0.461	0.14	0.175	0.412	0.179
2018	-0.135	0.295	-0.02	-0.008	0.202	0.269	0.15	0.234	0.71	0.844	0.623	0.379
2019	0.452	0.496	0.325	0.333	0.619	0.719	0.693	0.548	0.999	1.123	0.958	0.312
2020	0.238	0.134	0.119	0.064	0.378	0.568	0.417	-0.07	-0.084	0.233	0.143	0.1

Приложение Д:  
Индекс КДЦ (QVO u50 mb zonal wind)

Таблица Д: Индекс КДЦ

Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1980	-10.11	-5.65	-2.9	2.31	6.24	7.33	8.74	9.61	12.67	13.1	12.15	9.73
1981	8.51	6.72	7.51	8.28	3.01	-3.49	-5.22	-8.24	-8.59	-9.53	-9.62	-12.31
1982	-12.52	-14.71	-16.67	-15.55	-15.26	-15.94	-8.95	-1.58	4.21	8.27	9.51	10.35
1983	10.85	11.4	12.17	13.81	11.93	3.12	-3.38	-6.53	-7.75	-10.12	-10.29	-11.42
1984	-10.65	-11.34	-12.98	-14.58	-15.05	-17.97	-25.39	-27.9	-25.44	-21.59	-13.19	-8.16
1985	-0.37	4.21	6.3	11.11	13.57	14.04	11.1	11.08	11.72	11.84	11.45	9.51
1986	8.74	10.15	11.96	9.11	3.56	-2.15	-5.25	-9.6	-10.21	-9.6	-8.01	-10.51
1987	-9.93	-11.37	-14.23	-16.2	-20.05	-21.47	-13.96	-0.6	5.88	9.35	9.23	8.41
1988	7.81	6.17	5.86	6.59	5.46	0.42	-3.96	-2.58	-2.29	-1.53	-0.84	-2.42
1989	-2.87	-3.56	-1.63	-1.93	-5.46	-9.38	-13.86	-16.98	-18.83	-21.3	-19.01	-13.54
1990	-8.71	-6.74	0.95	5.72	11.46	12.9	12.54	12.63	13.21	12.39	11.55	10.68
1991	8.71	8.44	9	10.69	3.82	-3.34	-10.36	-14.69	-13.96	-12.21	-12.27	-12.68
1992	-13.96	-14.33	-16.84	-17.79	-15.96	-15.34	-12.05	-4.75	1.3	3.94	6.33	8.19
1993	9.63	10.81	11.36	12.6	13.56	6.55	0.38	-1.2	-1.14	-4.04	-5.76	-6
1994	-7.64	-9.84	-11.29	-14.71	-18.03	-23.09	-28.65	-27.02	-19.07	-10.29	-0.3	5.93
1995	8.38	8.01	8.79	11.79	14.92	15.62	11.74	9.53	6.98	3.43	-0.77	-4.57
1996	-5.79	-6.9	-9.92	-11.08	-14.88	-17.03	-23.93	-25.85	-26.02	-23.4	-18.08	-9.86
1997	-3.57	1.94	4.77	9.74	12.37	14.5	14.85	11.69	11.64	9.91	5.74	0.78
1998	-0.85	-2.96	-4.92	-7.82	-14.08	-18.57	-22.97	-24.7	-22.12	-18.77	-12.22	-3.96
1999	3.09	5.84	8.59	13.51	15.56	15.23	14.11	11.91	11.18	10.62	6.01	6.43
2000	4.85	4.2	5.51	3.98	-0.99	-7.83	-13.13	-15.31	-15.52	-14.04	-15.07	-14.56
2001	-15.69	-15.53	-15.99	-17.73	-20.99	-23.31	-24.45	-21.67	-14.29	-10.81	-3.88	1.48

2002	4.64	8	9.32	14.03	14.16	13.26	10.05	10.6	8.9	7.66	4.46	-0.5
2003	-1.39	-1.43	-3.3	-8.56	-13.63	-17.71	-22.99	-24.64	-22.51	-20.34	-17.86	-11.38
2004	-4.84	2.61	5.45	10.46	12.97	11.75	9.96	8.74	7.29	8	4.35	2.45
2005	-0.69	-0.96	-0.33	-6.64	-15.09	-20.59	-24.2	-25.87	-27.8	-28.76	-29.55	-25.04
2006	-18.83	-11.24	-0.38	5	10.36	11.47	10.75	9.1	10.2	10.86	10.1	6.21
2007	2.61	2.43	1.24	-5.18	-14.06	-21.33	-24.92	-27.41	-28.13	-29.05	-27.61	-19.48
2008	-12.42	-4.7	2.19	6.43	11.53	13.45	13.27	11.63	11.6	11.05	9.13	10.46
2009	10.71	12.33	11.44	9.11	1.56	-5.47	-12.21	-14.45	-13.81	-11.69	-13.83	-15.57
2010	-16.02	-16.98	-19.68	-23.57	-26.28	-25.05	-9.84	1.45	6.58	10.83	12.16	10.97
2011	9.18	10.05	10.44	10.71	10.02	3.9	0.44	-0.49	-2.3	-3.05	-9.09	-16.25
2012	-16.07	-15.25	-16.74	-17.62	-22.04	-25.89	-27.82	-27.93	-26.6	-24.51	-18.95	-10.02
2013	-6.07	-1.23	2.85	8.39	12.64	13.38	14.27	14.66	13.12	11.69	12.45	12.55
2014	13.13	12.68	11.72	7.15	-2.81	-13.98	-19.29	-21.64	-23.24	-23.86	-23.65	-25.38
2015	-26.7	-28.62	-28.15	-24.38	-12.33	2.18	7.45	10.97	12.07	13.38	12.79	11.39
2016	9.34	6.77	3.16	0.64	2.37	3.86	6.25	10.07	10.48	12.83	14.16	15.09
2017	14.92	14.78	14.35	13.88	8.01	-3.18	-10.48	-14.42	-15.28	-16.79	-17.2	-18.12
2018	-19.02	-19.37	-19.77	-21.41	-24.23	-28.45	-29.1	-20.41	-9.91	-2.79	3.36	8.05
2019	9.02	9.25	11.82	13.36	14.59	14.36	10.96	9.97	8.25	7.27	5.07	1.66
2020	-2.51	-3.2	-4.36	-5.03	-4.86	-2.78	0.34	4.78	7.95	10.8	11.15	10.37

## Приложение Е

Таблица Е: МАМ сезонные суммы осадков

Год	Дар	Танга	Занзибар	Кибоха	Аруша	Саме	Моши	Кигома	Табора	Иринга	Мтвара	Килва	Сонгеа	Додома	Сингида	Илонга	Букоба	Мусома	Мванза
1980	334.6	314.2	542.7	327.3	348.1	216.6	651.5	270.1	358.6	191.1	559.1	352.7	570.9	355.7	260	428.4	929.3	423.4	428.5
1981	550.5	701.1	1071.2	420.9	559.3	413.8	805.5	452	336	271.8	253	304	247.6	192.1	243.9	520.9	872.8	727.4	621
1982	495.2	799.1	831.6	463.8	391.5	266.5	421.2	338.1	255.5	200.6	479.3	493.3	359.4	137.3	157.7	439.8	851.1	503.6	400.7
1983	707.6	698.8	1052.6	618.2	286.5	188.2	488.8	267.8	270.5	165.4	494.4	508.8	346.2	135.5	137.6	596	753.7	378.4	285.3
1984	743.8	630.1	978.6	702.6	278.7	274.3	626.1	225.2	209.8	169.1	541.8	497.7	270.4	181.4	169.5	365.1	820.3	252.8	193.4
1985	433.8	688.8	856.7	337.8	409	118	520.4	246.7	342.6	97.6	284	347.3	197.2	114.8	155.6	375.2	1022.5	588.5	471.9
1986	902.7	1064.5	1375.6	648	584.8	237.1	760.2	190.1	317.6	125.5	585.9	559.9	333.7	119.7	219.4	387.4	887.2	503.3	381.4
1987	485.3	901.2	811.2	391.1	327.6	350.3	238.1	311.7	308.3	195.8	228	194	321.3	235.1	309.7	339	826.8	447.6	381.5
1988	366.2	455.5	563.7	369.6	305.5	212.8	843.2	346.4	352.3	292.2	362.3	135.2	172.7	201.7	289	304	756.9	621.6	567
1989	561.1	490.6	711.6	446.2	543.4	350.2	538.6	296.2	296.2	195.7	587	542	556.3	272.7	196.5	401.5	926.2	303.1	388
1990	465.3	720.4	602.4	448	594.3	395.9	928.3	482.1	733.8	280.9	379.9	363.3	257.1	309.4	325.5	488.1	646.5	500.6	558.7
1991	445.6	585.6	781.5	337.5	280.8	193.7	530.6	269.2	128.8	175.4	787.8	547.1	501.1	147.3	270	469.4	1194.8	338	401.2
1992	664.8	674.9	1190.4	598.4	457.8	231	700.2	274.6	358.6	142.2	814.2	805.6	298.2	172.6	79.1	750.8	874.7	221.7	260.6
1993	640.2	474.8	884.9	546.1	329.5	129.3	223.7	252.7	188.2	195.3	532.4	446.9	442.1	108.8	200.4	786.9	929.8	381.5	418.2
1994	560	691.2	898.2	630.7	399.4	232	477.5	316.5	169.3	245	240.3	367.5	404.1	53.5	114.5	335.2	1296.8	373.4	427.9
1995	949.7	638.1	991	911.9	538.1	188.8	790.8	290.7	286.5	230.8	405.9	587.2	301.6	135.9	178.4	370.3	958.3	553.8	417.9
1996	710.5	661.5	1063.5	787.9	407.9	191.7	464.3	303.6	353.3	146.7	342.1	434.6	368	291.1	187.1	431.1	910.9	294.5	269.3
1997	567.9	567.9	982.5	543	608.3	309.2	683.1	330.5	386.7	171.5	542.3	675.8	117.8	107.3	126.3	393.9	674.5	470.6	606.1
1998	636.7	928.5	885.5	432.9	590.1	277.2	584.2	368.7	270.8	298	361	658.1	275	128.1	204.1	494.2	789.9	393.7	420.6
1999	624.4	729.9	706.5	522.2	346.6	246.4	718.5	349.2	346.2	223.4	483.5	526.9	485.7	297.1	317.7	739.4	802.1	543.7	432.8
2000	439.6	478.9	708.2	381.9	218.5	202.3	293.5	240.2	261.6	196.6	472.2	478.2	321.3	205.5	129.2	266.5	553.9	278.5	133.3
2001	598.2	415.9	996.6	610.3	335.1	184.4	622.3	383.6	281.6	112.2	381.2	394.9	363.3	132.4	134.4	399.6	712.9	608	261.7
2002	796.7	567.4	893.3	702.8	414.1	151.7	739.6	405.1	447.5	201.9	513	450.7	416	78.4	264.4	664.8	931.4	497	569.2
2003	266.9	335.1	286.8	172.9	220.7	172.9	412.8	338.4	278.1	116.4	176.4	123.8	335.1	77.4	120.5	363.8	663.7	404.6	426.3

2004	451.4	339.4	785.7	398.1	160.4	129.3	325.6	214.4	269	266.2	319.3	390.2	288.8	203	219.2	326.4	821.5	413.9	405.7
2005	502.2	432	1188.8	493.4	319.5	147.4	374.1	205.9	310.4	113.8	448.6	542.7	347.6	152.7	194.6	367.7	1151.2	427	519.5
2006	636.6	468.1	771.5	658.5	612.7	444.4	667.1	382.2	391	182.4	571.3	579.5	374.4	203.8	198.4	394.5	871.4	550.3	413.4
2007	507.3	850.6	1186.5	378.2	356.5	191	305.4	308.9	117	169.9	345.9	449.1	303.4	56.8	128.1	363.5	910.8	269.5	406
2008	525.6	377.6	824.2	644.4	537.1	486.3	810.2	256.3	292.5	174.8	392	201.8	242.1	195.5	221.9	197.6	810.7	327.3	259.1
2009	369.1	327	467.6	301	383.9	51.3	326.5	381.1	248.2	248.3	295.2	353.6	257.9	177.8	278.7	372.9	989.2	462.6	453.7
2010	648.9	628.1	669.8	467.6	468	307.9	707	393.2	349.8	84.2	637.9	511.7	233.5	44.5	73.5	505.1	842.1	579.1	426.3
2011	357.4	442.7	778.1	522.4	226.6	329.3	384.1	330.8	244.3	235.2	480.8	548.1	352.5	143.8	105.5	882.9	912.5	494.3	294.8
2012	423	237.3	449.9	435.1	299.1	111.1	199.5	211.1	245.1	162.7	290.1	517.3	243.1	207.5	140.7	286.4	1155.4	213.3	517.8
2013	455	591.9	604.9	459.1	337.4	291	589.1	337	324.8	152.1	388.5	363.1	374.3	142.6	410	542.3	1009	526.4	423.3
2014	1030	561.7	910	790.6	610.8	217.4	517.2	299.6	179.9	236.8	437.6	557.7	341.2	112	112.6	657.7	997.7	417	203
2015	729.7	682	929.4	674	340.6	205.2	364.5	252.8	289.3	140.6	452.6	572.7	210.8	87.9	189.5	396.1	783.8	565.6	533.8
2016	417.6	477.9	876.6	368.7	306.3	411.9	570.1	247.2	302.4	226	561.7	321.8	309.6	219	245.8	560	849.4	283.3	402.2
2017	711.4	965	1257.1	629.1	558.9	276.8	605	263.3	187.4	249.5	460.3	549.9	376.7	123.5	212.1	604.3	1282.6	277.9	298.3
2018	873.6	640.3	1260.2	801.7	826.8	401.9	636.2	461.7	512.5	189.2	575.3	500.8	304.7	203.3	280.9	458.5	782.2	494.8	567.4
2019	764.5	588.5	1069.5	460.2	436.7	211.7	388	226.6	140.9	214.5	448.9	534.2	242.1	158.4	150.1	280.6	1069.3	312.8	316
2020	859.7	561.2	1120.4	652	598.8	251.5	700.3	389.7	301	461.7	405.2	846.9	635.3	422.9	417.6	645.9	919	566.5	449.2

### Приложение Ж:

Таблица Ж: ОНД сезонные суммы осадков

Год	Дар	Танга	Занзибар	Кйбаха	Аруша	Саме	Моши	Кйгома	Табора	Иринга	Мтвара	Килва	Сонгеа	Додома	Сингида	Илонга	Букоба	Мусома	Мванза
1980	402.7	175.9	636	442.8	135.4	111	124.4	326.9	304.8	168.5	196.9	249.1	199.7	95.8	235.6	225	573.8	85	232.7
1981	348.7	367.1	494.3	305.2	127.1	199.9	147	435.1	215.2	87	407.1	365.4	237.4	84.5	105	437.2	630.4	68.3	163
1982	683.6	529.4	655.4	634.6	541.3	399.5	426.9	303	527.6	321.9	366.9	325.2	453.1	289.2	282.6	905.2	767.7	385.2	478.9
1983	153	92.5	322.7	218.9	220.1	199	111.7	316	338.3	190.1	185.6	268.1	299.8	239.6	255.1	114.8	544.5	164.8	386.3
1984	407.8	433.2	559.4	264.8	379	117.7	183.8	438.2	429.2	182.7	335	369.4	257.3	220.3	163.6	394.4	757.8	238.3	309.1

1985	218.4	321	681.9	204.2	213.2	131.8	219.9	492.8	382.3	155.6	302.7	239.1	309.5	123.7	225.3	228	625.8	171.1	256.9
1986	398.4	332.1	869.1	256.7	265.4	196.1	191.7	547.5	573.7	261.8	536.5	402.5	413.2	158.8	226.7	424.8	709.5	399.9	500.1
1987	111	202.8	298.3	120.6	160.5	65.3	33.6	274.4	168.3	124.1	116	261.2	116.5	91.9	108.1	192.5	402.8	130.4	395.4
1988	223.9	344.6	478.2	244.7	247.8	127.3	107.8	527.8	347.1	112.9	253.9	260.6	177.9	117.1	591.1	160.6	499.8	275.9	389.2
1989	275.9	455.1	453.9	285.4	272.6	195.8	127.1	337.3	374.5	184.5	355.5	122.1	230.3	285.4	286.1	293.1	533.9	444	575
1990	315.4	236.2	561.9	261	320.4	144.1	256.9	286.2	337.6	75.6	255.1	132.9	161.4	12.8	192	132.1	750.6	242.5	472.4
1991	431.7	275.3	423.3	138.9	248.7	195.2	160.4	509.2	193.6	108.9	514.2	249.8	275.1	130.7	111.6	358.5	391.1	361.3	469
1992	260.9	499.4	493.1	192	246.5	139.1	144.3	461.8	412	74.7	209.8	279.4	239.8	106.1	219.2	462.4	459.5	269.4	356.7
1993	358.3	330.6	461.7	103.9	93.4	43.8	112.4	311.8	16.7	8	51.1	112.9	62.3	42.9	16.2	54.5	286.3	112.5	188
1994	495.4	548.4	553.2	306.1	180.3	149.6	166.7	401.4	339.2	90.4	156.7	258.2	166.8	68.6	139.5	165.4	527.2	257.8	506.9
1995	343.1	365.7	267.1	117.8	32.6	90.3	91.4	339.7	176.1	96.9	91	95.4	132	181.7	78.9	147.4	487.6	162.4	438.9
1996	198.8	95.5	140.5	188.8	66	17.5	24.7	320	364.8	33.7	78.3	109.4	219.8	65.2	80.6	52.1	454.5	142.4	185.5
1997	633.8	1157.1	1248	650.1	607.6	596.4	303.4	505.4	471.1	348.8	328.3	529.3	236.2	526.9	340.8	965.5	1044.6	626.6	568.2
1998	164.2	162.7	717.3	139.9	32.9	65.7	50.4	308.7	186.2	30.6	123.5	63.2	74	7.7	232.21	9.8	394.4	66.2	206
1999	316	182.6	438.6	215.1	160.5	221.8	93.2	482.1	290.8	71.5	135.8	169.1	134.1	114.8	232.21	234.9	525.4	246	415.6
2000	299.6	206	416.9	297.2	223.3	112.8	51.9	389.8	438	288.9	255.6	468.1	359.2	335.9	470.6	215	576.9	324.4	346.2
2001	104.4	158.5	104.9	63.8	99.2	88.3	78.4	226.5	391.6	233.6	168.6	108.5	138.3	103	97.2	0	451.7	212.5	463.9
2002	263.2	509	515.1	287.4	266.5	333.4	227.3	321.7	334.4	145.8	422.7	411.4	286.6	189	289.2	246.2	611	423.4	503.3
2003	136.2	199.9	290.4	92.4	117.3	63.4	25.1	299.7	251.4	107	82	88.4	240.7	249.6	210.3	104.6	475.5	160.3	351.3
2004	340.6	432.8	606.6	416.4	138.4	151	132.5	350.4	612.5	159.7	732.2	750.6	374.1	279.5	161.7	327.6	469.9	229	551.2
2005	162.8	148.8	229.6	106.6	168.6	63.7	50.2	236.2	128.4	44.5	49.8	52.7	97.9	92.2	46.1	44	275.2	130.5	225.8
2006	549.4	540.8	717.9	457.1	526.1	456.8	323.2	492.3	565.9	371.1	424.3	155.8	482.3	184.1	494.1	306.8	789.1	370.6	694
2007	229.8	213.1	494	268.6	160.3	124.5	165.6	344.1	249.8	137.2	72.4	125.7	342	139.9	171.6	226.5	608.3	176.6	322.4
2008	223.5	122.2	396.1	260.7	111.8	67.7	96.3	371.2	327.8	133	267.3	182.1	237.7	147.6	240.9	256.3	457.5	274.1	390.2
2009	126.9	420.5	396.9	214.3	327.3	226.7	275.3	258.7	368.1	173.3	149.1	104.7	223.8	372.9	352.8	175.5	708.7	425.4	543
2010	134.4	128.7	358.1	106	129.2	68.2	112.2	318.8	215.4	110.8	97.6	140.6	161.4	123.6	161.6	123	368.6	193.9	307.5
2011	725.3	557.2	703.3	415.5	197.9	233	186.2	419.7	366	332	259.2	232.3	234	320.6	323.3	322.5	638.8	444.2	550.7
2012	191.6	184.1	415	139.7	355.4	208.5	136.1	387.3	291.6	223.8	69.2	217.4	254.6	186	244.6	165.2	528.9	250.2	614.3

2013	175.9	378.2	353.8	192	221.1	148.9	114.8	385.8	390.4	104.3	164	110.4	272.3	87.7	162.1	220.7	494.3	167.5	432.3
2014	94	311.9	578.1	149.9	321.2	77.5	103	368.2	389.8	305.3	194	75.3	286.9	185.5	345.5	355.5	580.9	223.6	441.2
2015	214.2	506.5	421.9	111.2	286.4	251.6	111.5	495.1	397.2	212.5	195.1	195	260.3	254.1	265	220.6	600.1	392.1	812.3
2016	75.9	200.7	292	86.1	113.2	32.8	38.8	337.9	186.8	81.3	157.5	78.5	98	11	125.1	108.6	346.3	176.7	222.3
2017	353.1	355.5	629.5	443.4	102.3	147.1	155.3	374	486.1	96.7	416.8	237.3	311.7	28.6	164.7	211.2	792.3	214.6	349.8
2018	161.6	416.4	319.2	227.8	234	140.8	137.1	337	267.6	90.7	156.1	207	156.1	161.1	287.3	156.6	441.1	280.9	398.1
2019	764.9	893.6	976	607.2	664.7	585	538	382.4	246.4	243	321.1	709.8	435	342.5	461.6	917.5	930.8	657.9	526.3
2020	525.8	378.9	579.2	441.7	240.1	94.3	108.4	218.9	594.3	187.3	372.3	232.6	211.1	182.9	312.9	318.6	585.1	269.9	343.9