



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: «Гидродинамическое моделирование и прогноз осадков на территории
Танзании»

Исполнитель

Абдалла Шафии Джума

(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)

«30» мая 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Описание территории исследования	7
1.1 Климат Танзании.....	8
1.2 Режим осадков в Танзании.....	9
2. Модель исследования и прогнозирования погоды (WRF-ARW).....	11
2.1 Уравнения, используемые в модели WRF-ARW	12
2.2 Алгоритм предобработки модели WRF-ARW	13
2.3 «Физика» модели WRF-ARW	15
3. Методология проведения численных экспериментов.....	26
3.1 Выбор домена	26
3.2 Конфигурация домена	27
3.3 Данные, используемые в исследовании.....	27
3.4 Метод оценки результатов прогноза.....	29
4. Результаты моделирования и их анализ	31
4.1 Верификация результатов с использованием матрицы сопряженности.....	39
4.1.1 Пример матрицы сопряженности.....	39
4.1.2 Используемые для анализа индексы.....	40
4.2 24 часа заблаговременность.....	42
4.2.1 Матрицы сопряженности для влажного сезона.....	42
4.2.2 Матрицы сопряженности для влажного сезона.....	46
4.2.3 Значение B	52
4.2.4 Значение POD	53
4.2.5 Значение FAR	54
4.2.6 Матрицы сопряженности для сухого сезона.....	57
4.2.7 Матрицы сопряженности для сухого сезона.....	62
4.2.8 Значение B	67
4.2.9 Значение POD	68
4.2.10 Значение FAR	70

4.2.11 Выводы.....	74
4.3 9 суток заблаговременность.....	76
4.3.1 Матрицы сопряжённости для влажного сезона.....	76
4.3.2 Матрицы сопряжённости для влажного сезона.....	81
4.3.3 Значение B	87
4.3.4 Значение POD	88
4.3.5 Значение FAR	89
4.3.6 Матрицы сопряжённости для сухого сезона.....	91
4.3.7 Матрицы сопряжённости для сухого сезона.....	95
4.3.7 Значение B	99
4.3.8 Значение POD	100
4.3.9 Значение FAR	101
4.3.10 Выводы.....	103
Заключение	106
Список использованных источников	108
Приложение А – Скрипты – ARWpost.....	114
Приложение Б – Скрипты – GrADS.	115
Приложение В – Программа (Fortran).....	117
Приложение Г – Скрипты для изображения разности прогностических полей осадков.....	120
Приложение Д - Данные наблюдений на станциях.	122
Приложение Е – Прогностические поля осадков	126
Приложение Ж – Разница прогностических полей осадков.....	138

Введение

Искусство прогнозирования погоды зародилось, когда ранние цивилизации использовали повторяющиеся астрономические и метеорологические события для наблюдения за сезонными изменениями погоды. С формированием региональных и глобальных сетей метеорологических наблюдений в XIX и XX веках стало доступно больше данных для прогнозирования погоды с помощью наблюдений [5]. Прогнозы погоды предоставляют потребителям важнейшую информацию о предстоящей погоде. Существует множество различных методов прогнозирования погоды – от относительно простых наблюдений за небом до очень сложных численных моделей, выполняемых на компьютерах.

Численная модель атмосферы – это математическая модель, основанная на наборе полных (непреобразованных) уравнений, которые описывают все процессы в атмосфере. В современном мире численные модели атмосферы реализуются в виде компьютерных программ, результатами работы которых является информация для будущего времени в заданные моменты времени в заданных точках по горизонтали и высоте [8]. Полные уравнения (примитивные уравнения) – это набор нелинейных дифференциальных уравнений, которые используются для аппроксимации глобальных атмосферных условий и процессов.

Использование моделей численного прогнозирования возросло в последнее время и в значительной степени внедряется. Часто сегодня для прогнозирования погоды и климата и для изучения атмосферных процессов используется модель WRF [8]. Также предпринимаются широкомасштабные усилия по повышению точности моделей в прогнозировании температуры, влажности, ветра, характеристик дождя и других погодных переменных.

Хотя в области прогнозирования температуры, ветра, влажности и других параметров наблюдается значительный рост.

Количественное прогнозирование осадков остается одной из самых сложных переменных для прогнозирования из-за низкого уровня доверия к результатам прогнозирования осадков [10]. Ошибки прогноза осадков вызваны ошибками, возникающими в наблюдениях и в самих моделях [11]. Модель не может адекватно представить многие параметры и детали процессов, происходящих при выпадении осадков.

Поскольку деятельность человека и многие отрасли промышленности в мире по-разному подвержены влиянию погоды и климата – некоторые зависят от средних условий, в то время как другие чувствительны к экстремальным, третьи могут зависеть от изменчивости, то прогнозы погоды и климата очень важны.

Танзания - большая страна. Основа экономики – сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность, сильно развит туризм. Планирование экономической деятельности должно привести к быстрому развитию страны. Для планирования необходим точный прогноз погоды, особенно осадков, от количества которых зависит и экономика и благополучие населения.

Цель данного исследования: Создание системы гидродинамического прогноза осадков для Танзании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Адаптация модели WRF-ARW для моделирования осадков на территории Танзании.
- Проведение численных экспериментов с моделью для влажного сезона (апреля 2019 года) и сухого сезона (июня 2019 года).
- Оценка влияния параметризации конвекции на прогноз осадков во влажный сезон и сухой сезон.

- Сравнение результатов модели для сухого и влажного сезонов (с параметризацией конвекции и без нее).

- Верификация результатов модели для сухого и влажного сезонов (с параметризацией конвекции и без нее).

- Выработка рекомендаций для моделирования осадков в Танзании.

Магистерская диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения.

Во введении рассматривается актуальность темы исследования, определяется цель и формулируются задачи.

В первой главе описан климат территории исследования – Танзании.

Вторая глава посвящена краткому описанию используемой в исследовании мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW.

В третьей главе описана методология проведения численных экспериментов по моделированию осадков на территории Танзании.

Четвёртая глава посвящена анализу результатов и формулировке рекомендаций по использованию модели WRF-ARW для оперативного прогноза осадков в Танзании.

В приложениях приведены поля метеорологических величин и программные продукты, разработанные в процессе исследований в рамках ВКР.

Список использованных источников содержит 51 наименование.

1. Описание территории исследования

Танзания, официально Объединенная Республика Танзания, это страна, расположенная полностью к югу от экватора в Восточной Африке в районе Африканских Великих озер. Она расположена между широтами 0° и 12° к югу от экватора и долготами 28° и 42° к востоку от основного меридиана [12]. На севере граничит с Угандой, на северо-востоке – с Кенией, на востоке - с Индийским океаном, на юге – с Мозамбиком и Малави, на юго-западе – с Замбией, на западе – с Руандой, Бурунди и Демократической Республикой Конго. Географическое расположение Республики Танзания представлено на рисунках 1.1 и 1.2.



Рисунок 1.1 – Расположение Танзании в Африке

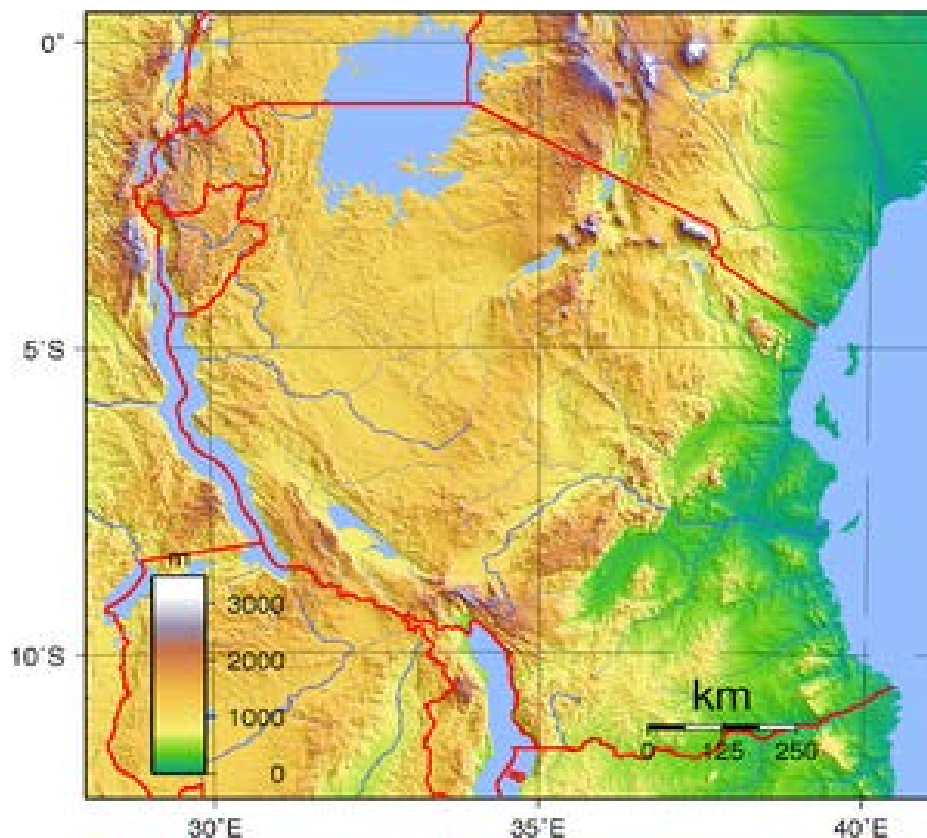


Рисунок 1.2 – Особенности рельефа в Танзании

1.1 Климат Танзании

Танзания имеет тропический климат и делится на четыре основные климатические зоны;

- жаркая влажная прибрежная равнина,
- полузасушливое центральное плато,
- районы озер с высоким уровнем осадков,
- умеренное высокогорье.

Температура по всей территории страны обычно характеризуется относительно небольшими колебаниями в течение года. Средняя многолетняя годовая температура на различных станциях страны колеблется от 14,4 °C до 26,4 °C. Регионы с наиболее высокими значениями температуры воздуха находятся вдоль побережья и в западной части страны.

Сезон с высокими температурами начинается с октября и продолжается до февраля или марта, в то время как холодный сезон длится с мая по август.

Годовая минимальная температура воздуха ($T_{\min}$) и максимальная температура воздуха ($T_{\max}$) на всех станциях колеблется от 9,6 °C до 22 °C и от 19,1 °C до 30,7 °C, соответственно [12].

1.2 Режим осадков в Танзании

Распределение и изменчивость осадков определяются множеством факторов, включая;

- Восточно-Африканский муссон,
- южное колебание Эль-Ниньо (ENSO);
- западные ветры из Конго,
- тропические циклоны;
- внутритропическая зона конвергенции (ВЗК).

Миграция ВЗК на север и миграция ВЗК на север и юг через экватор являются одними из основных факторов, влияющих на распределение и изменчивость осадков в Танзании и во всей Восточной Африке. Миграция ВЗК над регионом опаздывает по отношению к перемещению солнца на 3-4 недели. ВЗК мигрирует в южные регионы Танзании в октябре по декабрь, достигает южной части страны в январе-феврале и поворачивает обратно в северном направлении в марте, апреле и мае.

Вследствие этого движения в некоторых районах наблюдаются однократные и двойное прохождение ВЗК. От количества прохождения ВЗК над Танзанией зависит и режим осадков. Районы, в которых наблюдается однократное прохождение, известны как унимодальные районы. К ним

относятся южная, юго-западная, центральная и западная части страны, где осадки выпадают с ноября по апрель или май.

Районы, где наблюдается двойное прохождение, известны как бимодальные, и включают северное побережье, северо-восточное нагорье, бассейн озера Виктория и острова Занзибар (Унгуджа и Пемба). В этих регионах наблюдаются два различных сезона дождей. Сезон продолжительных дождей (также известный как Masika), который начинается в основном в марте и продолжается до мая и сезон коротких дождей (также называемый Vuli), который начинается в октябре и продолжается до декабря. Январь и февраль являются переходным периодом (относительно сухим) для бимодальных, в то время как июнь, июль, август и сентябрь являются сухими месяцами для всей страны [14]. Распределение регионом с уни- и бимодальным режимом осадков представлен на рисунке 1.3.

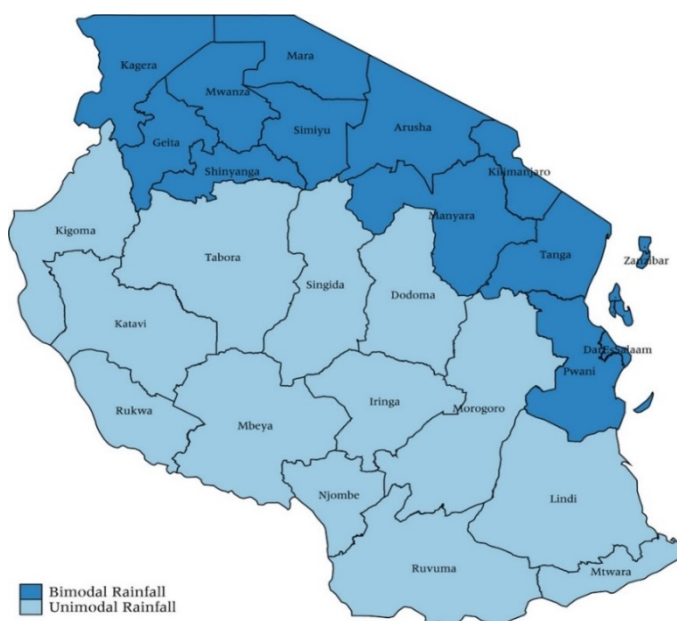


Рисунок 1.3 - Карта Танзании, показывающая бимодальные и унимодальные регионы [15]

2. Модель исследования и прогнозирования погоды (WRF-ARW)

Модель исследования и прогнозирования погоды (WRF) - это система численного прогнозирования погоды (NWP), которая была разработана для проведения атмосферных исследований и оперативного прогнозирования [8].

Модель WRF может производить моделирование на основе фактических атмосферных условий (т.е. на основе наблюдений и результатов объективного анализа) или от идеализированных условий, что обеспечивает платформу для оперативного прогнозирования, которая является гибкой и надежной для решения сложных и трудных задач в науке об атмосфере, включая оценку и прогноз осадков [16].

Модель WRF учитывает современные достижения в области физики, численных методов и ассимиляции данных, внесенные многими разработчиками исследовательского метеорологического модельного сообщества. Модель WRF широко используется для исследований и прогнозирования в реальном времени по всему миру. Многими исследованиями было показано, что WRF хорошо работает при моделировании атмосферной конвекции, которая в значительной степени связана с осадками в Танзании.

Модель WRF состоит из трёх основных наборов уравнений:

- Уравнения сохранения импульса,
- Уравнения тепловой энергии,
- Уравнения непрерывности [16].

Атмосфера представляет собой жидкость. Основная идея численного прогнозирования погоды заключается в том, чтобы взять образец состояния жидкости в определенный момент времени и использовать уравнения гидродинамики и термодинамики для оценки состояния жидкости в какой-то момент в будущем.

2.1 Уравнения, используемые в модели WRF-ARW

Уравнение состояния:

$$P = \rho R_d T \quad (2.1)$$

Уравнение неразрывности (закон сохранения массы):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Уравнения движения (закон сохранения импульса):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + C_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial x} = \frac{\partial Uu}{\partial x} + \frac{\partial Vu}{\partial y} + \frac{\partial Wu}{\partial z} + F_x \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + C_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial y} = \frac{\partial Uv}{\partial x} + \frac{\partial Vv}{\partial y} + \frac{\partial Wv}{\partial z} + F_y \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + C_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial z} + g\rho = \frac{\partial Uw}{\partial x} + \frac{\partial Vw}{\partial y} + \frac{\partial Ww}{\partial z} + F_z \quad (2.5)$$

Уравнение притока тепла (закон сохранения энергии):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} = \rho Q \quad (2.6)$$

где

U, V и W — составляющие скорости вдоль осей x, y и z ,

T — абсолютная температура;

ρ — плотность воздуха;

θ — потенциальная температура;

$$\pi = (P/P_0)^{R_d/C_p}$$

C_p	–	удельная теплоемкость при постоянном давлении;
R_d	–	универсальная газовая постоянная для сухого воздуха;
F_x, F_y и F_z	–	составляющие трения в направлениях x, y и z;
Q	–	источник тепла.

2.2 Алгоритм предобработки модели WRF-ARW

После выбора области моделирования и настройки модели при каждом запуске (прогнозе) необходимо выполнение нескольких этапов предпроцессинга, которые заключаются в следующем:

`geogrid.exe` – определяет домен модели и интерполирует статические географические данные на сетку (сетки) модели.

`ungrib.exe` – извлекает конкретные метеорологические поля на изобарических поверхностях за период моделирования (с выбранной дискретностью) из наборов данных GRIB2 или GRIB1 (GRIdded Binary или General Regularly Distributed Binary). Эти данные используются для постановки начальных и граничных условий.

`metgrid.exe` – интерполирует по горизонтали метеорологические поля, извлеченные с помощью `ungrib`, на сетку (сетки) модели, определенные с помощью `geogrid`.

`real.exe` - интерполирует входные данные из вертикальных координат родительской модели на вертикальные координаты WRF и создает файлы начальных и граничных условий на вертикальной сетке WRF, соответствующей рельефу местности.

Общая схема препроцессинга представлена на рисунке 2.1.

wrf.exe – считывает данные из подготовленных файлов начальных и граничных условий и реализует вычислительный алгоритм модели. Это и есть программный код (выполняемый) модели.

Каждая программа WPS (WRF Pre-processing System) считывает параметры из общего файла namelist (таких файлов несколько для каждого этапа препроцессинга).

Файл namelist имеет отдельные записи для каждого этапа предобработки и общие записи namelist, которые определяют параметры, используемые более чем одной программой WPS.

GRIB (бинарный формат записи сеточных данных) - это математически сжатый формат данных, обычно используемый в метеорологии для хранения исторических и прогностических данных об атмосфере [16].

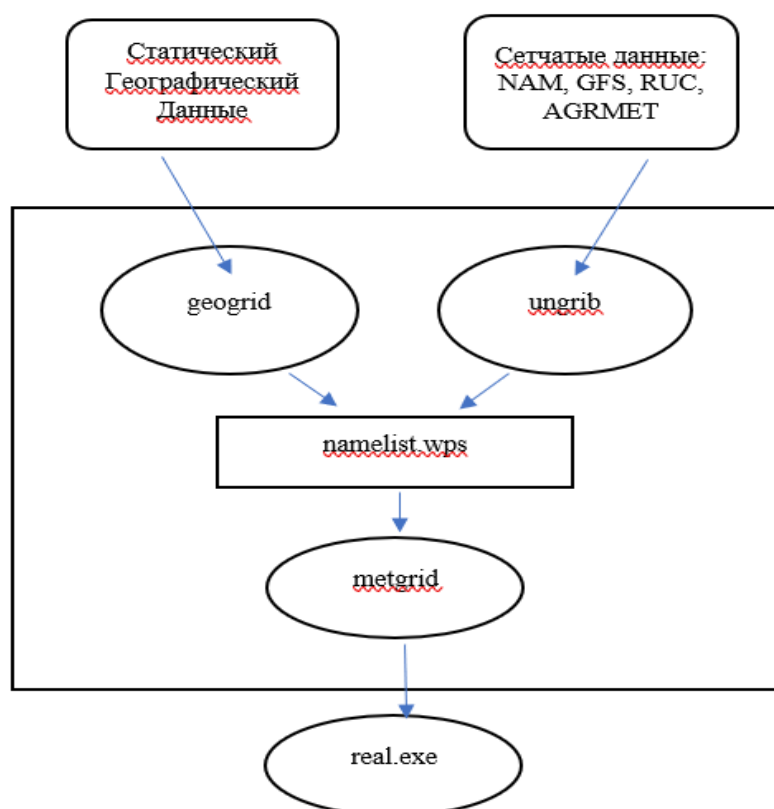


Рисунок 2.1 - Система предобработки WRF (WPS)

2.3 «Физика» модели WRF-ARW

Модель WRF- ARW имеет множество вариантов описания физических процессов – схем параметризации физических процессов, которые могут быть изменены для точной настройки модели в соответствии с условиями решаемых задач и регионом исследования. Микрофизика, кучевые облака, поверхность земли, схема пограничного слоя и схема атмосферного излучения – это различные физические процессы («физика»), параметризация которых доступна в модели WRF. Каждая из этих схем параметризации содержит различные опции, которые могут быть выбраны в соответствии с местными условиями.

2.3.1 Схемы параметризации микрофизики

Kessler Scheme - option 1: В схеме рассматривается сохранение и распространение влаги в соответствии с циркуляцией атмосферы в рамках выполнения принципов неразрывности, модельных воздушных потоков и моделей микрофизических процессов. Реализовано простейшее рассмотрение осадков, которое предполагает их вертикальное распределение в восходящем потоке, где конденсат появляется сразу в виде осадков с равномерной конечной скоростью падения. Схема рассматривает устойчивые двумерные циркуляции воздуха, в которых зависящие от времени распределения водяного пара, облаков и осадков реагируют на модельные микрофизические процессы [17].

Stony–Brook University Scheme - option 13: В этой схеме рассматриваются процессы с твёрдой фазой воды – льдом. Включено рассмотрение спектра частиц от простых кристаллов («голых») до частиц покрытых изморозью и крупы. Используется одна переменная – осаждающийся лёд. Микрофизика льда учитывает как температурные эффекты, так и влияние изморози на свойства льда.

Эта схема позволяет физически представить частицы льда с зависящими от температуры и интенсивности изморози свойствами, такими как масса, площадь поперечного сечения и отношения скоростей падения [18].

WRF Single-moment 3-class and 5-class Schemes - options 3 & 4. В схеме рассмотрены облачные микрофизические процессы с учётом свойств облачного льда. Для более реалистичного моделирования некоторых ледовых микрофизических процессов вводится несколько модификаций льда. В дополнение к предположению, что концентрация числа ледяных ядер является функцией температуры, было разработано новое и отдельное предположение, в котором концентрация ледяных кристаллов является функцией количества льда. Были введены изменения в микрофизике льда, а также исследовано влияние седиментации кристаллов льда [19].

Thompson Scheme - option 8. В этой схеме рассматривается спектр разнообразных облачных частиц. Предполагаемое распределение размеров частиц снега зависит от содержания замёрзшей воды и от температуры и представлено в виде суммы экспоненциального и гамма-распределений. Кроме того, частицы снега принимают несферическую форму с объемной плотностью, которая изменяется обратно пропорционально диаметру, что подтверждается наблюдениями и противоречит почти всем другим объемным параметризациям, которые предполагают сферический снег с постоянной плотностью. Категория снега в новой схеме была модифицирована, чтобы соответствовать необходимости проверки характеристик сферичности и формы распределения. В схеме предположения о сферичности и постоянной плотности играют основную роль в образовании переохлажденной жидкой воды, тогда как предполагаемая форма распределения играет меньшую, но незначительную роль [20].

Morrison 2-moment Scheme - option 10. Эта схема включена в модель в 2009 год, она является двухмоментной схемой параметризации

микрофизики облаков, рассматривающая отношения смеси и концентрации пяти видов гидрометеоров (облачные капли, облачный лед, снег, дождь и крупа). Эта схема используется для исследования формирования и эволюции ливневых осадков из слоистых облаков, осадков в идеализированной двумерной линии шквалов. Общая структура шторма похожа на используемую в одномоментной или двухмоментной схемах, хотя есть и заметные различия. Двухмоментная схема (2-M) приводит к образованию широко распространенной области ливневых осадков из слоистых облаков в течение нескольких часов после формирования шторма. В отличие от этого, при использовании одномоментной (1-M) схемы выпадение этих форм осадков пренебрежимо мало [21].

2.3.2 Схемы параметризации конвекция

Конвекция играет важную роль в определении поведения погодных и глобальных климатических систем. Однако для моделей прогнозирования погоды и климата физические процессы, связанные с конвекцией, происходят на масштабах, которые в большинстве ситуаций не могут быть разрешены моделями. Представление эффектов конвекции в численных моделях известно как параметризация конвекции, которая имеет фундаментальное значение в науке об атмосфере [2].

Доступные в WRF схемы параметризации конвекции:

Kain–Fritsch Scheme - option 1. Это схема параметризация на основе описания потоков массы. Она использует метод частиц Лагранжа [50], включая уравнение движения для вертикальной скорости [49], чтобы оценить, существует ли неустойчивость, станет ли любая существующая неустойчивость достаточной для роста облаков, и каковы могут быть свойства любых конвективных облаков.

Схема KF была разделена на три части:

конвективная триггерная функция (которая определяет потенциальные слои-источники конвективных облаков, т.е. слои-источники восходящих движений),

определение потоков масс (представляет собой стационарную модель втока-вытока, где описывается вовлечение в потоки масс, влияние этих процессов на эквивалентно потенциальную температуру и водяной пар,

предположения о замыкании (перераспределяет массу в столбе воздуха, используя восходящие, нисходящие потоки, потоки окружающей среды до тех пор, пока не будет удалено по крайней мере 90% конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE)) [22].

Betts–Miller–Janjic Scheme option 2: В схеме постулируется, что режимы глубокой конвекции характеризуются параметром, называемым облачной эффективностью. В схеме время релаксации увеличивается при низкой эффективности облаков и наоборот. Также постулируется, что существует диапазон эталонных равновесных состояний, и конкретное эталонное состояние выбирается в зависимости от эффективности облаков. В случае небольших конвективных облаков эталонная влажность определена, исходя из требования, чтобы изменение энтропии было неотрицательным. Турбулентная кинетическая энергия инициализируется сверху в планетарном пограничном слое так, чтобы избыточная турбулентная кинетическая энергия рассеивалась [23].

Old Kain–Fritsch Scheme - option 99: В схеме представлена одномерная модель облака, предназначенная для применения в схемах параметризации мезомасштабной конвекции. В ней уникально представлены скорости вовлечения окружающего воздуха и удержания восходящего потока. Двусторонний обмен массой между облаками и окружающей средой моделируется на каждом вертикальном уровне механизмом сортировки плавучести на границе чистого и облачного воздуха. Новая схема поднятия/осаждения позволяет физически реалистично варьировать

вертикальные профили удержания влаги в восходящем потоке и вертикальной массы в восходящем потоке, как функцию среды в масштабе облака. Эта схема позволяет параметризовать вертикальное распределение конвективного нагрева и высыхания в гораздо большей степени в зависимости от условий окружающей среды, чем это возможно при использовании традиционной одномерной модели [24].

2.3.3 Схемы параметризации взаимодействия с подстилающей поверхностью

Схемы описания процессов на поверхности земли имеют различную степень сложности в определении потоков тепла и влаги через многочисленные слои почвы, могут учитывать влияние растительности, корней, растительного полога и прогнозировать поверхностный снежный покров. Основным элементом взаимодействия между землей и атмосферой является обмен влагой и энергией между двумя системами.

В модели WRF доступны следующие схемы параметризации земной поверхности:

5-layer Thermal Diffusion Scheme - option 1. Эта схема обеспечивает расчёт температуры почвы при минимальных вычислительных затратах, как по времени обработки, так и по оперативной памяти. В принципе, можно задать любое количество уровней в почве и их толщину, но в схеме используется пять слоев с толщиной сверху вниз 1, 2, 4, 8 и 16 см. Ниже нижнего уровня, на уровне 31 см, температура почвы поддерживается постоянной в слое толщиной 32 см. Схема была сравнена со 100-слойной моделью с разрешением 1 см и дала близко согласующиеся результаты в одномерном тесте [25].

Noah-MP Land Surface Model - option 4. Модель поверхности земли Noah, своими математическими формулировками повысила концептуальный реализм в биофизических и гидрологических процессах, представила основу

для множества вариантов параметризации выбранных процессов (Noah-MP). Повышенный концептуальный реализм в модели включает: энергетический баланс растительного полога, слоистый снежный покров, мерзлую почву и инфильтрацию, взаимодействие почвенной влаги и грунтовых вод и соответствующее производство стока, а также фенологию растительности. Noah-MP демонстрирует очевидные улучшения в воспроизведении поверхностных потоков, температуры почвы в сухие периоды, водного эквивалента снега, высоты снежного покрова и стока по сравнению с моделью поверхности земли Noah версии 3.0. Noah-MP улучшил моделирование водного эквивалента снега благодаря более точному моделированию суточных колебаний температуры снежного покрова, что очень важно для расчета доступной энергии для таяния. Noah-MP также улучшает моделирование пиков и времени стока за счет введения более проницаемой мерзлой почвы и более точного моделирования таяния снега [26].

Community Land Model Version 4 (CLM4) - option 5. Показывает значительный прогресс в моделировании суши для устранения недостатков в смещении модели. Изменения в параметризации и структуре модели обширны и включают обновления гидрологии почвы, термодинамики почвы, модели снега, параметров альбедо, набора данных о типах поверхности земли и модели речного переноса, а также ряд других незначительных модификаций. Модель была расширена моделью углеродного и азотного цикла, включающей прогностическую фенологию растительности, возможность применения переходных изменений земного покрова и землепользования, а также новую модель городских каньонов, позволяющую изучать влияние изменения климата на городские территории и городской остров тепла [27].

Минимальные требования к разрешению для усовершенствованной модели поверхности земли - не менее двух почвенных слоев и одного слоя

полога. Это связано с тем, что верхний тонкий слой почвы быстрее реагирует на суточный цикл, в то время как более глубокий слой контролирует сезонные изменения.

2.3.4 Схемы параметризации пограничного слоя

Тропосферу можно разделить на две части – планетарный пограничный слой (ППС), простирающийся вверх от подстилающей поверхности на высоту от 100 до 3000 м, и слой над ним. Пограничный слой напрямую зависит от наличия поверхности Земли, реагируя на такие силы, как трение, солнечный нагрев и испарение. Каждая из этих сил порождает турбулентность или вихри, которые могут быть такими же глубокими, как и сам пограничный слой. Поэтому рассмотрение этих процессов имеет большое значение.

Модель WRF включает следующие схемы параметризации ППС:

Yonsei University Scheme (YSU) - option 1: В данной схеме был пересмотрен пакет описания вертикальной диффузии с нелокальным турбулентным коэффициентом перемешивания в планетарном пограничном слое (ППС). Основным элементом пересмотра является включение явного описания процессов вовлечения в верхней части ППС, при этом новый пакет диффузии был назван *Yonsei University PBL (YSU PBL)*. Пересмотренная схема улучшила несколько характеристик по сравнению с реализацией Хонга и Пана. YSU PBL увеличивает перемешивание пограничного слоя в режиме термически вызванной свободной конвекции и уменьшает его в режиме механически вызванной вынужденной конвекции.

В этой схеме был разработан пересмотренный алгоритм вертикальной диффузии, который подходит для моделей прогноза погоды и климата [28].

Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ) - option 2. Схема предназначена для поверхностного слоя с динамическим турбулентным слоем глубиной несколько метров у поверхности Земли. Поверхностные процессы, рассматриваются в соответствии с концепциями Миякоды и Сирутуса [51], описывающими диффузию с использованием схем четвертого порядка с коэффициентом диффузии, зависящим от деформации и турбулентной кинетической энергии. Конвективные крупномасштабные осадки с испарением, слегка модифицированные схемы глубокой и мелкой конвекции, предложенные Беттсом и Миллером (1986) [29].

MRF Scheme - option 99. В схеме коэффициенты диффузии параметризуются как функция локального числа Ричардсона. Схема широко использовалась для численных моделей атмосферы из-за дешевизны вычислений и получения приемлемых результатов при типичных атмосферных условиях. Схема имеет много недостатков, и наиболее критичным является то, что перенос массы и импульса в планетарном пограничном слое в основном осуществляется крупными вихрями и такие вихри должны определяться объемными свойствами планетарного пограничного слоя, а не локальными свойствами [30].

2.3.5 Схемы параметризации длинноволнового и коротковолнового излучения

Как и другие модели прогноза погоды, модель WRF учитывает влияние радиации при составлении прогнозов. В модели WRF используются два типа отдельных схем для описания распространения радиации – одна для коротковолнового излучения, другая для длинноволнового.

Эти схемы излучения можно варьировать, чтобы увидеть влияние радиации на прогнозы осадков.

Кроме того, модель описывает другие явления, такие как;

- отражение радиации облаками и поверхностью Земли,

- рассеяние радиации облаками и аэрозолями,
- переизлучение длинноволновой радиации озоном.

Основой схем описания распространения длинноволновой и коротковолновой радиации является расчет радиации на каждом уровне модели, включая длинноволновое излучение, коротковолновое отражение, поглощение и баланс, что на каждом уровне приводит к радиационному нагреву (или остыванию). Для коротковолнового излучения рассматривается только нисходящие потоки, но имеет важное значение угол наклона солнечных лучей. Для длинноволнового излучения оцениваются как восходящие, так и нисходящие потоки.

Примерами схем параметризации коротковолнового излучения являются:

Dudhia Shortwave Scheme - sw option 1. В схеме нисходящая компонента потока коротковолновой радиации оценивается с учетом влияния зенитного угла солнца, который уменьшает нисходящую компоненту и увеличивает длину пути. Рассматривается распространение коротковолновой радиации с учётом облаков, которые имеют альбедо и поглощение, и при ясном небе, в котором происходит рассеяние радиации и её поглощение водяным паром. Солнечные и инфракрасные потоки на поверхности, рассчитанные по атмосферным радиационным схемам, используются при расчёте энергетического бюджета поверхности суши [31].

Goddard Shortwave Scheme - sw option 2. В схеме представлена подробная параметризация для теплового инфракрасного радиационного переноса, разработанная специально для использования в глобальной климатической модели. Схема включает эффекты основных поглотителей земного излучения (водяной пар, углекислый газ и озон). Схема очень точно рассчитывает потоки при ясном небе и скорость охлаждения от поверхности Земли до 0,01 гПа. Поскольку характеристики пропускания не вычисляются заранее, слои атмосферы и вертикальное распределение поглотителей могут

быть заданы произвольно. Схема также учитывает любое вертикальное распределение балла облачности с произвольной оптической толщиной [32].

Пример схем длинноволнового излучения:

RRTM Longwave Scheme - lw option 1. Быстрая и точная схема модели радиационного переноса (RRTM) рассчитывает потоки и скорости охлаждения для длинноволновой области спектра для атмосферы произвольной прозрачности. Рассматривается излучение таких составных частей атмосферы как водяной пар, углекислый газ, озон, метан, закись азота и распространенные галоид углеводороды. Радиационный перенос в схеме осуществляется с помощью метода корреляции k . Достигается k -распределение, которое связывает коэффициенты поглощения, используемые в RRTM, с проверками излучения высокого разрешения, выполненными с помощью наблюдений. В схеме были разработаны уточненные методы для обработки полос, содержащих газы с перекрывающимся поглощением, для определения значений функции Планка, подходящих для использования в подходе корреляции k , и для включения в полосу незначительных поглощающих видов [33].

В ВКР использовались параметризации, номера которых для управляющего файла `namelist.input` приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Список опций параметризаций физических процессов, используемых при моделировании в данном исследовании

Схемы параметризации	
mp_physics	6
cu_physics	1
bl_pbl_physics	1
ra_lw_physics	1
ra_sw_physics	1
num_soil_layers	4
sf_surface_physics	2
sf_sfclay_physics	1
sf_urban_physics	0
radt	10
cudt	5
isfflx	1
ifsnow	0
icloud	1
bldt	0

3. Методология проведения численных экспериментов

3.1 Выбор домена

Выбор достаточно хорошей конфигурации области и периода прогнозирования очень важен. Более «тонкое» пространственное разрешение может улучшить качество прогноза, но увеличит время расчёта и требования к мощности компьютера. Поэтому в исследовании необходимо учитывать здоровый баланс между точностью и вычислительными затратами. Для получения приемлемой аппроксимации осадков была выбрана подходящая конфигурация одного домена, как показано ниже. Выбранная область моделирования представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Выбранный домен.

3.2 Конфигурация домена

Прогнозирование погоды должно осуществляться как можно точнее, поэтому для получения прогноза необходимо выбрать правильную и подходящую конфигурацию. Конфигурация модели WRF представлена в таблице 1 ниже.

Таблица 3.1 – Конфигурация модели WRF-ARW.

Характеристика	Конфигурация
Количество доменов	1
Количество узлов	350 по долготе и 300 по широте
Шаг сетки по горизонтали	5 км
Количество уровней по вертикали	35
Заблаговременность прогнозов	216 часов (9 дней)
Проекция	Меркатор
Шаг по времени	30 секунд

3.3 Данные, используемые в исследовании

Для инициализации и постановки боковых граничных условий в адаптированной к целям исследований модели WRF-ARW использованы данные Национального центра по окружающей среде (NCEP) в формате GRIB2.

Это данные расчётов глобальной модели GFS, которая работает в режиме реального времени и результаты моделирования которой с дискретность четыре раза в день (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC) на следующие девять дней доступны для скачивания на сайте [<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/dataaccess/>]. Используемые для постановки начальных и граничных условий данные имеют пространственное разрешение $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ км и 26 высотных уровней [15].

Для верификации прогнозов были использованы данные наблюдений на станциях, указанных в таблице 3.2. Данные были получены от Метеорологического управления Танзании.

Таблица 3.2 – Станции, данные которых использованы в исследовании.

Название станции	Высота (м)	Широта (°)	Долгота (°)
Букоба	1153	-1.3	31.8
Дар-эс-Салаам	55	-6.9	39.2
Додома	1117	-6.2	35.8
Иринга	1418	-7.6	35.8
Килиманджаро	893	-3.4	37.1
Кигома	822	-4.9	29.7
Мтвара	113	-10.4	40.2
Мусома	1160	-1.5	33.8
Мванза	1147	-2.5	32.9
Сонгеа	1050	-10.7	35.6
Морогоро	510	-6.8	37.6
Табора	1179	-5.1	32.8
Занзибар	16	-6.2	39.2
Сумбаванга	1816	-7.6	31.6

Расположение станций, информация с которых используется в исследовании, представлено на рисунке 3.2

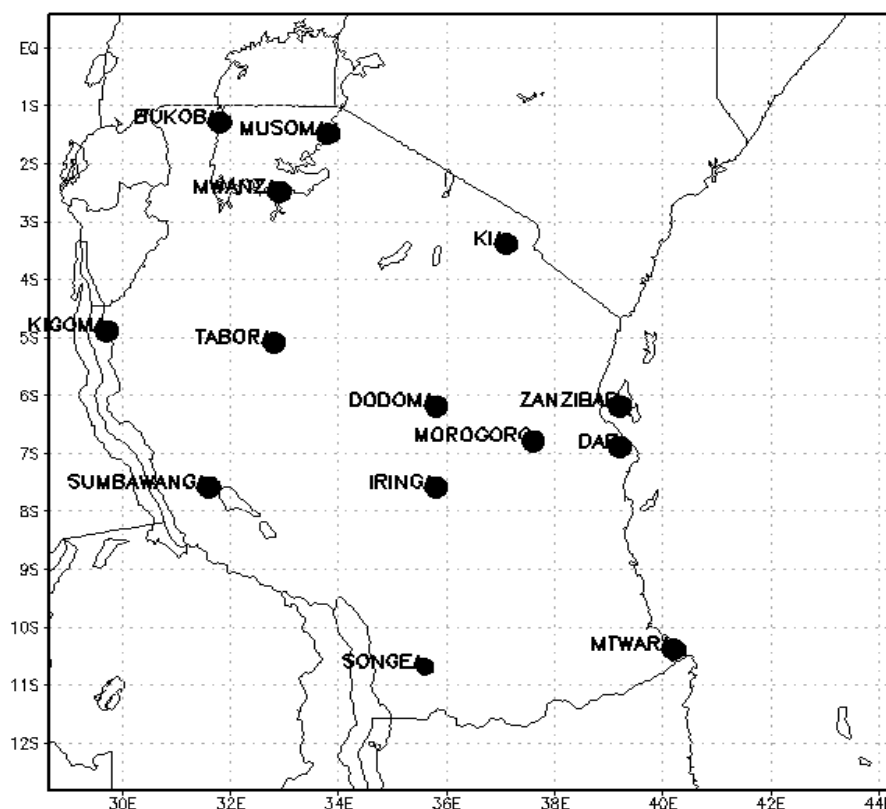


Рисунок 3.2 – Расположение станций на исследуемой территории

3.4 Метод оценки результатов прогноза

Модель WRF-ARW в описанной конфигурации запускалась каждый день в течение апреля и июня 2019 г. Рассматривался сухой (июнь) и влажный (апрель) сезоны. Заблаговременность общего прогноза 9 суток. Анализировалось количество осадков на 24 часов при прогнозе на 24 часов.

Поскольку горизонтальный шаг модели 5 км, то конвекция, которая определяет интенсивность осадков в тропической зоне, может быть и сеточным процессом и в этом случае должна описываться явно (уравнениями, без параметризации).

Поэтому были проведены две серии численных экспериментов – с параметризацией конвекции (Схема Каина-Фритша) и без параметризации конвекции.

Производилась оценка результата прогноза осадков отдельно в сухой и влажный периоды, с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции. Для обработки результатов использовались GrADS и программы на языке Фортран.

4. Результаты моделирования и их анализ

На рисунках 4.1 и 4.2 приведён пример прогностических полей осадков с параметризацией и без параметризации осадков для апреля 2019 года (влажный сезон). На всех полях сохраняется единая цветовая гамма.

Сравнивая прогностические поля, можно сделать вывод о том, что модель и без параметризации конвекции моделирует конвективные осадки, но, что естественно, в меньшем количестве регионов.

На рисунке 4.3 приведена разность прогностических полей с параметризацией и без параметризации конвекции.

Анализируя приведённые поля, можно сделать вывод о том, что на большей части территории включение схемы параметризации незначительно изменяет количество прогнозируемых осадков – разница составляет меньше 5 мм/12 часов. Значительные различия наблюдаются в горных регионах страны (северо-запад) и над океаном – до 50 мм/12 часов. Присутствует суточный ход различий – максимальные различия наблюдаются во второй половине дня (на представленных рисунках максимальные различия присутствуют в полях за 12 UTC, что соответствует 15 часам местного времени – времени максимальной конвективной деятельности)

На рисунках 4.4 – 4.6 приведены аналогичные поля для сухого сезона (Июнь 2019 года).

Вывод аналогичный – включение конвекции увеличивает суммы прогнозируемых осадков.

Июнь – сухой месяц на большей части исследуемой территории, но события с осадками были прогнозированы моделью в некоторых северных регионах (Мусома, Мванза, Кигома), Морогоро и Занзибаре.

Мусома, Мванза и Кигома, позднее перемещение внутритропической зоны конвергенции на север может быть связано с прогнозируемыми

осадками, но также причиной может быть наличие больших озер вблизи этих станций. Морогоро расположен недалеко от центра исследуемой территории, его ландшафт характеризуется большими горами. Занзибар - остров, окруженный Индийским океаном, суточные колебания и небольшие мезомасштабные особенности также могут быть связаны с прогнозируемым количеством осадков над территорией в сухой сезон.

Для сухого сезона различия в модельных результатах с параметризацией конвекции и без параметризации не превышают (на большей части территории) 5 мм/12 часов и, скорее всего, это значение можно связать с систематической ошибкой прогноза, которая возникает при избыточном описании конвективных процессов. Только в высокогорных регионах северо-запада есть несколько точек со значительными различиями и эти различия проявляются только в дневные часы.

В сухой сезон осадки прогнозируются в основном в высокогорных районах. Насколько эти результаты соответствуют действительности будет понятно при верификации результатов по данным наблюдений на станциях, которая будет описана в следующей главе.

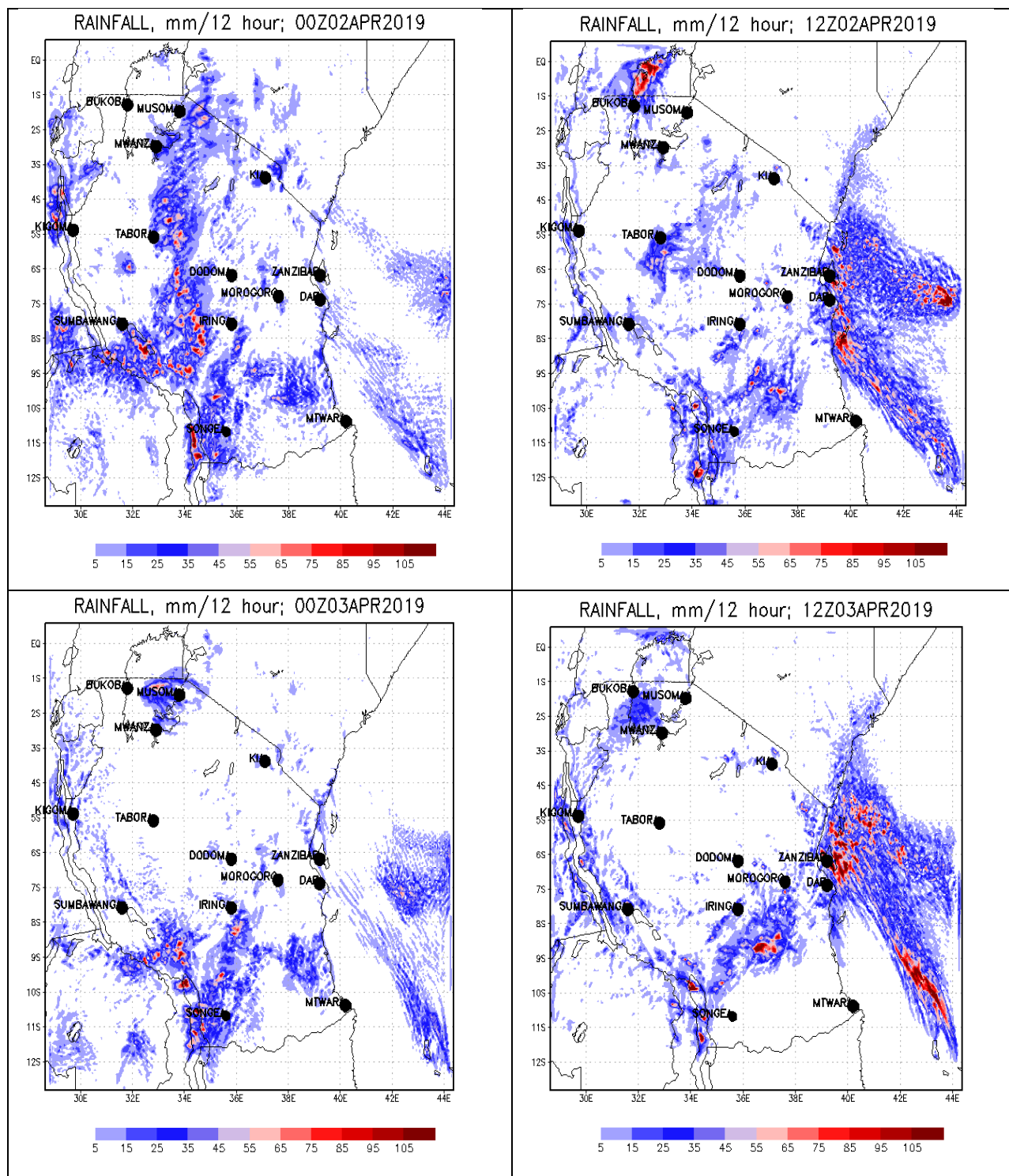


Рисунок 4.1 – Пример прогностических полей осадков, апрель 2019 года с параметризацией конвекции.

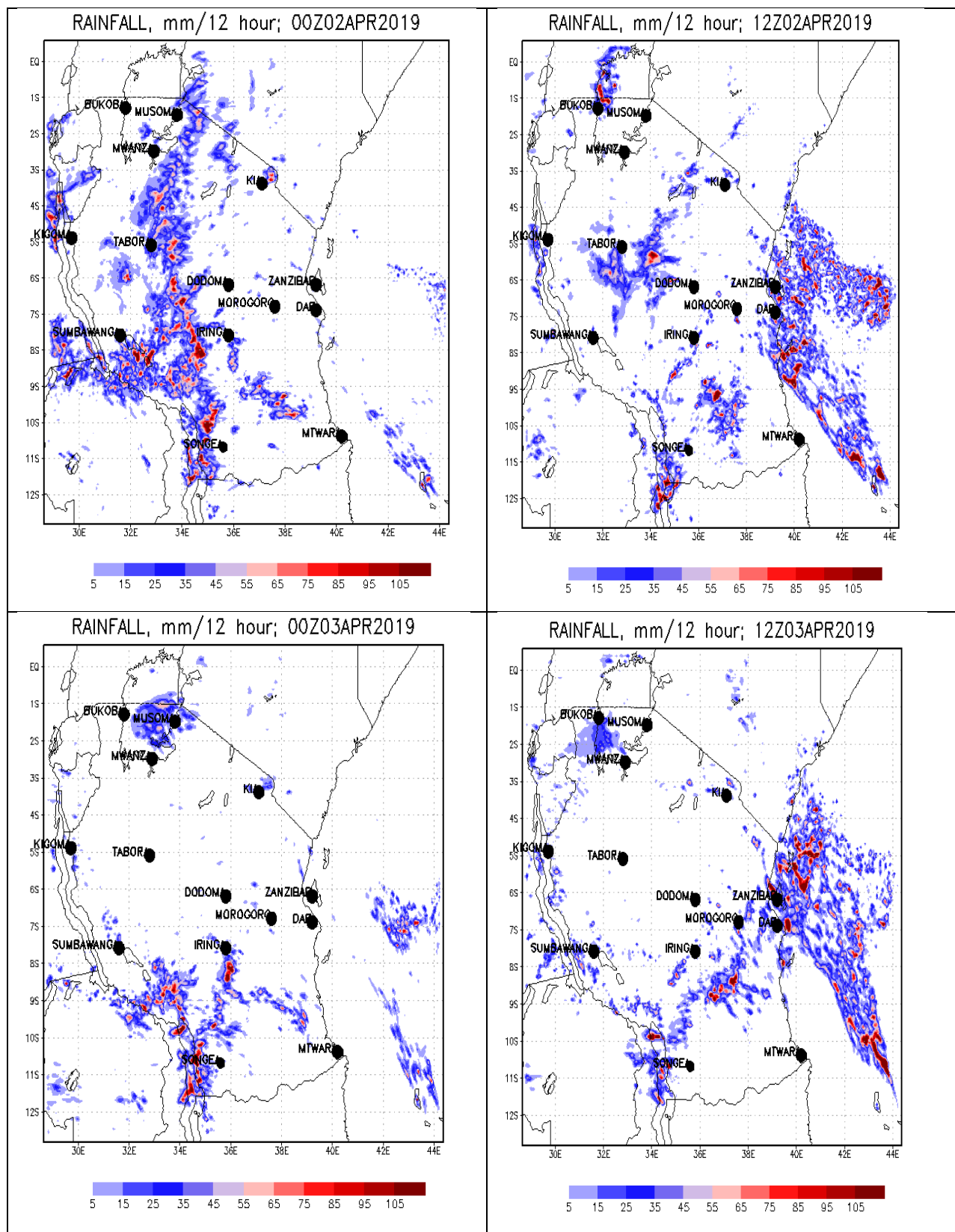


Рисунок 4.2 – Пример прогностических полей осадков, апрель 2019 года без параметризации конвекции.

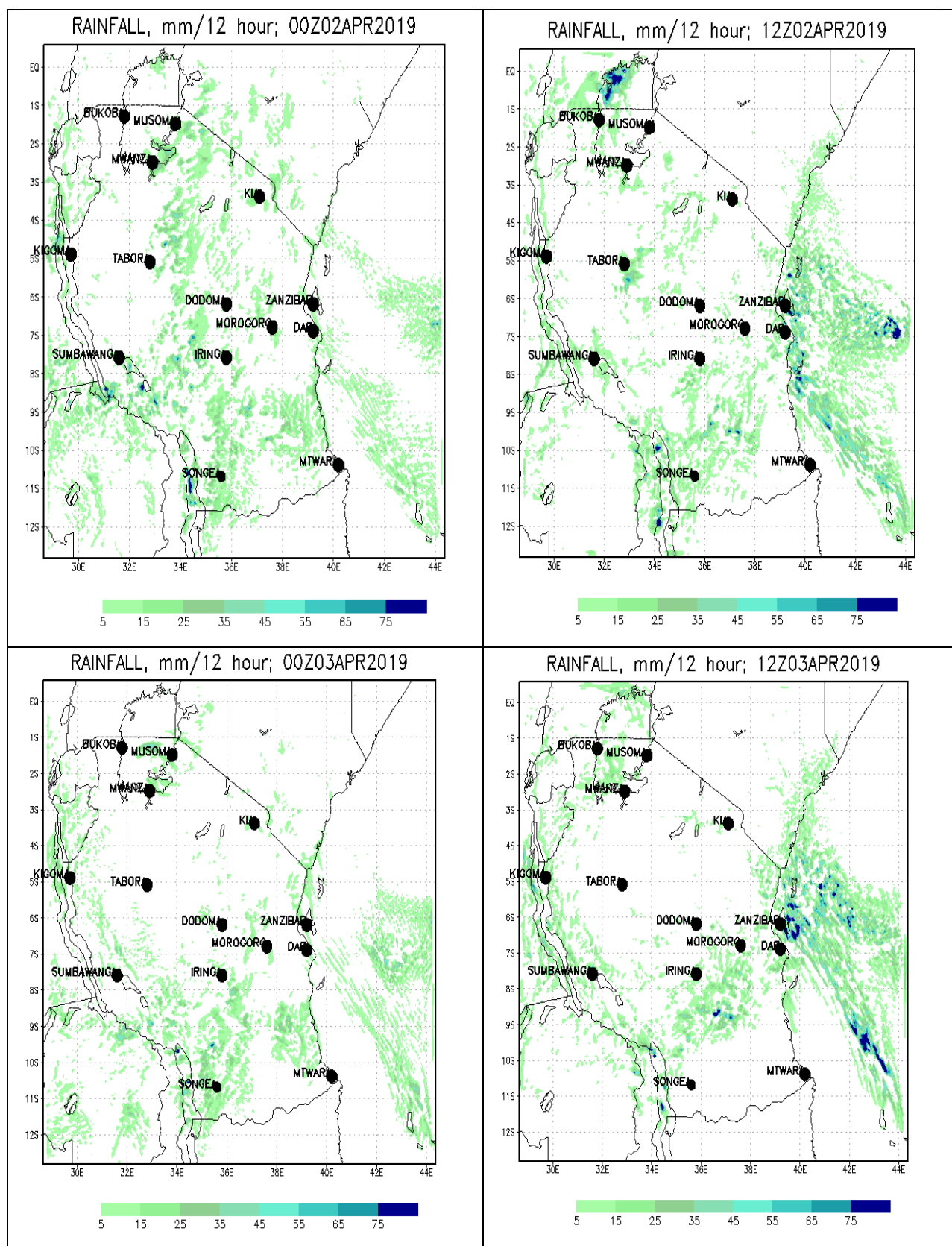


Рисунок 4.3 – Разница прогностических полей осадков, апрель 2019 года без параметризации конвекции и с параметризацией конвекции.

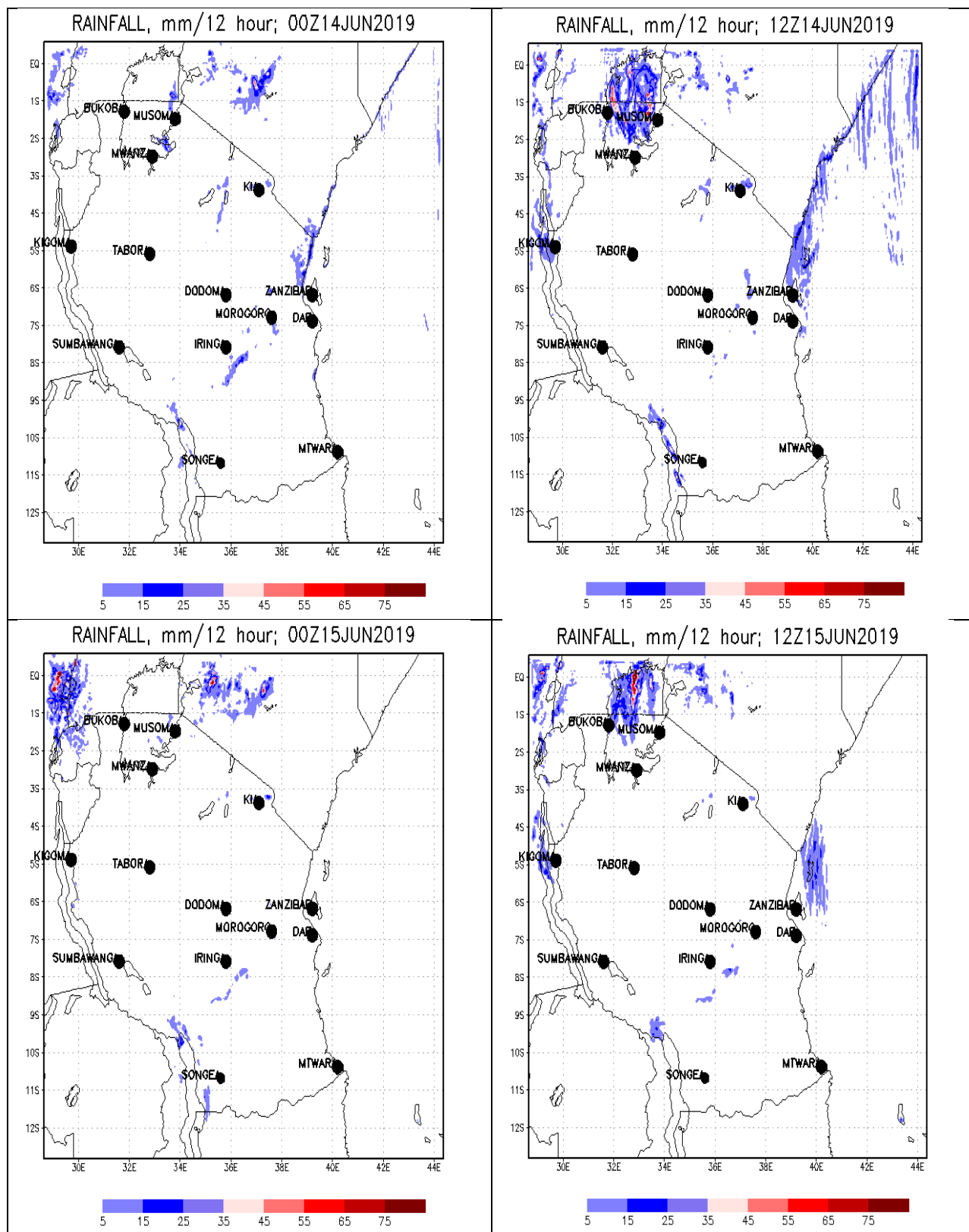


Рисунок 4.4 – Пример прогностических полей осадков, июнь 2019 года с параметризацией конвекции.

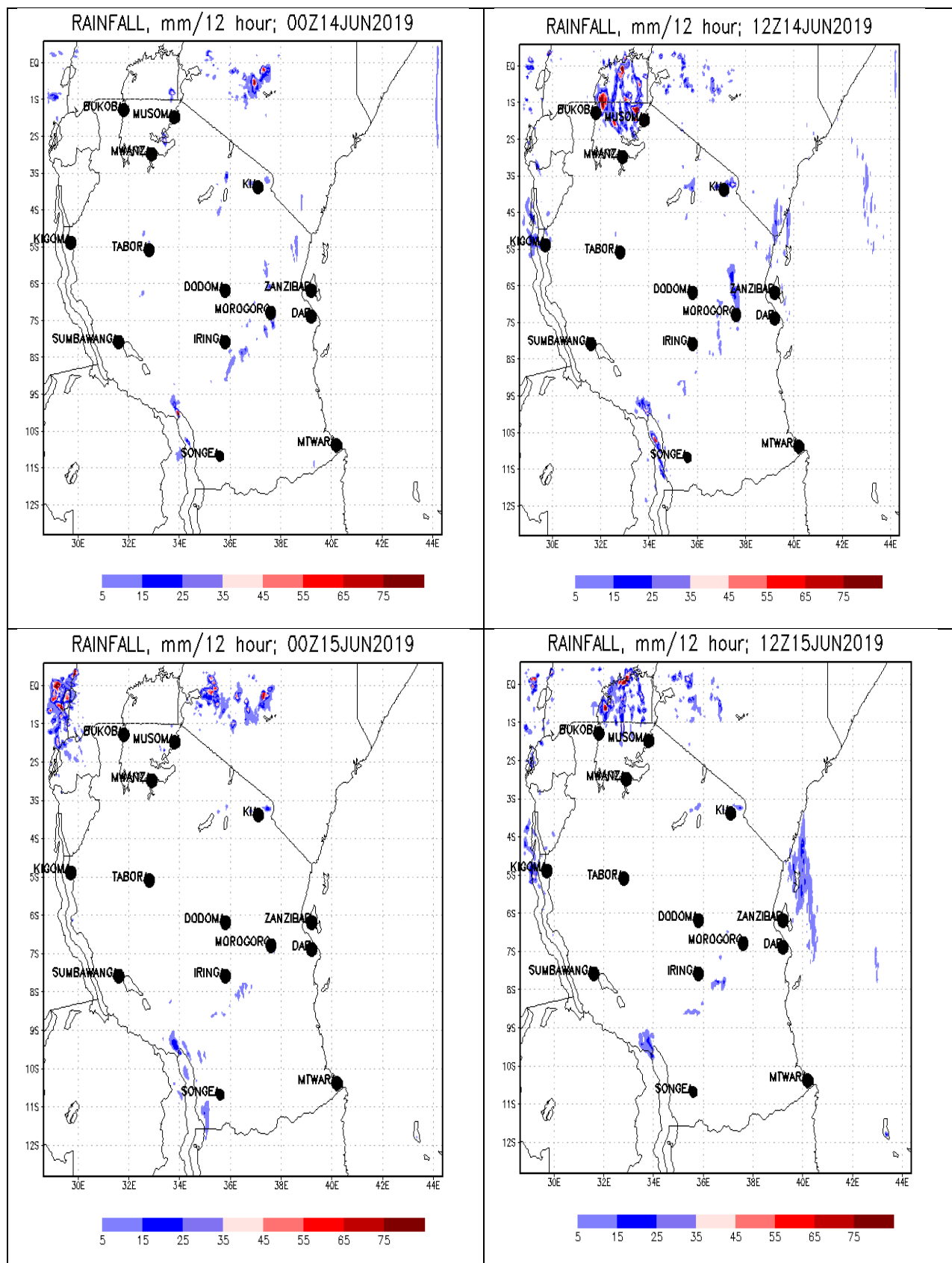


Рисунок 4.5 – Прогностические поля осадков, июнь 2019 года без параметризации конвекции.

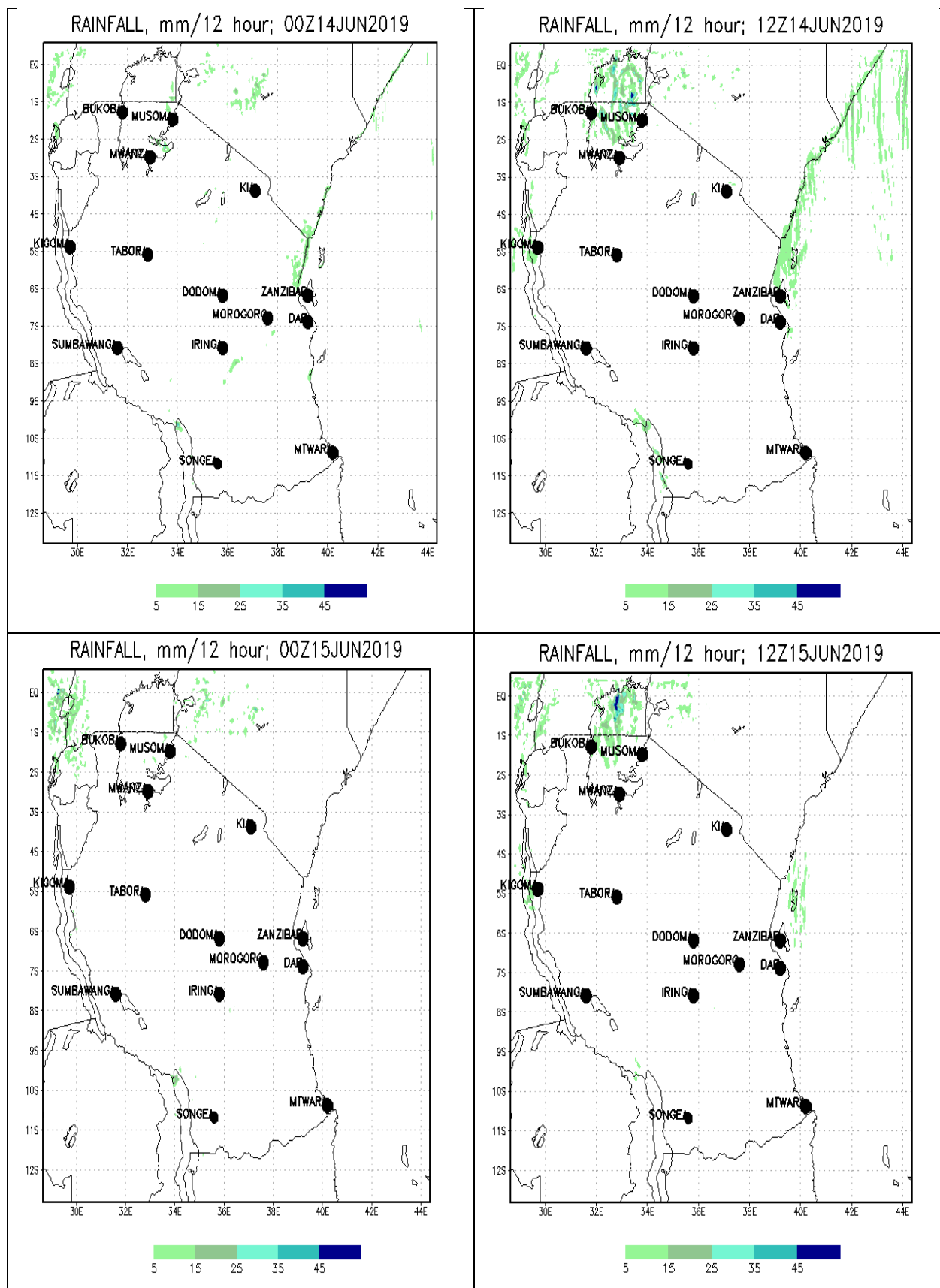


Рисунок 4.6 – Разница прогностических полей осадков, июнь 2019 года с параметризацией конвекции и без неё.

4.1 Верификация результатов с использованием матрицы сопряженности.

Был проведён анализ результатов с использованием матрицы сопряженности для каждой станции из таблицы 3.2. Такого типа анализ результатов с использованием матрицы сопряженности позволяет определить, насколько хорошо модель смогла спрогнозировать события с осадками и без них, а также проанализировать, как на качество прогноза влияет включение параметризации конвекции.

Пример матрицы сопряжённости с используемыми в дальнейшем обозначениями приведён в таблице 4.1.

В дальнейшем анализируются три индекса (B , POD и FAR), которые использовались для оценки эффективности модели с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции при прогнозировании событий с осадками и без осадков для апреля и июня 2019 года соответственно [43].

4.1.1 Пример матрицы сопряженности

Прогнозируемое событие	Наблюдаемое событие		сумма
	Да	Нет	
Да	a	b	$a+b$
Нет	v	Γ	$v+\Gamma$
сумма	$a+v$	$b+\Gamma$	$a+b+v+\Gamma = n$

Объяснение смысла обозначений в матрице сопряженности (таблица 4.1).

Для прогнозирования событий с осадками, апрель 2019 года.

a - количество событий, которые модель прогнозировала осадки, а также осадки наблюдались на станции.

б - количество событий, которые модель прогнозировала осадки, но осадки на станции не наблюдались.

в - количество событий, которые модель не прогнозировала осадки, но осадки наблюдались на станции.

г - количество событий, которые модель не прогнозировала осадки, а также осадки не наблюдались на станции.

п - общее количество всех анализируемых событий (прогнозов).

Для прогнозирования событий без осадков, июнь 2019 года.

а - количество событий, которые модель прогнозировала без осадков, а также осадки не наблюдались на станции.

б - количество событий, которые модель прогнозировала без осадков, но осадки наблюдались на станции.

в - количество событий, которые модель прогнозировала осадки, но осадки на станции не наблюдались.

г - количество событий, которые модель прогнозировала осадки, но при этом осадки наблюдались на станции.

п - общее количество всех событий (прогнозов).

4.1.2 Используемые для анализа индексы

Смещение (В)

Смещение при бинарных прогнозах сравнивает частоту прогнозов (прогноз «да») с частотой фактических событий (наблюдение «да»). Он определяется следующим образом:

$$B = (a + б) / (a + в)$$

Значение B лежит в диапазоне от нуля до бесконечности, несмещенная оценка = 1.

При значении B больше 1 система прогнозирования демонстрирует завышенную оценку события, а при значении меньше 1 система прогнозирования демонстрирует заниженную оценку события [43].

Вероятность обнаружения (POD)

Вероятность обнаружения (POD) рассматривает по умолчанию (экстремальное) событие, измеряя пропорцию наблюдаемых событий, которые были правильно спрогнозированы. Он определяется следующим образом:

$$POD = a / (a + \epsilon)$$

Значение POD лежит в диапазоне от нуля до единицы, отличная оценка = 1 или значения, близкие к 1 [43].

Коэффициент ложной тревоги (FAR)

Коэффициент ложной тревоги – это мера ложных тревог с учетом прогнозов (Прогноз «да»). Он определяется следующим образом:

$$FAR = \delta / (a + \delta)$$

Значение FAR лежит в диапазоне от единицы до нуля, отличная оценка = 0 или значения, близкие к 0 [43].

4.2 24 часа заблаговременность

4.2.1 Матрицы сопряжённости для влажного сезона

С параметризацией конвекции (апрель 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	4	21
Нет	4	4	8
Сумма	21	8	29

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	15	20
Нет	1	8	9
Сумма	6	23	29

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	10	7	17
Нет	0	12	12
Сумма	10	19	29

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	8	24
Нет	3	2	5
Сумма	19	10	29

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	22	27
Нет	1	1	2
Сумма	6	23	29

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	17	25
Нет	1	3	4
Сумма	9	20	29

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да			
Нет			
Сумма			

Да	16	8	24
Нет	2	3	5
Сумма	18	11	29

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	3	14
Нет	8	7	15
Сумма	19	10	29

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	14	22
Нет	2	5	7
Сумма	10	19	29

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	11	22
Нет	1	6	7
Сумма	12	17	29

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	9	9	18
Нет	4	7	11
Сумма	13	16	29

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	6	16	22
Нет	1	6	7
Сумма	7	22	29

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	7	9	16
Нет	4	9	13
Сумма	11	18	29

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да			
Нет			
Сумма			

Да	13	13	26
Нет	0	3	3
Сумма	13	16	29

4.2.2 Матрицы сопряжённости для влажного сезона Без параметризации конвекции (апрель 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	18	4	22
Нет	3	4	7
Сумма	21	8	29

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	8	12
Нет	2	15	17
Сумма	6	23	29

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	7	5	12
Нет	3	14	17

Сумма	10	19	29
-------	----	----	----

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	5	22
Нет	2	5	7
Сумма	19	10	29

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	3	21	24
Нет	3	2	5
Сумма	6	23	29

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	2	7	9
Нет	7	13	20
Сумма	9	20	29

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
--	---------------------	--	--

Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	2	14
Нет	6	9	15
Сумма	18	11	29

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	14	2	16
Нет	5	8	23
Сумма	19	10	29

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	13	21
Нет	2	6	8
Сумма	10	19	29

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	7	18
Нет	1	10	11

Сумма	12	17	29
-------	----	----	----

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	9	7	16
Нет	4	9	13
Сумма	13	16	29

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	7	11
Нет	3	15	28
Сумма	7	22	29

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	7	7	14
Нет	4	11	15
Сумма	11	18	29

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
--	---------------------	--	--

Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	13	13	26
Нет	0	3	3
Сумма	13	16	29

Для каждой из представленных выше матриц сопряженности были рассчитаны, описанные индексы, которые сведены в таблицу 4.2. Зелёным цветом в таблице выделены станции, прогнозы для которых дают приемлемые значения индексов. Красным цветом станции с прогнозами низкого качества.

В целом для апреля 2019 года (влажный сезон) модель с параметризацией конвекции дала хорошие результаты на 13 станциях из 14, за исключением Мтвары, в то время как модель без параметризации конвекции дала хорошие результаты на 11 станциях из 14, за исключением Килиманджаро, Кигомы и Сумбаванги.

Таблица 4.1 – Оценка качества прогноза осадков, апрель 2019 года

Станции	С параметризацией конвекцией			Без параметризации конвекции		
	<i>B</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>B</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>
Букоба	1,00	0,81	0,19	1,05	0,86	0,18
Дар-эс-Салаам	1,26	0,84	0,33	1,16	0,89	0,23
Додома	3,33	0,83	0,75	2,00	0,67	0,67
Иринга	1,70	1,00	0,41	1,20	0,70	0,42
Килиманджаро	4,50	0,83	0,81	4,00	0,50	0,88
Кигома	2,78	0,89	0,68	1,00	0,22	0,78
Мтваара	0,74	0,58	0,21	0,84	0,74	0,13
Мусома	2,20	0,80	0,64	2,10	0,80	0,62
Мванза	1,83	0,92	0,50	1,50	0,92	0,39
Сонгеа	1,38	0,69	0,50	1,23	0,69	0,44
Морогоро	1,33	0,89	0,33	0,78	0,67	0,14
Табора	1,45	0,64	0,56	1,27	0,64	0,50
Занзибар	2,00	1,00	0,50	2,00	1,00	0,50
Сумбаванга	3,14	0,86	0,73	1,57	0,57	0,64
Средний	2,05	0,83	0,51	1,55	0,70	0,46

С учетом того, что апрель является месяцем осадков только для тех районов, которые получают осадки два раза в год (бимодельный режим осадков), поэтому проанализируем отдельно те регионы, которые получают осадки два раза в год. В таблице 4.5 показывают сравнение трех индексов (*B*, *POD* и *FAR*) для апреля 2019 года для двух случаев (с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции).

4.2.3 Значение B .

Таблица 4.2 – Сравнение значений смещения (B)

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	3,33	2,00
Занзибар	2,00	2,00
Мванза	1,83	1,50
Мусома	2,20	2,10
Букоба	1,00	1,05
Килиманджаро	4,50	4,00
Дар-эс-Салаам	1,26	1,16
Средние	2,30	1,97

Для значений B (сравнение частоты прогнозов с частотой фактических событий) отличная оценка равна 1 [43]. Из анализа таблицы 4.5 видно, что модель с параметризацией конвекции, и без параметризации конвекции завышала оценку прогнозируемых осадков на выбранных 7 станциях. Большой эффект наблюдается в Додоме и Килиманджаро. В случае Додомы, изменение климата, вызванное как природными, так и антропогенными факторами, привело к изменению природы земли (пустыня) и пространственного распределения осадков. Одним из районов на исследуемой территории, столкнувшихся с проблемой опустынивания в результате изменения климата является Додома.

Для Килиманджаро можно выделить три фактора: во-первых, наличие больших гор, окружающих район, во-вторых, высота над средним уровнем моря (893м) и, в-третьих, изменение природы земли (пустыня), вызванное изменением климата, которое влияет на пространственное распределение осадков. Плохие результаты, полученные на этих станциях, могут быть

обусловлены указанными факторами. Только на одной станции Букоба соотношении прогностических осадков и реальных практически идеально.

Хотя средние значения для обоих случаев показывают, что модель переоценила прогностическое количество осадков, но среднее значение для прогноза осадков без параметризации конвекции ниже, чем среднее значение для прогноза осадков с параметризацией конвекции.

4.2.4 Значение *POD*.

Таблица 4.3 - Сравнение значений *POD*

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	0,83	0,67
Занзибар	1,00	1,00
Мванза	0,92	0,92
Мусома	0,80	0,80
Букоба	0,81	0,86
Килиманджаро	0,83	0,50
Дар-эс-Салаам	0,84	0,89
Средний	0,86	0,81

Значения *POD* (доля наблюдаемых событий, которые были правильно предсказаны) из таблицы, модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события осадков на всех станциях при учете значений *POD* для каждой станции.

Идеальное значение для *POD* равно 1 или значениям, близким к 1 [43]. Только для двух станций значение индекса *POD* с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции сильно различаются (Додома и Килиманджаро). Для всех остальных станций индекс или не меняется или меняется очень незначительно.

Можно отметить, что для двух станций включение конвекции улучшает характеристику качества прогноза (увеличивает индекс *POD*) – Букова, Дар-эс-Салаам. Близость к водоемам является одним из факторов, влияющих на пространственное распределение осадков. Букова и Дар-эс-Салаам находятся очень близко к водоемам, Букова - к озеру Виктория, а Дар-эс-Салаам - к Индийскому океану. Улучшение значений *POD* для этих двух станций может быть связано с влиянием водных объектов, в которых модель без параметризации конвекции упустила прогноз.

4.2.5 Значение *FAR*.

Таблица 4.4 - Сравнение значений индекса *FAR*

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	0,75	0,67
Занзибар	0,50	0,50
Мванза	0,50	0,39
Мусома	0,64	0,62
Букова	0,33	0,18
Килиманджаро	0,81	0,88
Дар-эс-Салам	0,33	0,23
Средний	0,55	0,49

Значения *FAR* (мера ложных тревог в прогнозах) из таблицы, модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала осадки только на 2 станциях из 7 станций (Дар-эс-Салаам и Букова), если смотреть на значения *FAR*, то поскольку идеальными значениями являются значения, равные 0 или близкие к 0 [43].

Без параметризации конвекции значения *FAR* для прогнозируемых событий осадков на двух вышеупомянутых станциях были намного ниже

(Дар-эс-Салаам и Букоба). На остальных станциях значения были равны или немного различались.

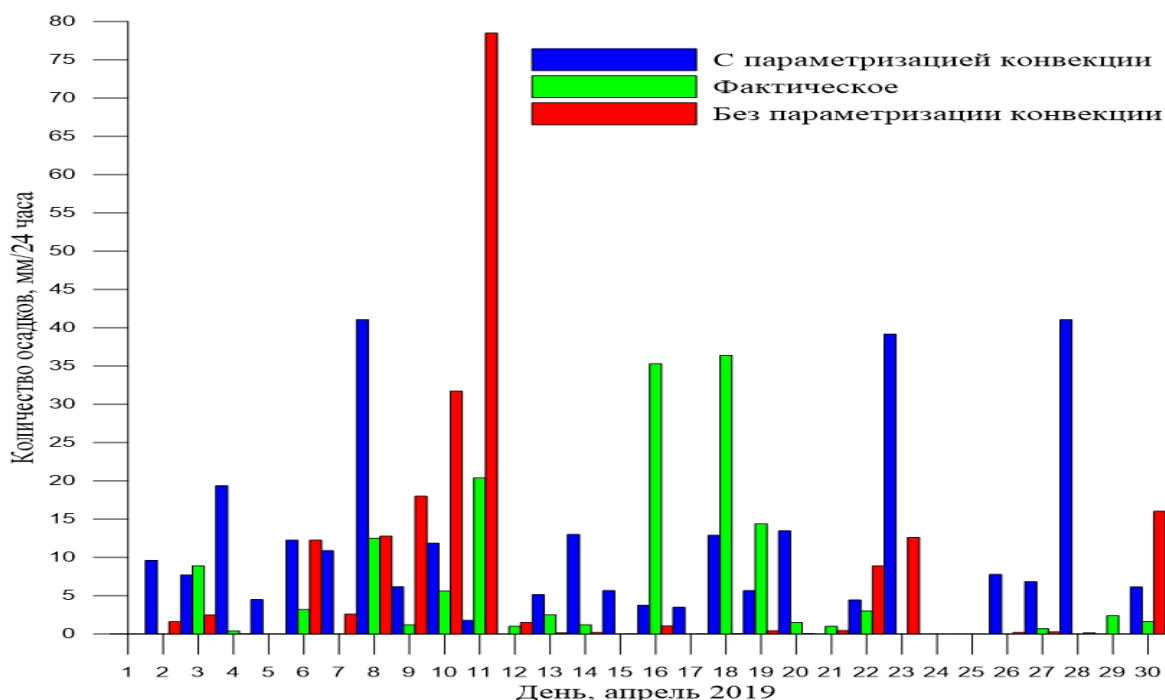


Рисунок 4.7 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Дар-эс-Салаам, апрель 2019 года.

Сравнивая прогностическое и реальное количество осадков (рисунки 4.7), можно увидеть, что модель с параметризацией конвекции (синий столбик) хорошо коррелирует с наблюдаемыми дождями (зеленый столбик) при прогнозировании осадков в Дар-эс-Саламе, чем модель без параметризации конвекции (красный столбик).

Также, в Букобе модель с параметризацией конвекции (синий столбик) лучше коррелирует с наблюдаемыми событиями осадков (зеленый столбик) при прогнозировании событий осадков в Букобе, чем без параметризации конвекции (красный столбик).

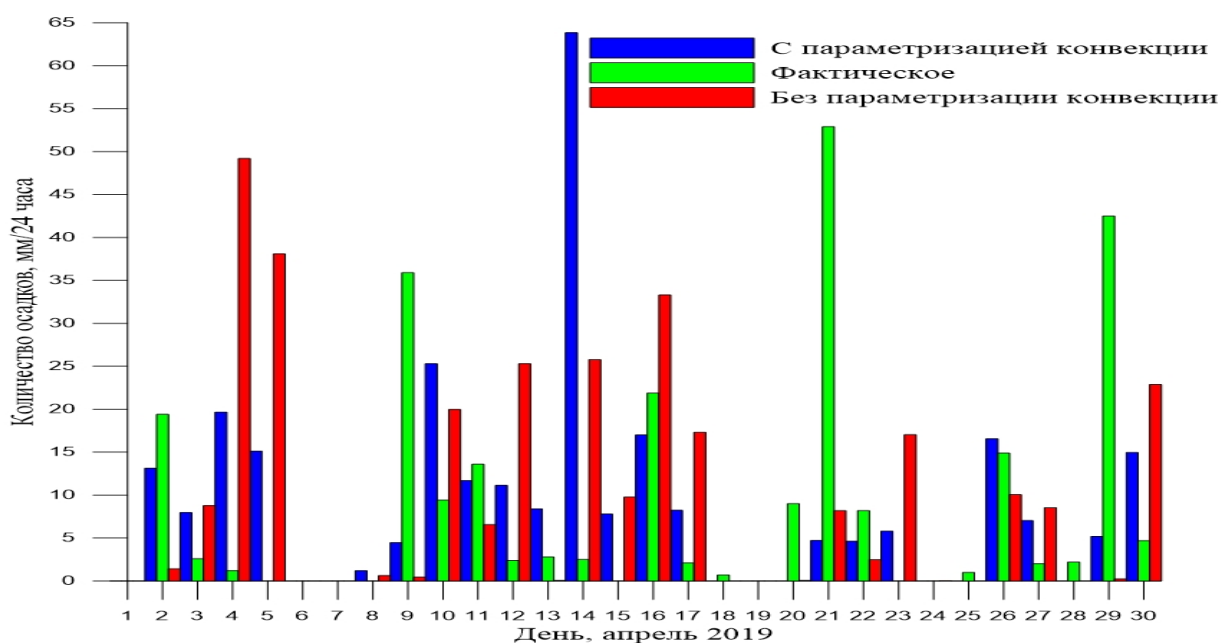


Рисунок 4.8 – Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Букоба, апрель 2019 года.

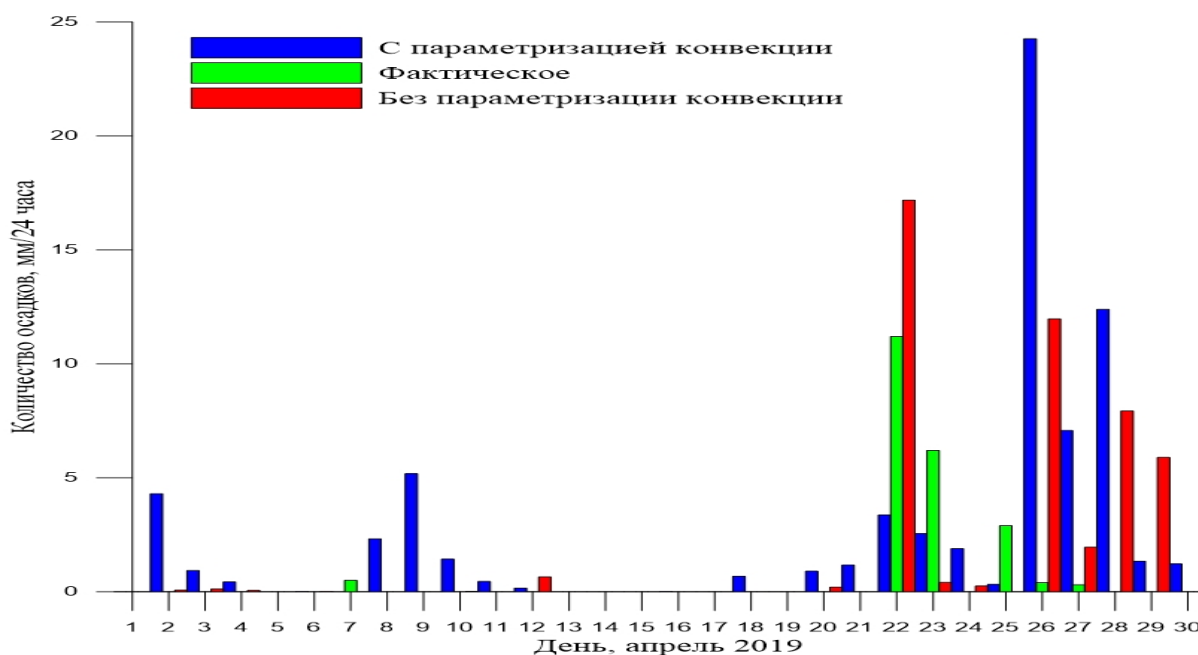


Рисунок 4.9 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Додома, апрель 2019 года.

Для Додомы модель с параметризацией конвекции (синяя полоса) и без параметризации конвекции (красная полоса) плохо коррелировала с

наблюдаемыми явлениями дождя (зеленая полоса) при прогнозировании явлений дождя в Додоме, двух конвективная схема дала плохие результаты.

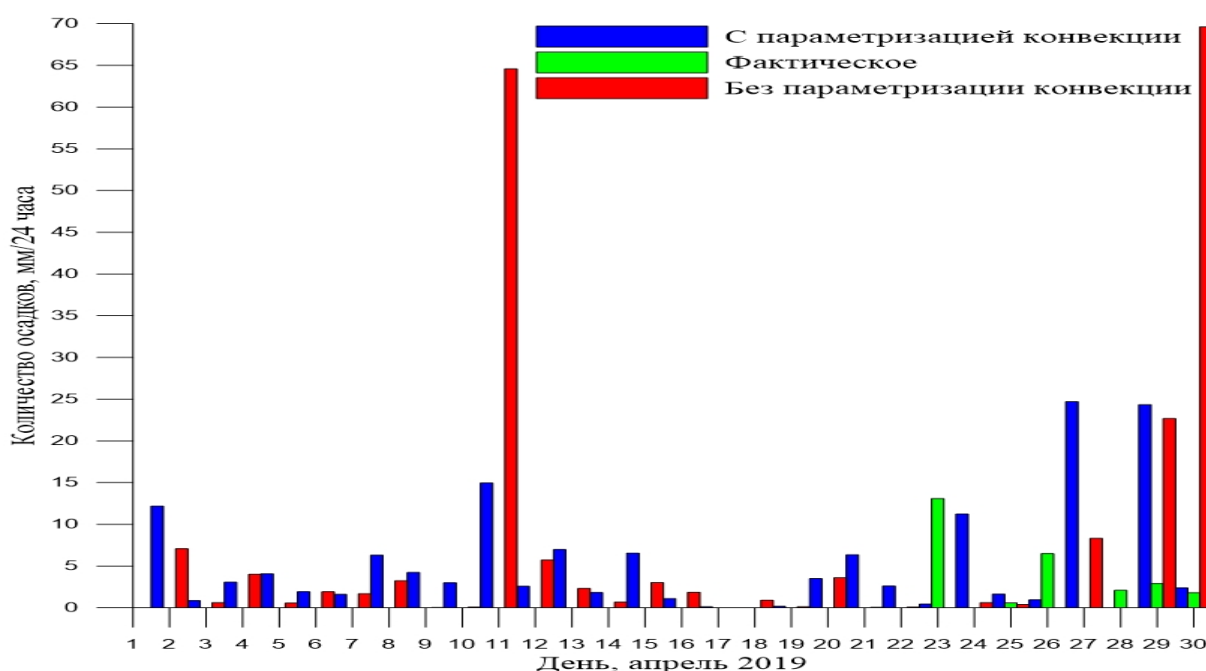


Рисунок 4.10 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без неё. Килиманджаро, апрель 2019 года.

Тот же эффект в Додоме наблюдался и в Килиманджаро, модель с параметризацией конвекции (синяя полоса) и без параметризации конвекции (красная полоса) плохо коррелировала с наблюдаемыми событиями осадков (зеленая полоса) при прогнозировании событий осадков в Килиманджаро, двух конвективная схема дала плохие результаты.

4.2.6 Матрицы сопряжённости для сухого сезона С конвекцией (июнь 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	3	15

Нет	2	0	2
Сумма	14	3	17

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	9	0	9
Нет	7	1	8
Сумма	16	1	17

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	0	5
Нет	12	0	12
Сумма	17	0	17

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	15	0	15
Нет	2	0	2
Сумма	17	0	17

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	0	11
Нет	6	0	6
Сумма	17	0	17

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да			
Нет			
Сумма			

Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	0	5
Нет	9	3	12
Сумма	14	3	17

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	1	12
Нет	5	0	5
Сумма	16	1	17

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	3	0	3
Нет	14	0	14
Сумма	17	0	17

4.2.7 Матрицы сопряжённости для сухого сезона
Без параметризации конвекции (июнь 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	3	15
Нет	2	0	2
Сумма	14	3	17

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	5	16
Нет	1	0	1
Сумма	12	5	17

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	0	8
Нет	9	0	9
Сумма	17	0	17

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	0	11
Нет	6	0	6
Сумма	17	0	17

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	2	14
Нет	2	1	3
Сумма	14	3	17

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	15	1	16
Нет	1	0	1
Сумма	16	1	17

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	0	12
Нет	5	0	5
Сумма	17	0	17

В связи с тем, что июнь является месяцем без осадков с низкой конвективной активностью для всей исследуемой территории, то все станции будут использованы для оценки того, насколько лучше модель с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции могла прогнозировать события без осадков с использованием трех, описанных ранее индексов – *B*, *POD* и *FAR*.

4.2.8 Значение B

Таблица 4.5 – Сравнение значений индекса B

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	1,07	1,07
Дар-эс-Салаам	0,56	0,69
Додома	1,00	1,00
Иринга	1,00	1,00
Килиманджаро	0,29	0,47
Кигома	0,88	0,94
Мтвара	0,94	0,94
Мусома	0,36	1,00
Мванза	0,76	1,00
Сонгеа	1,00	0,94
Морогоро	0,65	0,65
Табора	0,94	0,94
Занзибар	0,18	0,71
Сумбаванга	1,00	1,00
Средний	0,76	0,88

Отличное значение B равно 1 [43]. Рассматривая значение на каждой станции, модель с параметризацией конвекции оценила хорошие события без осадков на 8 станциях из 14, за исключением Дар-эс-Салаама, Килиманджаро, Мусомы, Мванза, Морогоро и Занзибара. Без параметризации конвекции модель хорошо оценила события без осадков на 10 станциях из 14, за исключением Занзибара, Морогоро, Килиманджаро и Дар-эс-Салаама.

Для случаев завышенной и заниженной оценки. Модель с параметризацией конвекции завышала оценку события без осадков только на

1 станции (Букоба) из 14, а модель с параметризацией конвекции занижала оценку события без осадков на 6 станциях из 14, в то время как модель без параметризации конвекции занижала оценку события без осадков только на 4 станциях из 14.

Среднее значение B для модели без параметризации конвекции показывает лучший оценку, чем с параметризацией конвекции, сравнивая значения B для каждой станции и средние значения для всех 14 станций.

4.2.9 Значение POD .

Таблица 4.6 - Сравнение значений POD .

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	0,86	0,86
Дар-эс-Салаам	0,56	0,69
Додома	1,00	1,00
Иринга	1,00	1,00
Килиманджаро	0,29	0,47
Кигома	0,88	0,94
Мтвара	0,94	0,94
Мусома	0,36	0,86
Мванза	0,71	0,94
Сонгеа	1,00	0,94
Морогоро	0,65	0,65
Табора	0,94	0,94
Занзибар	0,18	0,71
Сумбаванга	1,00	1,00
Средний	0,74	0,85

Отличное значение оценки *POD* равно 1 или значениям, близким к 1 [43]. Рассматривая значение на каждой станции, модель без параметризации конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 13 станциях из 14, за исключением Килиманджаро. Хотя в целом из 14 станций, модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала на 10 станциях из 14, за исключением Килиманджаро, Занзибара, Мусомы и Дар-эс-Салаама.

Среднее значение *POD* для модели с параметризацией конвекции и без нее составило 0,74 и 0,85 соответственно для всех станций. В целом, модель в обоих случаях (с параметризацией конвекции и без нее) хорошо прогнозировала события без осадков в выбранном месяце. Но если посмотреть на значения *POD* на каждой станции и средние значения для всех станций, то модель без параметризации конвекции дала лучшие результаты, чем с параметризацией конвекции.

4.2.10 Значение *FAR*

Таблица 4.7 - Сравнение значений *FAR*.

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	0,20	0,20
Дар-эс-Салаам	0,00	0,00
Додома	0,00	0,00
Иринга	0,00	0,00
Килиманджаро	0,00	0,00
Кигома	0,00	0,00
Мтвара	0,00	0,00
Мусома	0,00	0,14
Мванза	0,08	0,06
Сонгеа	0,00	0,00
Морогоро	0,00	0,00
Табора	0,00	0,00
Занзибар	0,00	0,00
Сумбаванга	0,00	0,00
Средний	0,02	0,03

Среднее значение *FAR* для модели с параметризацией конвекции и без нее в обоих случаях (с параметризацией конвекции и без нее) для всех станций показывает хорошие результаты - 0,02 и 0,03 соответственно. Также если посмотреть на значения *FAR* на каждой станции, то в обоих случаях получены хорошие результаты. В целом, модель в обоих случаях (с параметризацией конвекции и без нее) в выбранном месяце показала лучшие результаты в прогнозировании событий без осадков с минимальной ошибкой.

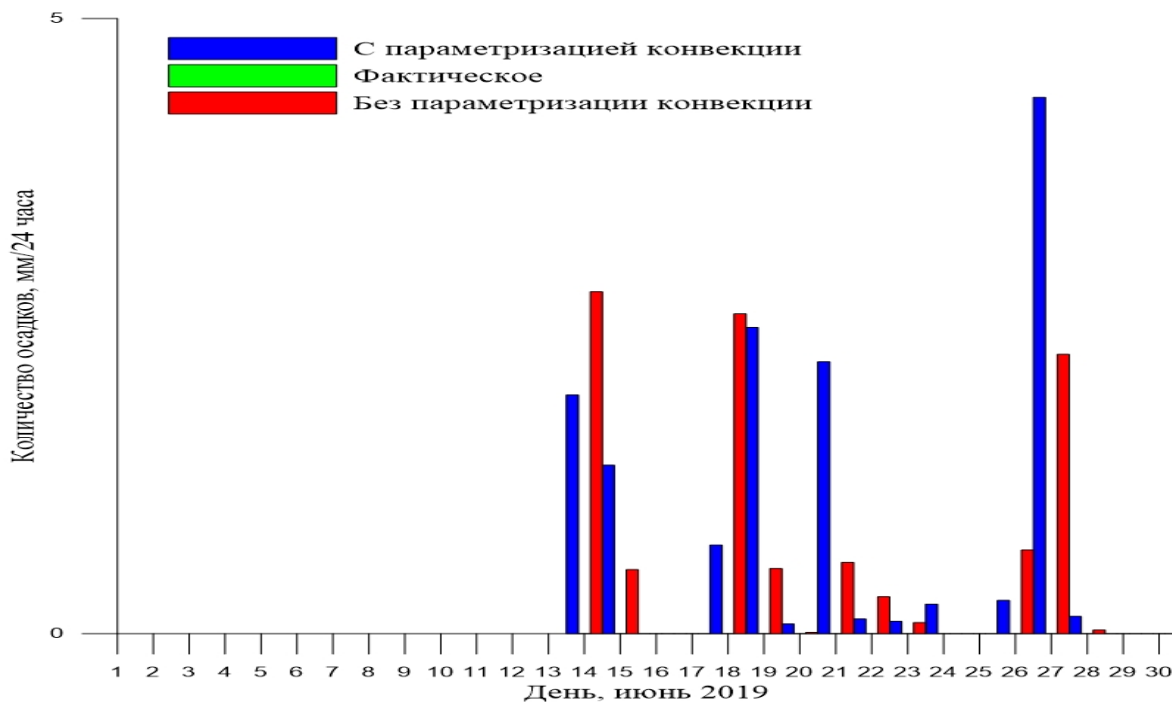


Рисунок 4.11 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Килиманджаро, июнь 2019 года.

Из Рисунок 4.11 видно, что модель без параметризации конвекции (красная полоса) и с параметризацией конвекции (синяя полоса) плохо коррелирует с наблюдаемыми событиями без осадков (зеленая полоса) при прогнозировании событий без осадков на Килиманджаро, поскольку июнь - месяц без осадков (сухой сезон) в большинстве районов исследуемой территории. Прогноз основан на последних 17 днях месяца, поскольку данные до 13 июня 2019 года имели проблемы и не могли быть использованы в модели во время инициализации модели.

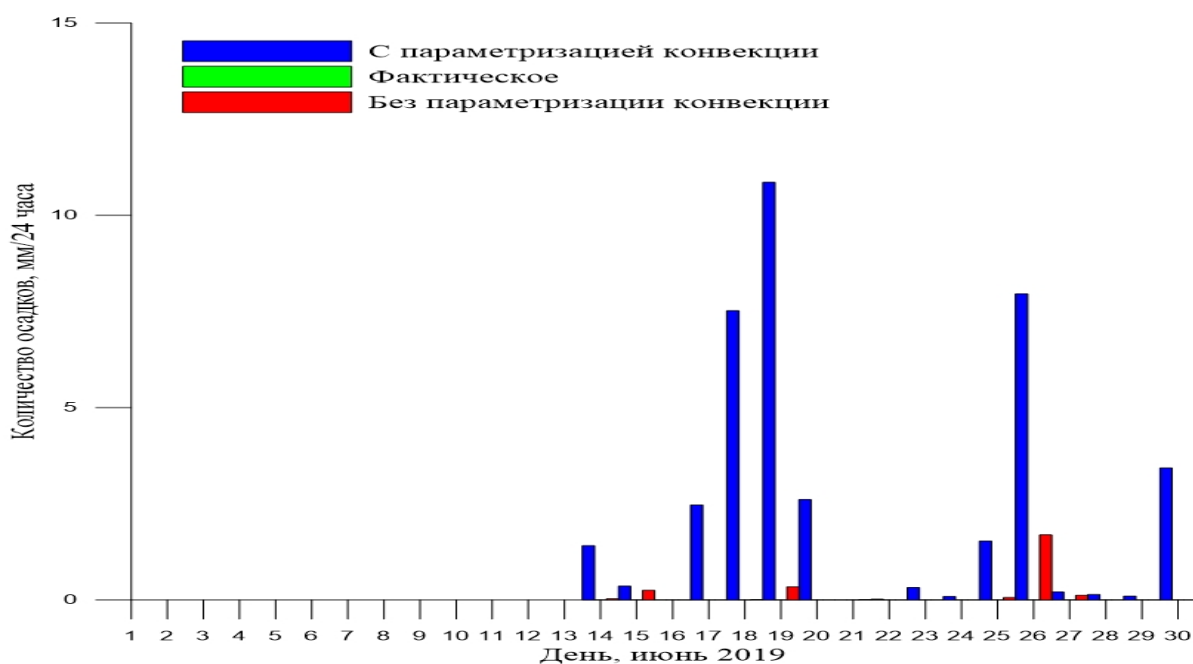


Рисунок 4.12 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Занзибар, июнь 2019 года.

Из Рисунок 4.12, Занзибар модель без параметризации конвекции (красная полоса) не плохо коррелировала с наблюдаемыми событиями без осадков (зеленая полоса) при прогнозировании событий без осадков, чем с параметризацией конвекции (синяя полоса).

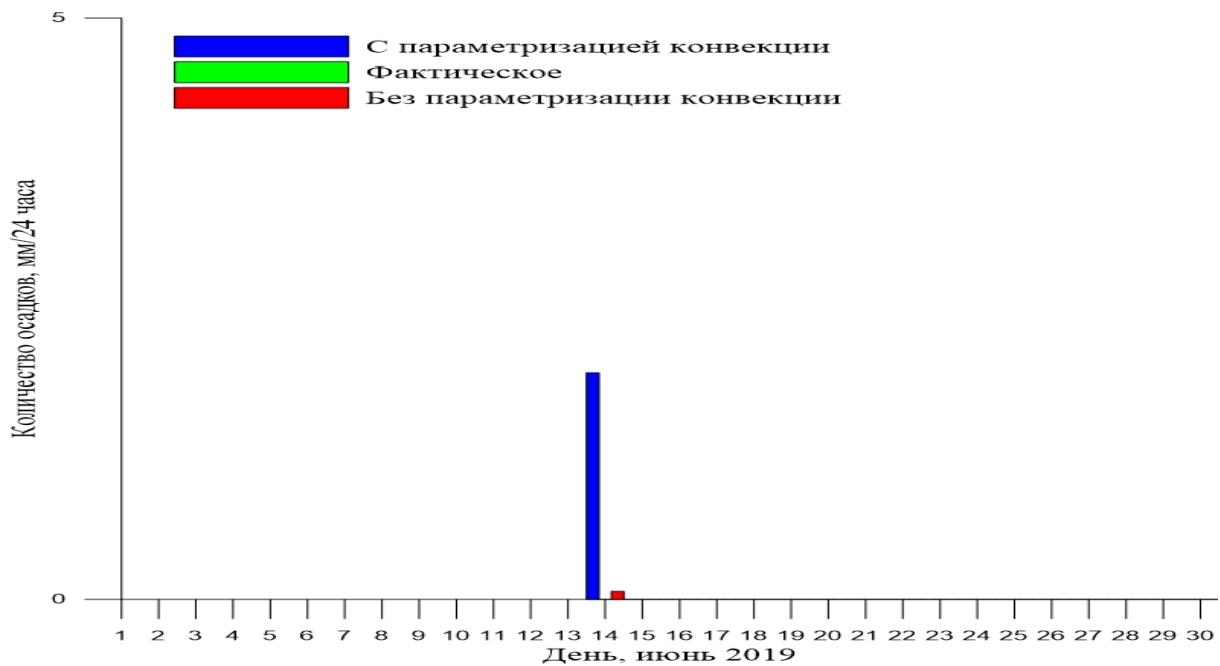


Рисунок 4.13 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Тавора, июнь 2019 года.

Из Рисунок 4.12, Тавора модели с параметризацией конвекции (синяя полоса) и без параметризации конвекции (красная полоса) хорошо коррелируют в прогнозировании событий без осадков, за исключением только 14 июня 2019 года за последние 17 дней месяца, когда модели с параметризацией конвекции и без нее прогнозировали осадки, но не значительно.

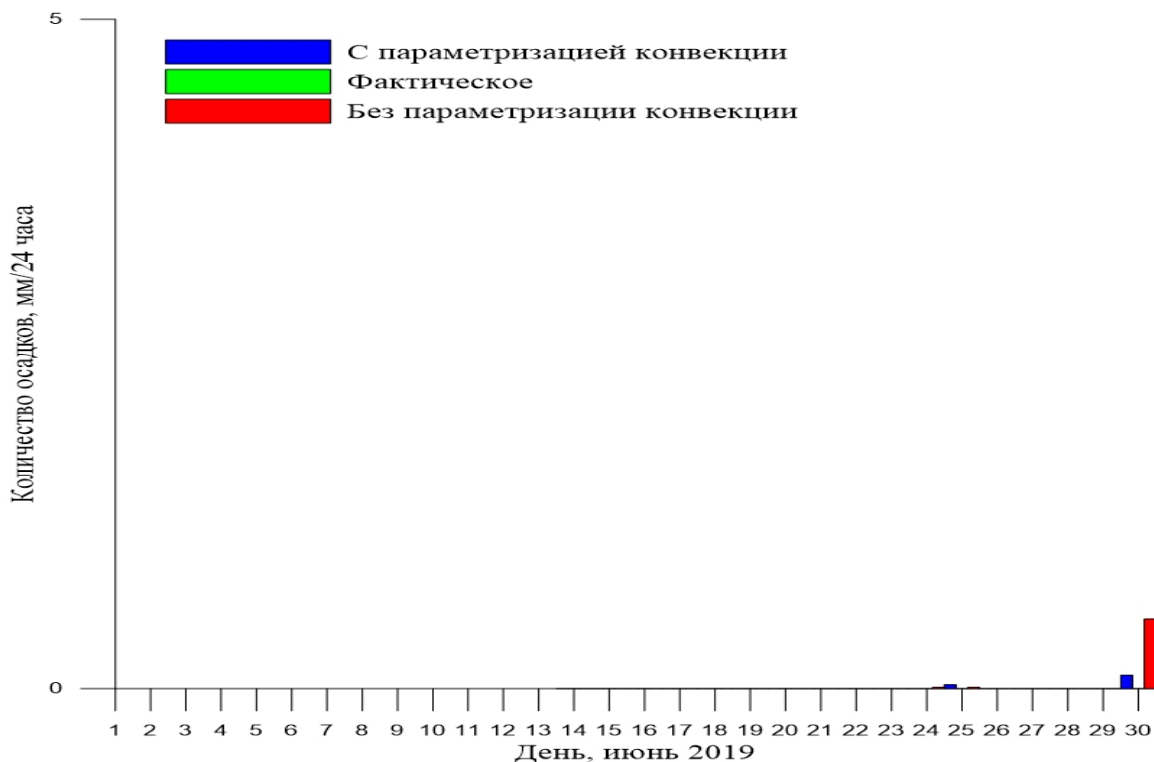


Рисунок 4.14 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Мтвара, июнь 2019 года

Из Рисунок 4.14, Мтвара модели с параметризацией конвекции (синяя полоса) и без параметризации конвекции (красная полоса) хорошо коррелируют в прогнозировании событий без осадков, за исключением 24, 25 и 30 июня 2019 года за последние 17 дней месяца, когда модели с параметризацией конвекции и без нее прогнозировали осадки, ещё не значительно.

4.2.11 Выводы

Резюмируя всё вышесказанное можно сделать следующие выводы:

Значения *POD* для влажного сезона (апрель 2019 г.) для каждой станции для событий с осадками показала, что модель с параметризацией конвекции показала хороший результат на всех 7 выбранных станциях (бимодальные районы), которые получают осадки два раза в год, в то время как модель без параметризации конвекции показала хороший результат

только на 6 станциях, за исключением 1 станций (Килиманджаро). Для всех 14 станций модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события с осадками на 13 станциях из 14 по сравнению с моделью без параметризации конвекции, которая хорошо прогнозировала события с осадками на 11 станциях из 14.

Средние значения *POD* показывают, что модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события с осадками со средним значением 0,86, по сравнению с моделью без параметризации конвекции, которая имеет значение 0,81 из 7 выбранных станций. Для всех 14 станций модель с параметризацией конвекции показала хорошие результаты со средним значением 0,83 по сравнению с моделью без параметризации конвекции, среднее значение которой составило 0,70.

Значения *POD* для сухого сезона (июнь 2019 г.) показывают, что модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 10 станциях из 14, за исключением 4 станций (Мусома, Занзибар, Дар-эс-Салам и Килиманджаро). Модель без параметризации конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 13 станциях из 14, за исключением 1 станции (Килиманджаро).

Среднее значение *POD* для всех 14 станций для модели с параметризацией конвекции и без нее в обоих случаях показывает хороший результат.

Модель с параметризацией конвекции лучше прогнозировала события без осадков в выбранном месяце со средним значением *POD* 0,85, чем модель с параметризацией конвекции, среднее значение которой составило 0,74.

Успешность прогноза, правильность прогноза для влажного сезона (апрель 2019 г.) для событий с осадками на 14 станций показала, что модель с параметризацией конвекции имеет значение 83%, а модель без параметризации конвекции имеет значение 70%. Для сухого сезона (июнь 2019 г.) для событий без осадков на 14 станций показала, что модель с

параметризацией конвекции имеет значение 74%, а модель без параметризации конвекции имеет значение 85%.

Для влажного сезона (апрель 2019 г.) для событий с осадками модель с параметризацией конвекции показала лучшие результаты, чем модель без параметризации конвекции. Для сухого сезона (июнь 2019 г.) для событий без осадков модель без параметризации конвекции показала лучшие результаты, чем модель с параметризацией конвекции.

4.3 9 суток заблаговременность

4.3.1 Матрицы сопряжённости для влажного сезона

С параметризацией конвекции (апрель 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	9	9	18
Нет	8	3	11
Сумма	17	12	29

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	18	22
Нет	1	6	7
Сумма	5	24	29

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	13	17
Нет	2	10	12
Сумма	6	23	29

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	14	13	27
Нет	0	2	2
Сумма	14	15	29

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	3	25	28
Нет	1	0	1
Сумма	4	25	29

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	3	20	23
Нет	4	2	6
Сумма	7	22	29

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	15	26
Нет	1	2	3
Сумма	12	17	29

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	9	17
Нет	6	6	12
Сумма	14	15	29

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	3	15	18
Нет	3	8	11
Сумма	6	23	29

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	16	24
Нет	1	4	5
Сумма	9	20	29

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	7	10	17
Нет	1	11	12
Сумма	8	21	29

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	1	9	10
Нет	1	18	19
Сумма	2	27	29

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	7	9	16
Нет	0	13	13
Сумма	7	22	29

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	18	26
Нет	0	3	3
Сумма	8	21	29

4.3.2 Матрицы сопряжённости для влажного сезона
Без параметризации конвекции (апрель 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	4	8
Нет	13	8	21
Сумма	17	12	29

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	8	12
Нет	1	16	17
Сумма	5	24	29

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	1	5	6
Нет	5	18	23
Сумма	6	23	29

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	13	11	24
Нет	1	4	5
Сумма	14	15	29

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	21	26
Нет	1	2	3
Сумма	6	23	29

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	1	4	5
Нет	9	15	24
Сумма	10	19	29

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	6	11	17
Нет	5	7	12
Сумма	11	18	29

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	10	18
Нет	7	4	11
Сумма	15	14	29

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	1	9	10
Нет	5	14	19
Сумма	6	23	29

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	5	13
Нет	1	15	16
Сумма	9	20	29

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	5	8	13
Нет	5	11	16
Сумма	10	19	29

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	1	7	8
Нет	1	20	21
Сумма	2	27	29

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	4	5	9
Нет	3	17	20
Сумма	7	22	29

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	6	14	20
Нет	1	8	9
Сумма	7	22	29

Для каждой из представленных выше матриц сопряженности были рассчитаны, описанные индексы, которые сведены в таблицу 4.2. Зелёным цветом в таблице выделены станции, прогнозы для которых дают приемлемые значения индексов. Красным цветом станции с прогнозами низкого качества.

Таблица 4.8 – Оценка качества прогноза осадков, апрель 2019

Станции	С параметризацией конвекцией			Без параметризации конвекции		
	<i>B</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>B</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>
Букоба	1,06	0,53	0,50	0,47	0,24	0,50
Дар-эс-Салаам	1,93	1,00	0,48	1,71	0,93	0,46
Додома	4,40	0,80	0,82	2,40	0,80	0,67
Иринга	2,83	0,67	0,76	1,00	0,17	0,83
Килиманджаро	7,00	0,75	0,89	4,33	0,83	0,81
Кигома	3,29	0,43	0,87	0,50	0,10	0,80
Мтвара	1,21	0,57	0,53	1,20	0,53	0,56
Мусома	3,00	0,50	0,83	1,67	0,17	0,90
Мванза	2,67	0,89	0,67	1,44	0,89	0,38
Сонгеа	2,13	0,88	0,59	1,30	0,50	0,62
Морогоро	2,17	0,92	0,58	1,55	0,55	0,65
Табора	2,29	1,00	0,56	1,29	0,57	0,56
Занзибар	3,25	1,00	0,69	2,86	0,86	0,70
Сумбаванга	5,00	0,50	0,90	4,00	0,50	0,88
Средний	3,02	0,74	0,69	1,84	0,54	0,66

В целом для влажного сезона на 9 суток заблаговременность, модель с параметризацией конвекции дала хорошие результаты на 9 станциях из 14, за исключением Мтвары, Мусомы, Кигомы, Букобы, и Сумбаванги.

Модель без параметризации конвекции дала хорошие результаты на 5 станциях (Занзибар, Мванза, Килиманджаро, Додома и Дар-эс-Салаам) из 14.

Для тех районов, которые получают осадки два раза в год (бимодельный режим осадков), таблица 4.16 показывают сравнение трех

индексов (B , POD и FAR) для влажного сезона для двух случаев (с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции).

4.3.3 Значение B .

Таблица 4.9 – Сравнение значений смещения B

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	4,40	2,40
Занзибар	3,25	2,86
Мванза	2,67	1,44
Мусома	3,00	1,67
Букоба	1,06	0,47
Килиманджаро	7,00	4,33
Дар-эс-Салаам	1,93	1,71
Средние	3,33	2,13

Для значений B (сравнение частоты прогнозов с частотой фактических событий) отличная оценка равна 1 [43]. Из анализа таблицы 4.16 видно, что модель с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции завышала оценку прогнозируемых осадков на выбранных 7 станциях. Также большой эффект наблюдается в Додоме и Килиманджаро. Только на одной станции Букоба с параметризацией конвекции, соотношении прогностических осадков и реальных практически идеально.

Хотя средние значения показывают, что модель завышала оценку прогнозируемых осадков, но среднее значение для прогноза осадков без параметризации конвекции ниже, чем среднее значение для прогноза осадков с параметризацией конвекции.

4.3.4 Значение *POD*.

Таблица 4.10 - Сравнение значений *POD*

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	0,80	0,80
Занзибар	1,00	0,86
Мванза	0,89	0,89
Мусома	0,50	0,17
Букоба	0,53	0,24
Килиманджаро	0,75	0,83
Дар-эс-Салаам	1,00	0,93
Средний	0,78	0,67

Значения *POD* (доля наблюдаемых событий, которые были правильно предсказаны) из таблицы 4.17, модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события осадков на всех станциях при учете значений *POD* для каждой станции. Идеальное значение для *POD* равно 1 или значениям, близким к 1 [43]. Только для двух станций значение индекса *POD* с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции сильно различаются (Мусома и Букоба). Для остальных станций индекс или не меняется или меняется очень незначительно.

Можно отметить, что Килиманджаро улучшает характеристику качества прогноза (увеличивает индекс *POD*). Улучшение значений *POD* для Килиманджаро может быть связано с ландшафтной местностью, в которой находится большие горы. Средние значения *POD* показывают, что модель с параметризацией конвекции дала хорошее значение, чем без параметризации конвекции.

4.3.5 Значение *FAR*.

Таблица 4.11 - Сравнение значений индекса *FAR*

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Додома	0,82	0,67
Занзибар	0,69	0,70
Мванза	0,67	0,38
Мусома	0,83	0,90
Букоба	0,50	0,50
Килиманджаро	0,89	0,81
Дар-эс-Салаам	0,48	0,46
Средний	0,70	0,63

Значения *FAR* (мера ложных тревог в прогнозах) из таблицы, модель с параметризацией конвекции и без нее дала плохие результаты по *FAR*. Только Мванза без параметризации конвекции дала не очень плохие результаты.

Из Рисунок 4.15, Букоба модель без параметризации конвекции (красная полоса) плохо коррелировала с наблюдаемыми событиями с осадками (зеленая полоса) при прогнозировании событий с осадками, чем с параметризацией конвекции (синяя полоса).

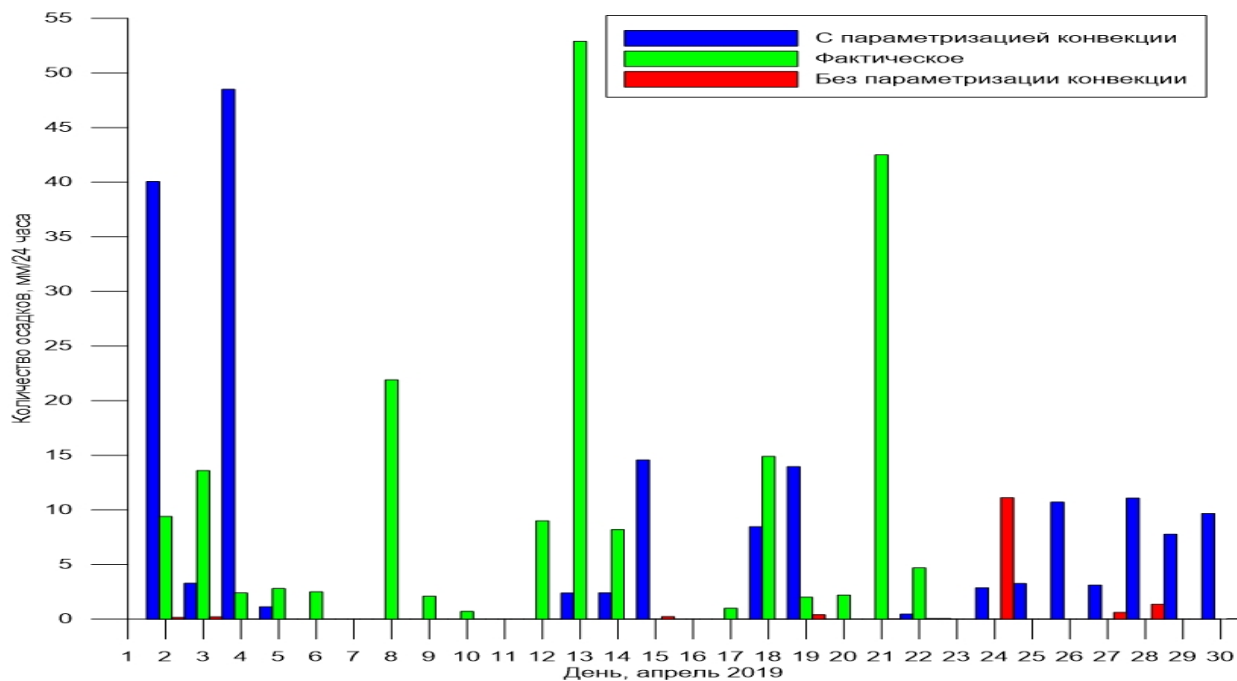


Рисунок 4.15 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Букоба, апрель 2019 года.

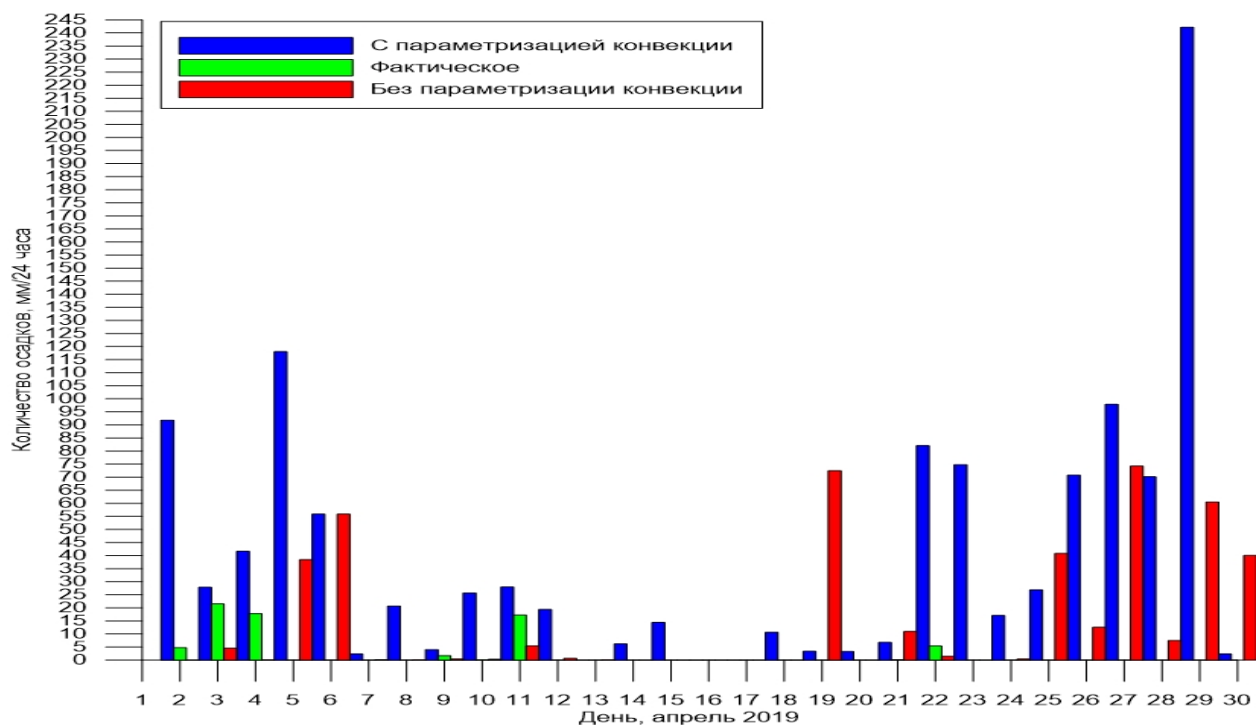


Рисунок 4.16 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Занзибар, апрель 2019 года.

Из Рисунок 4.16 видно, что модель без параметризации конвекции (красная полоса) и с параметризацией конвекции (синяя полоса) плохо коррелирует с наблюдаемыми событиями с осадками (зеленая полоса) при прогнозировании событий с осадками на Занзибар.

4.3.6 Матрицы сопряжённости для сухого сезона С конвекцией (июнь 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	12	2	14
Нет	2	1	3
Сумма	14	3	17

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0

Сумма	17	0	17
-------	----	---	----

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	0	8
Нет	8	1	9
Сумма	16	1	17

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	0	8
Нет	9	0	9
Сумма	17	0	17

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	15	0	15
Нет	2	0	2
Сумма	17	0	17

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	16	0	16
Нет	1	0	1
Сумма	17	0	17

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	8	1	9
Нет	5	3	8
Сумма	13	4	17

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	15	1	16
Нет	1	0	1
Сумма	16	1	17

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	6	0	6
Нет	11	0	11
Сумма	17	0	17

4.3.7 Матрицы сопряжённости для сухого сезона
Без параметризации конвекции (июнь 2019 г.)

Букоба

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	14	3	17
Нет	0	0	0
Сумма	14	3	17

Додома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Иринга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Дар-эс-Салаам

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	10	0	10
Нет	6	1	7
Сумма	16	1	17

Килиманджаро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	11	0	11
Нет	6	0	6
Сумма	17	0	17

Кигома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Морогоро

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	14	0	14
Нет	3	0	3
Сумма	17	0	17

Мтвара

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	13	0	13
Нет	4	0	4
Сумма	17	0	17

Мусома

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	14	3	17
Нет	0	0	0
Сумма	14	3	17

Мванза

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	15	1	16
Нет	1	0	1
Сумма	16	1	17

Сонгеа

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Сумбаванга

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Табора

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	17	0	17
Нет	0	0	0
Сумма	17	0	17

Занзибар

	Наблюдаемое событие		
Прогнозируемое событие	Да	Нет	Сумма
Да	6	0	6
Нет	11	0	11
Сумма	17	0	17

Июнь является месяцем без осадков (сухой сезон) с низкой конвективной активностью для всей исследуемой территории, то все станции будут использованы для оценки того, насколько лучше модель с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции могла прогнозировать события без осадков с использованием трех, описанных ранее индексов – B , POD и FAR .

4.3.7 Значение B

Таблица 4.12 – Сравнение значений индекса B

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	1,00	1,21
Дар-эс-Салаам	0,50	0,63
Додома	1,00	1,00
Иринга	1,00	1,00
Килиманджаро	0,47	0,65
Кигома	1,00	1,00
Мтвара	0,94	0,82
Мусома	0,69	1,21
Мванза	1,00	1,00
Сонгеа	1,00	1,00
Морогоро	0,88	0,82
Табора	1,00	1,00
Занзибар	0,35	0,35
Сумбаванга	1,00	1,00
Средний	0,85	0,91

Отличное значение B равно 1 [43]. Рассматривая значение на каждой станции, модель с параметризацией конвекции оценила хорошие события без осадков на 9 станциях из 14, за исключением Дар-эс-Салаама, Килиманджаро, Мусомы, Морогоро и Занзибара. Без параметризации конвекции модель хорошо оценила события без осадков на 7 станциях из 14.

Модель с параметризацией конвекции завышала оценку события без осадков только на 2 станции (Букоба и Мусома) из 14.

Модель с параметризацией конвекции занижала оценку события без осадков на 5 станциях из 14, в то время как модель без параметризации

конвекции также занижала оценку события без осадков только на 5 станциях из 14.

Среднее значение B для модели без параметризации конвекции показывает лучший оценку, чем с параметризацией конвекции, сравнивая значения B для каждой станции и средние значения для всех 14 станций.

4.3.8 Значение POD .

Таблица 4.13 - Сравнение значений POD .

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	0,86	1,00
Дар-эс-Салаам	0,50	0,63
Додома	1,00	1,00
Иринга	1,00	1,00
Килиманджаро	0,47	0,65
Кигома	1,00	1,00
Мтвара	0,94	0,82
Мусома	0,62	1,00
Мванза	0,94	0,94
Сонгеа	1,00	1,00
Морогоро	0,88	0,82
Табора	1,00	1,00
Занзибар	0,35	0,35
Сумбаванга	1,00	1,00
Средний	0,83	0,87

Идеальное значение оценки POD равно 1 или значениям, близким к 1 [43]. Модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 10 станциях из 14 за исключением Занзибара, Мусомы,

Килиманджаро и Дар-эс-Салаама. Без параметризации конвекции модель прогнозировала события без осадков на 12 станциях из 14 за исключением Занзибара и Дар-эс-Салаама.

Среднее значение *POD* для модели с параметризацией конвекции и без нее составило 0,83 и 0,87 соответственно для всех станций.

В целом, модель в обоих случаях (с параметризацией конвекции и без нее) хорошо прогнозировала события без осадков. Но значения *POD* на каждой станции и средние значения для всех станций, модель без параметризации конвекции дала лучшие результаты, чем с параметризацией конвекции.

4.3.9 Значение *FAR*

Таблица 4.14 - Сравнение значений *FAR*.

Станции	С параметризацией конвекцией	Без параметризации конвекции
Букоба	0,14	0,18
Дар-эс-Салаам	0,00	0,00
Додома	0,00	0,00
Иринга	0,00	0,00
Килиманджаро	0,00	0,00
Кигома	0,00	0,00
Мтвара	0,00	0,00
Мусома	0,11	0,18
Мванза	0,06	0,06
Сонгеа	0,00	0,00
Морогоро	0,00	0,00
Табора	0,00	0,00
Занзибар	0,00	0,00
Сумбаванга	0,00	0,00
Средний	0,02	0,03

Среднее значение FAR для модели с параметризацией конвекции и без нее для всех станций показывают хорошие результаты - 0,02 и 0,03 соответственно. Также если посмотреть на значения FAR на каждой станции, то в обоих случаях получены хорошие результаты для события без осадков.

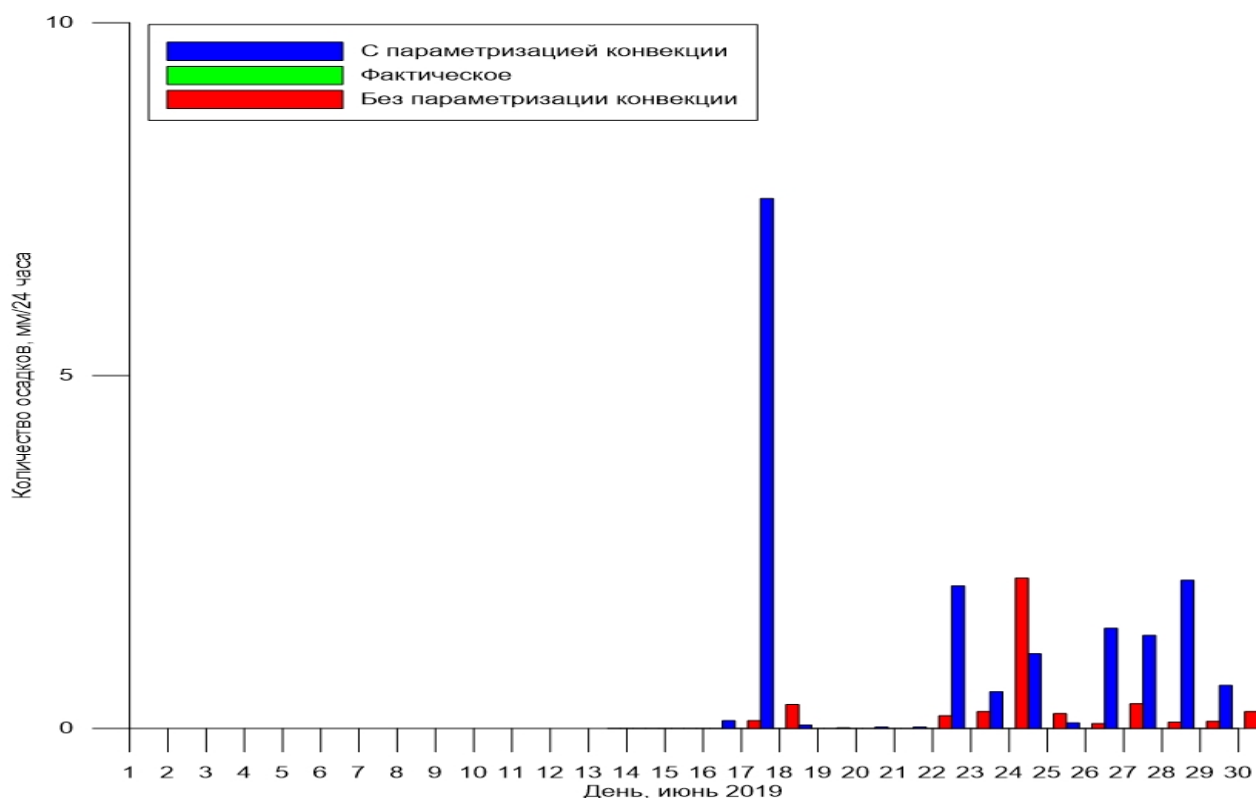


Рисунок 4.17 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Занзибар, июнь 2019 года.

Из Рисунок 4.17 видно, что модель без параметризации конвекции (красная полоса) и с параметризацией конвекции (синяя полоса) плохо коррелирует с наблюдаемыми события без осадков (зеленая полоса) при прогнозировании события без осадков на Занзибар.

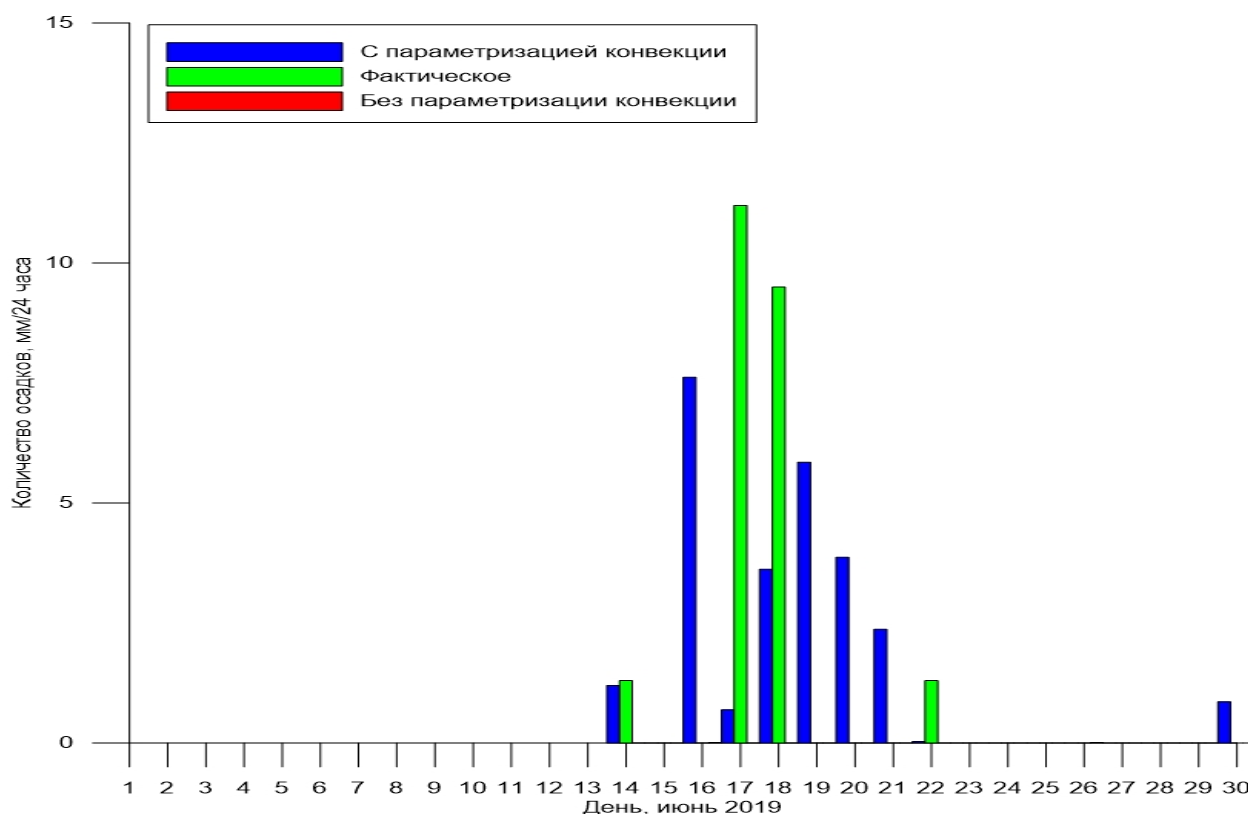


Рисунок 4.18 - Прогностическое и фактическое количество осадков с параметризацией конвекции и без нее. Мусома, июнь 2019 года.

Из Рисунок 4.18, Мусома модель с параметризацией конвекции (синяя полоса) плохо коррелировала с наблюдаемыми события без осадков (зеленая полоса) при прогнозировании события без осадков, чем без параметризации конвекции (красная полоса).

4.3.10 Выводы

Резюмируя всё вышесказанное можно сделать следующие выводы:

Значения *POD* для влажного сезона (апрель 2019 г.) на 9 суток заблаговременность для событий с осадками показала, что модель с параметризацией конвекции показала хороший результат на 5 станциях (бимодальные районы) из 7, которые получают осадки два раза в год, также модель без параметризации конвекции показала хороший результат на 5 станциях из 7, за исключением 2 станций (Букоба и Мусома).

Для всех 14 станций модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала событий с осадками на 9 станциях из 14 по сравнению с моделью без параметризации конвекции, которая хорошо прогнозировала событий с осадками на только 5 станциях из 14.

Средние значения *POD* показывают, что модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала событий с осадками со средним значением 0,78, по сравнению с моделью без параметризации конвекции, которая имеет значение 0,67 из 7 выбранных станций. Для всех 14 станций модель с параметризацией конвекции показала хорошие результаты со средним значением 0,74 по сравнению с моделью без параметризации конвекции, среднее значение которой составило 0,54.

Значения *POD* для сухого сезона (июнь 2019 г.) показывают, что модель с параметризацией конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 10 станциях из 14, за исключением 4 станций (Мусома, Занзибар, Дар-эс-Салам и Килиманджаро). Модель без параметризации конвекции хорошо прогнозировала события без осадков на 12 станциях из 14, за исключением 2 станций (Занзибар и Дар-эс-Салам).

Среднее значение *POD* для всех 14 станций для модели с параметризацией конвекции и без нее показывают хорошие результаты. Модель с параметризацией конвекции лучше прогнозировала события без осадков в выбранном месяце со средним значением *POD* 0,87, чем модель с параметризацией конвекции, среднее значение которой составило 0,83.

Успешность прогноза, правильность прогноза для влажного сезона (апрель 2019 г.) на 9 суток заблаговременность для событий с осадками на 14 станций показала, что модель с параметризацией конвекции имеет значение 74%, а модель без параметризации конвекции имеет значение 54%. Для сухого сезона (июнь 2019 г.) для событий без осадков на 14 станций показала, что модель с параметризацией конвекции имеет значение 83%, а модель без параметризации конвекции имеет значение 87%.

Для влажного сезона (апрель 2019 г.) для событий с осадками модель с параметризацией конвекции показала лучшие результаты, чем модель без параметризации конвекции. Для сухого сезона (июнь 2019 г.) для событий без осадков модель без параметризации конвекции показала лучшие результаты, чем модель с параметризацией конвекции.

Заключение

В процессе проведения исследований в рамках выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации) мезомасштабная гидродинамическая модель WRRF-ARW была адаптирована в территории Республики Танзания – был выбран домен для моделирования и определены его характеристики (шаги по горизонтальным переменным, количество уровней по вертикали, величина шага по времени, набор параметризаций физических процессов).

Качество моделирования такого сложного процесса, как осадкообразование определяется в первую очередь качеством параметризацией процессов, влияющих на фазовые переходы и распространение влаги в атмосфере. Поэтому численные эксперименты по адаптации модели WRF-ARW к решению поставленных задач началось с выбора лучшего метода описания конвекции. Поскольку шаг по горизонтали был достаточно невелик (5 км), то конвективные процессы в тропической зоне могут перейти из разряда подсеточных в сеточные и есть вероятность, что они будут явно описаны уравнениями модели. В связи с этим было решено проводить два типа численных экспериментов с параметризацией конвекции и без параметризации конвекции.

После проведения исследования была разработана версия модели WRF-ARW, которая может быть использована для прогнозирования событий с осадками и событий без осадков во влажный сезон и сухой сезон соответственно на территории Танзании.

В результате верификации результатов моделирования была разработана рекомендация к использованию модели WRF-ARW для прогноза осадков на территории Танзании:

качество прогнозов осадков на территории Танзании зависит от региона (бимодальный/унимодальный) и от сезона (влажный или сухой);

для прогнозирования событий с осадками во влажный сезон необходимо использовать модель с параметризацией конвекции, а для прогнозирования осадков в сухой сезон необходимо использовать модель без параметризации конвекции;

качество прогноза осадков значительно ухудшается в регионах с сильно изменчивой орографией (северо-запад модельной области) и на границе суша-вода (озёра Танганьика, Виктория (особенно Виктория) и Ньяса, а также на побережье Индийского океана);

выявлена систематическая ошибка прогноза осадков в сухой сезон – она составляет 5 мм/12 часов. Удаление этого количества осадков из прогностических полей позволяет повысить качество прогнозов осадков;

возможен прогноз осадков на более длинный период, но качество прогноза значительно ухудшается, особенно для влажного сезона (в одной из конфигураций модели до 54%).

Для улучшения качества прогноза осадков на территории Танзании необходимо продолжать адаптацию модели, рассматривая другие схемы параметризации и вложенные сетки, которые могут дать наилучшие результаты для различных районов Танзании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gene, J., and Miller, N. (2007). Intercomparison of the performance of CLM3, NOAH, RUC, and STD land surface schemes in weather forecasting and research models. American Geophysical Union.
2. Kuo, H. Y., Bresch, J. F., Chang, M. D., and Kane, J. (1996). Resume of a Mini seminar on cumulus parameterization for mesoscale models.
3. Otieno, G., Mutemi, J., Opija, F., Ogallo, L., Artan, G., and Omondi, H. (2018) Impact of cumulus parameterization on simulated precipitation over East Africa. Atmospheric and Climate Sciences. № 8.
4. Vanders N. & Wood. E.F. (2016). Improving the quality of subseasonal meteorological forecasts using weighted multi-model ensemble modeling. № 11.
5. Goines D. K., Kennedy A. Д. (2018). Precipitation from the WRF multi-year convection-resolving simulations database, Journal of Geophysical Research: Atmosphere. № 10.
6. Skamarok V. K. (2004). Estimation of mesoscale NWP models using kinetic energy spectra.3019-3032.
7. Dirdorf, J. W. (1977). Parameterization of surface moisture content for use in atmospheric prediction models. Journal of Applied Meteorology. № 16.1182-1185.
8. Skamarok W.K., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., and Powers J.G. (2008). Description of an advanced WRF version 3 study. NCAR technical note.
9. Azam, M., Vishwas, R., and Adrian, S. (2021). Machine learning-based algorithms for quantifying uncertainty in numerical weather prediction models, Journal of Computational Science.

10. Stensrud, D.J. and Yussuf, N. (2007). Robust probabilistic quantitative precipitation forecasts from an ensemble short-range prediction system, No. 22.3-17.
11. Permana, G. (2009). Ensemble prediction using CCAM (conformal cubic atmospheric model) for rainfall probability prediction in Java (in Indonesian). Undergraduate dissertation, Bandung Institute of Technology.
12. Matata, P., Bushesha, M. and Msindai, J. (2019). Estimating changes in precipitation and temperature in semi-arid regions of Tanzania. *American Journal of Climate Change*, no. 8.173-189.
13. Skamarok, V. K., and Klemp, J. B. (2007). A nonhydrostatic time-division atmospheric model for NWP research and applications. *J. Comp. Phys.*, Special Issue on Environmental Modeling.
14. Zorita, E. and Tilla, F. (2002). Precipitation variability in Northern Tanzania during the March-May season (continuous rainfall) and its relationship to large-scale climatic forcing. *Climate Research*, no. 20.31-40.
15. R. Pietrelli and P. Scaramozzino. (2019). Internal migration is an effective risk management strategy for households in rural Tanzania, 9 Luglio.
16. Skamarok W. K., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., and Powers J. G. (2005). Description of an advanced WRF version 2 study. NCAR Tech Notes-468+STR.
17. Kessler, E. (1969). On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. In: On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. *Meteorological Monographs*, vol 10. American Meteorological Society, Boston, MA.
18. Lin, Y., and B. A. Colle, 2011: A New Bulk Microphysical Scheme That Includes Riming Intensity and Temperature-Dependent Ice Characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1013–1035.

19. Hong, S., J. Dudhia, and S. Chen, 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
20. Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115
21. Morrison, H., G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 991–1007
22. Kain, J. S., 2004: The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 43, 170–181.
23. Janjić, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
24. Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784–2802.
25. Dudhia, Jimmy, 1996: A multi-layer soil temperature model for MM5. the Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop.
26. Niu, Guo–Yue, Zong–Liang Yang, Kenneth E. Mitchell, Fei Chen, Michael B. Ek, Michael Barlage, Anil Kumar, Kevin Manning, Dev Niyogi, Enrique Rosero, Mukul Tewari, Youlong Xia, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local–scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109.

27. Lawrence, D. M., et al., 2011: Parameterization improvements and functional and structural advances in Version 4 of the Community Land Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 3, M03001.
28. Hong, S., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
29. Janjić, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
30. Hong, S., and H. Pan, 1996: Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
31. Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
32. Chou M.-D., and M. J. Suarez, 1994: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo. 104606, 3, 85pp
33. Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.
34. Wicker, L. J. and Skamarok, V. K. (2002). Time splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.*, no. 130.2088-2097.
35. Wanders, N., and Wood, E.F. (2016). Improving the quality of subseasonal meteorological forecasts using weighted multi-model ensemble modeling. *Environ. Res. Lett.*, no. 11.1748-9326.
36. Song H J, Song B J, and Hashino T. (2017). Idealized numerical experiments on the microphysical evolution of warm rainstorms, *J. Geos. Res.* 1685-1699.

37. Kessler, E. O. (1969). Distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. Meteorological Monographs, No. 32.88.
38. Trenberth, C.E. and Shea, D.J. (2005). Relationship between precipitation and surface temperature. Geophys. Res. Lett., 32.
39. Mooney, P. A., Mulligan, F. J. and Feeley, R. (2013). Assessing the sensitivity of a weather research and prediction model to parameterization schemes for regional climates in Europe over the 1990-95 period. Journal of Climate, no. 3.
40. Klemp J. B., Skamarok V. K. and Dudhia J. (2007). Conservative splitting time integration methods for compressible nonhydrostatic equations.
41. Bugo, P. (2003). WGNE recommendations on validation methods for numerical forecasting of weather elements and severe weather events.
42. Wilkes, D.S. (1995). Statistical Methods in Atmospheric Sciences: An Introduction.
43. Jolliffe, E.T. and Stevenson, D.B. (2003). Verification of forecasts: A practitioner's guide to atmospheric science.
44. Stanski, H.R., Wilson, L.J., and Burrows, W.R. (1989). A review of common verification methods in meteorology (WMO Research Report No. 89-5.
45. Cherubini, T., Gelli, A., and Lalaurette, F. (2001). Validation of precipitation predictions over the Alpine region using a high-density observational network.
46. Murphy A.H. and Winkler R.L. (1987). A general framework for prediction verification.
47. Stevenson, D.B. (2000). Using the "likelihood ratio" to diagnose prediction skill.
48. Thorncroft J.E. and Stevenson D.B. (2001). How to judge the quality and value of weather forecast products.
49. Donner L. J. (1993). A cumulus parameterization including mass fluxes, vertical momentum dynamics, and mesoscale effects. J. Atmos. Sci., 50, 889–906.

50. Kreitzberg C. W. and Perkey D. J. (1976). Release of potential instability: Part I. A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. *J. Atmos. Sci.*, 33, 456–475.

51. Miyakoda K. and Sirutis J. (1977). Comparative integrations of global models with various parameterization processes of subgrid-scale vertical transport. Description of the parameterization. *Contrib. Atmos. Phys.*, 50, 445-277.

Приложение А – Скрипты – ARWpost.

Для преобразования файлов wrfout_d01 в формат NetCDF.

```
&datetime
start_date = '2019-06-30_12:00:00',
end_date   = '2019-07-09_12:00:00',
interval_seconds = 43200,
tacc = 0,
debug_level = 0,
/
&io
input_root_name = './wrfout_d01_2019-06-30_12:00:00'
output_root_name = './30-06-2019_CONV'
plot = 'all_list'
fields = 'height,pressure,RAINNC'
mercator_defs = .true.
/
&interp
interp_method = 1,
interp_levels =
1000.,950.,900.,850.,800.,750.,700.,650.,600.,550.,500.,450.,400.,350.,300.,250.,200.,150.,100.,
extrapolate = .true.
/
```

Приложение Б – Скрипты – GrADS.
Для обработки рисунков.

```
'reinit'
'open 30-06-2019_CONV.ctl'
level=1000
'set lev 'level
'set mpdset hires'
'set grads off'
tim=2
while(tim<20)
'set t 'tim
'define tt='tim'-1'
'set gxout shaded'
'color -gxout shaded 2 30 2 -kind white->blue->mistyrose->red->maroon'
'd RAINNC(t='tim')+RAINC(t='tim')-RAINNC(t='tim-1')-RAINC(t='tim-1')'
'cbar'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'draw title RAINFALL, mm/12 hour; ' time
'set line 1'
'set string 1 br 6'
'q w2xy 31.8 -1.3'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' BUKOBA'
'q w2xy 39.2 -6.9'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' DAR'
'q w2xy 35.8 -6.2'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' DODOMA'
'q w2xy 35.8 -7.6'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' IRINGA'
'q w2xy 37.1 -3.4'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' KIA'
'q w2xy 29.7 -4.9'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
```

```

'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' KIGOMA'
'q w2xy 40.2 -10.4'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MTWARA'
'q w2xy 33.8 -1.5'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MUSOMA'
'q w2xy 32.9 -2.5'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MWANZA'
'q w2xy 35.6 -10.7'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.15'
'draw string ' x2' 'y2' SONGEA'
'q w2xy 37.6 -6.8'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MOROGORO'
'q w2xy 32.8 -5.1'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' TABORA'
'q w2xy 39.2 -6.2'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' ZANZIBAR'
'q w2xy 31.6 -7.6'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' SUMBAWANGA'
'printim 1/conv0506_'tim'.png white'
tim=tim+1
'c'
endwhile
end

```

Приложение В – Программа (Fortran).

Для нахождения номера узла станции (i и j) в прогностических модельных полях и верификации результатов моделирования

```
integer,parameter :: NX=349,NY=299,NT=19
real,dimension (NX,NY) :: XLAT,XLON
real,dimension (NX,NY,NT) :: RAINC,RAINNC,RAINSH
real,dimension (NX,NY,19) :: F19
real,dimension (NX,NY,4) :: F4
real,dimension (NX,NY,1) :: F1
real,dimension (30) :: OBS
!character*2,dimension (2) :: SROK=('/00','12'/)
character*19 nameFILE
character*9 nameST
character*3 month
character*2 Cnachalo
character*11 dataPR
real M
integer ReclZap
ReclZap=NX*NY*19*33+NX*NY*4*4+NX*NY*84
open(3,file='data.csv')
read(3,'(3/)') !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
read(3,*) nameST,month,OBS ; write(*,*) nameST,month !,OBS
close(3)
open(55,file='./forecastCONV/list.txt')
do while(.not.EOF(55))
  read(55,'(a19)') nameFILE
  dataPR(1:11)=nameFILE(1:11)
  Cnachalo(1:2)=dataPR(1:2)
  read(Cnachalo,'(i3)') inn
  open(30,file=trim(namest)//'.dat')
  open(1,file='./forecastCONV///nameFILE,form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap)
  !open(1,file='01-04-
2019_CONV.dat',form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap)
  !write(*,*) nameFILE
  itt=2
  do it=2,NT,2 ; !write(*,*) it
    read(1,rec=it)
    (F19,i=1,3),(F1,i=1,4),F19,(F1,i=1,4),F19,F19,F1,(F19,i=1,8),XLAT,XLON,F1,F1,(F24,i=1,7),(
    F1,i=1,3),&
    (F19,i=1,3),(F1,i=1,6),(F19,i=1,8),(F1,i=1,3),(F4,i=1,4),(F1,i=1,17),(F19,i=1,2),(F1,i=1,10),RAI
    NC(:,itt),RAINSH(:,itt),RAINNC(:,itt)
    itt=itt+1
  enddo
  close(1)
  open(2,file='LATLON.dat')
  write(2,'(2a7,2a10)') 'i','j','lat','lon'
  write(2,'(2i7,2F10.3)') ((i,j,XLAT(i,j),XLON(i,j),i=1,NX),j=1,NY)
  close(2)
```

```

do i=1,NX
  do j=1,NY
    if(XLAT(i,j)>-1.7.and.XLAT(i,j)<-1.3) then
      if(XLON(i,j)>33.6.and.XLON(i,j)<34.0) then
        XLAT_MUS=XLAT(i,j)
        XLON_MUS=XLON(i,j)
        write(*,*) i,j,XLAT(i,j),XLON(i,j)
      endif
    endif
  enddo
enddo
! Для DODOMA
!   i_1=160
!   j_1=149
! Для Мусома
!   i_1=115
!   j_1=253
write(*,*) Xlon(i_1,j_1),xlat(i_1,j_1)
write(30,'(a22,5a10)') 'data','RAINNC','RAINSH','RAINNC','SUMMA','OBS'
do it=2,10
  write(30,'(a18,"+",i3,5f10.2)')          dataPR,it*12,RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINNC(i_1,j_1,it-
1),RAINSH(i_1,j_1,it)-RAINSH(i_DOD,j_DOD,it-1), RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINNC(i_1,j_1,it-
1), &
          RAINC(i_1,j_1,it)+RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINC(i_1,j_1,it-1)-
RAINNC(i_1,j_1,it-1),OBS(it+inn)
enddo
enddo
stop
end

```

```

integer,parameter :: NX=349,NY=299,NT=19
real,dimension (NX,NY) :: XLAT,XLON
real,dimension (NX,NY,NT) :: RAINC,RAINNC,RAINSH
real,dimension (NX,NY,19) :: F19
real,dimension (NX,NY,4) :: F4
real,dimension (NX,NY,1) :: F1
real,dimension (30) :: OBS
!character*2,dimension (2) :: SROK=('/00','12/')
character*19 nameFILE
character*9 nameST
character*3 month
character*2 Cnachalo
character*11 dataPR
real M
integer ReclZap
ReclZap=NX*NY*19*33+NX*NY*4*4+NX*NY*84
open(3,file='data.csv')
read(3,'(25/)') !STATION NUMBER IN STATION DATA FILE!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
read(3,*) nameST,month,OBS ; !write(*,*) nameST,month,OBS

```

```

close(3)
open(55,file='./aforecastCONV/list.txt')
do while(.not.EOF(55))
  read(55,'(a19)') nameFILE
  dataPR(1:11)=nameFILE(1:11)
  Cnachalo(1:2)=dataPR(1:2)
  read(Cnachalo,'(i3)') inn
  open(30,file=trim(namest)//'2023.dat')
open(1,file='./aforecastCONV///nameFILE,form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap)
!open(1,file='01-06-
2019_CONV.dat',form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap)
write(*,*) nameFILE
itt=1
do it=1,NT,2 ; !write(*,*) it
  read(1,rec=it)
(F19,i=1,3),(F1,i=1,4),F19,(F1,i=1,4),F19,F19,F1,(F19,i=1,8),XLAT,XLON,F1,F1,(F19,i=1,7),(
F1,i=1,3), &
(F19,i=1,3),(F1,i=1,6),(F19,i=1,6),(F1,i=1,3),(F4,i=1,4),(F1,i=1,27),RAINNC(:, :,itt),RAINSH(:, :,it
t),RAINNC(:, :,itt)
  itt=itt+1
enddo
close(1)
write(*,*) itt-1,inn
do i=1,NX
  do j=1,NY
    if(XLAT(i,j)>-6.4.and.XLAT(i,j)<-6.0) then
      if(XLON(i,j)>35.6.and.XLON(i,j)<36.0) then
        XLAT_MUS=XLAT(i,j)
        XLON_MUS=XLON(i,j)
      endif
    endif
  enddo
enddo
! Для Zanzibar
i_1=257
j_1=55
write(30,'(a22,5a10)') 'data','RAINNC','RAINSH','RAINNC','SUMMA','OBS'
do it=2,10
  write(30,'(a18,"+",i3,5f10.2)') dataPR,(it-1)*24,RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINNC(i_1,j_1,it-
1),RAINSH(i_1,j_1,it)-RAINSH(i_1,j_1,it-1),RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINNC(i_1,j_1,it-1), &
  RAINC(i_1,j_1,it)-RAINC(i_1,j_1,it-1)+RAINSH(i_1,j_1,it)-
RAINSH(i_1,j_1,it-1)+RAINNC(i_1,j_1,it)-RAINNC(i_1,j_1,it-1),OBS(it-1+inn)
enddo
enddo
stop
end

```

Приложение Г – Скрипты для изображения разности прогностических полей осадков

```
'reinit'
'open 12-06-2019_CONV.ctl'
'open 12-06-2019_NOCONV.ctl'
level=1000
'set lev 'level
'set mpdset hires'
'set grads off'
tim=2
while(tim<20)
'set t 'tim
'define a=RAINNC.1(t='tim')+RAINNC.1(t='tim')-RAINNC.1(t='tim-1')-RAINNC.1(t='tim-1')
'define b=RAINNC.2(t='tim')+RAINNC.2(t='tim')-RAINNC.2(t='tim-1')-RAINNC.2(t='tim-1')
'define c=a-b'
'set gxout shaded'
'color -gxout shaded 0 50 5 -kind white->palegreen->lightgreen->darkseagreen->aquamarine-
>mediumturquoise->lightseagreen->darkblue'
'd c'
'cbar'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'draw title RAINFALL, mm/12 hour; ' time
'set line 1'
'set string 1 br 6'
'q w2xy 31.8 -1.3'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' BUKOBA'
'q w2xy 39.2 -6.9'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' DAR'
'q w2xy 35.8 -6.2'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' DODOMA'
'q w2xy 35.8 -7.6'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' IRINGA'
'q w2xy 37.1 -3.4'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' KIA'
```



```

'q w2xy 29.7 -4.9'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' KIGOMA'
'q w2xy 40.2 -10.4'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MTWARA'
'q w2xy 33.8 -1.5'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MUSOMA'
'q w2xy 32.9 -2.5'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MWANZA'
'q w2xy 35.6 -10.7'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.15'
'draw string ' x2' 'y2' SONGEA'
'q w2xy 37.6 -6.8'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' MOROGORO'
'q w2xy 32.8 -5.1'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' TABORA'
'q w2xy 39.2 -6.2'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' ZANZIBAR'
'q w2xy 31.6 -7.6'
x2=subwrđ(result,3)
y2=subwrđ(result,6)
'draw mark '3' 'x2' 'y2' 0.2'
'draw string ' x2' 'y2' SUMBAWANGA'
'printim delta/conv0506_'tim'.png white'
tim=tim+1
'c'
endwhile

```

Приложение Д - Данные наблюдений на станциях.

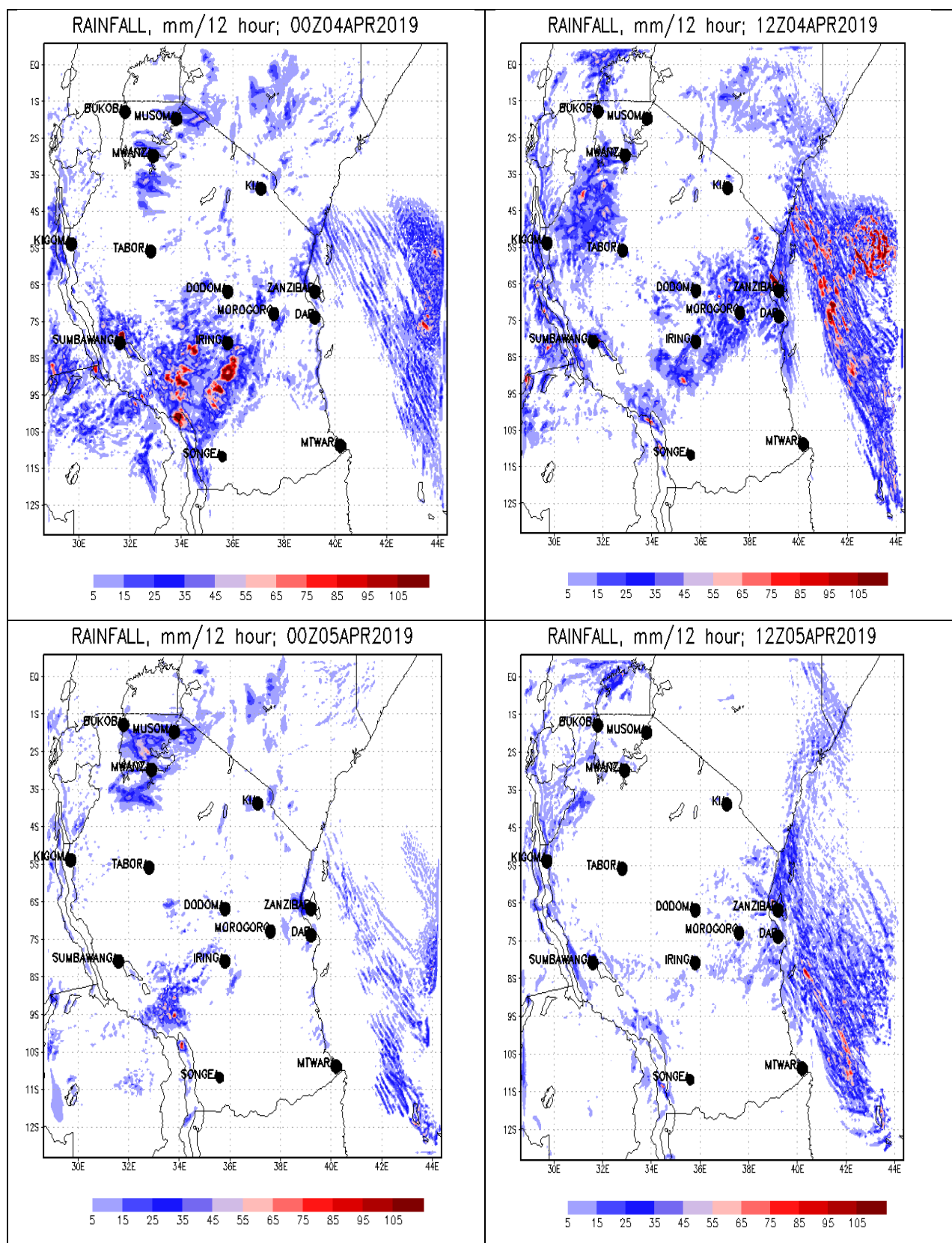
Данные о количестве осадков в мм									
		Букоба		Дар-эс-Салам		Додома		Иринга	
		Месяц		Месяц		Месяц		Месяц	
Год	Дата	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь
2019	1	7,0	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	2	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	0,0
2019	3	2,6	0,0	8,9	0,0	0,0	0,0	8,8	0,0
2019	4	1,2	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	6	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	5,9	0,0
2019	8	0,0	0,3	12,5	0,6	0,0	0,0	0,5	0,0
2019	9	35,9	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	10	9,4	0,0	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	11	13,6	0,0	20,4	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
2019	12	2,4	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	13	2,8	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	14	2,5	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	16	21,9	0,0	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	17	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	18	0,7	0,0	36,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0
2019	19	0,0	0,0	14,4	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
2019	20	9,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
2019	21	52,9	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	22	8,2	0,0	3,0	0,0	11,2	0,0	1,8	0,0
2019	23	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	25,7	0,0
2019	24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	25	1,0	0,5	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0
2019	26	14,9	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
2019	27	2,0	0,2	0,7	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
2019	28	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	29	42,5	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	30	4,7	0,0	1,6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0

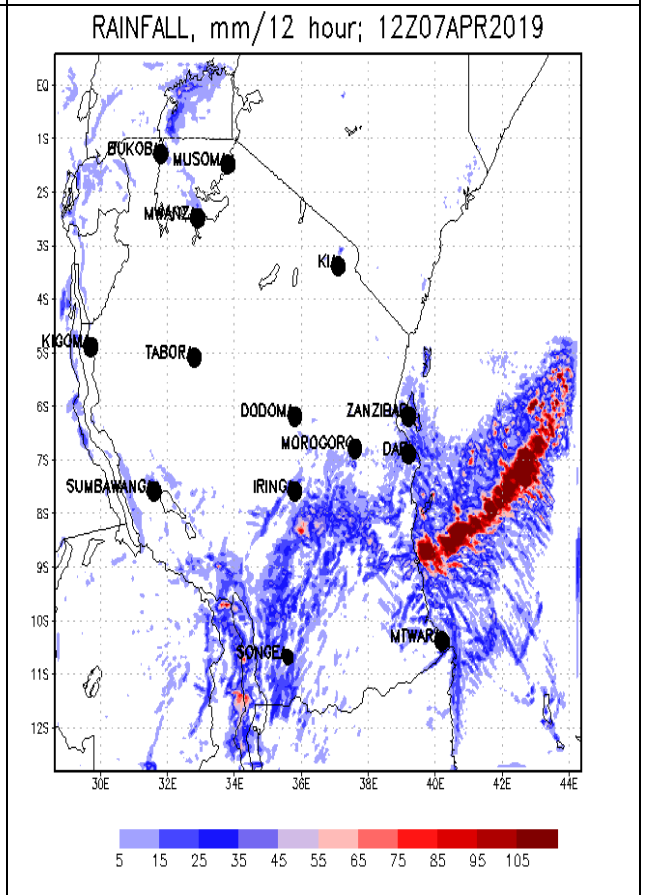
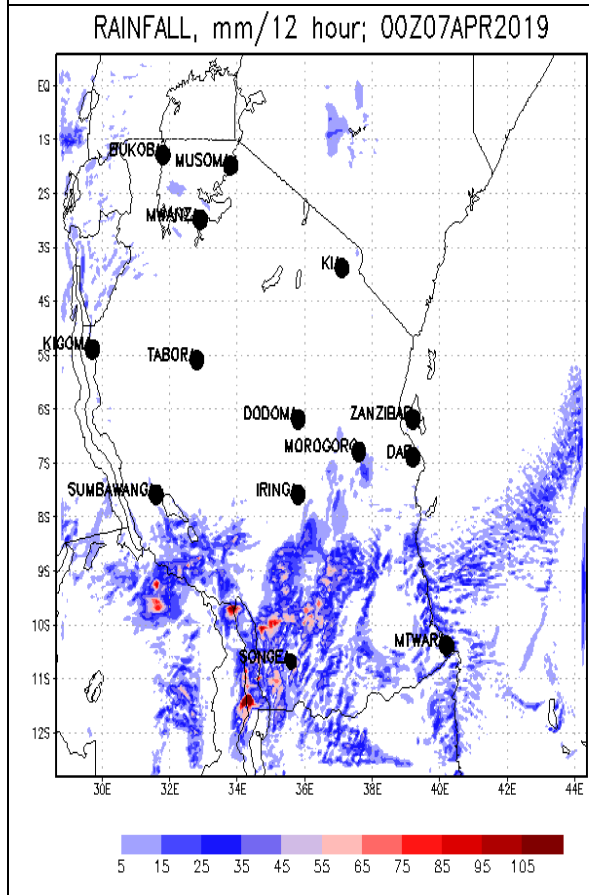
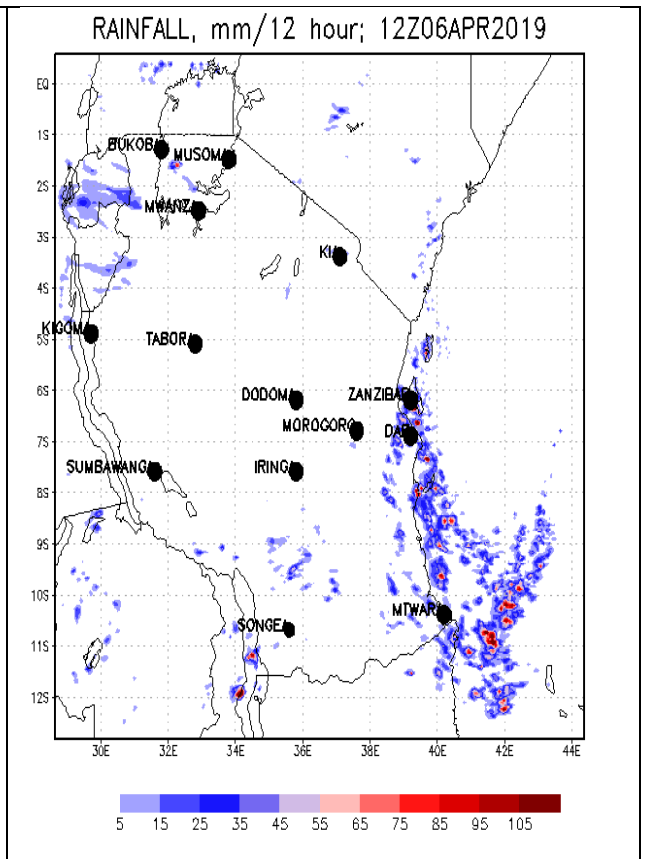
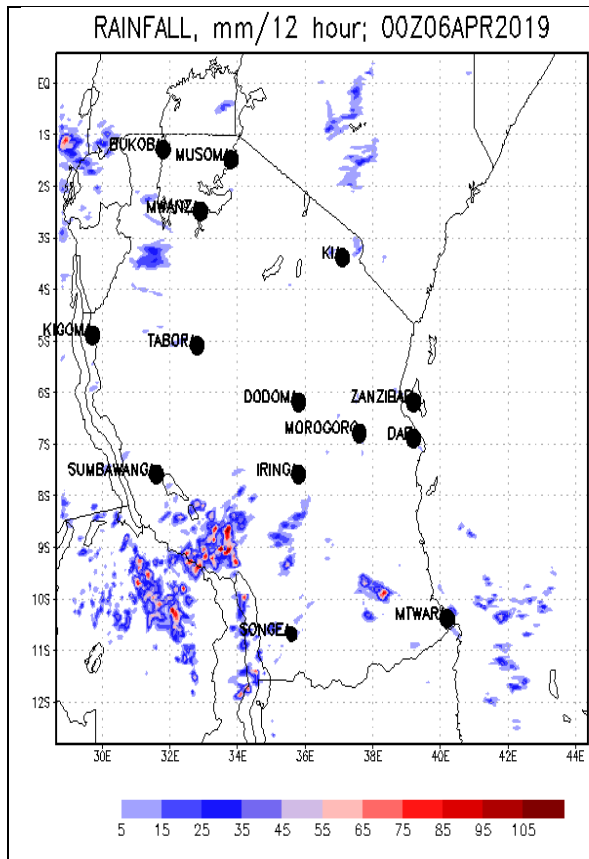
Данные о количестве осадков в мм									
		Килиманджаро		Кигома		Мтвара		Мусома	
		Месяц		Месяц		Месяц		Месяц	
Год	Дата	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь
2019	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	3	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	4	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	5,1	8,6
2019	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	3,8
2019	6	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	22,8
2019	7	0,0	0,0	0,0	0,0	22,1	0,0	0,0	0,0
2019	8	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2	0,0	6,5	1,7
2019	9	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,2	0,0
2019	10	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	1,8	0,0
2019	11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
2019	12	0,0	6,7	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0
2019	13	0,0	0,8	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	14	0,0	0,0	3,9	0,0	0,5	0,0	4,0	0,0
2019	15	0,0	0,0	6,3	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
2019	16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	18	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0
2019	19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
2019	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	6,4	0,0
2019	21	0,0	0,0	7,7	0,0	1,6	0,0	36,8	0,0
2019	22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
2019	23	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	24	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0
2019	25	0,6	0,0	21,0	0,0	10,1	0,0	0,2	11,2
2019	26	6,5	0,0	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	9,5
2019	27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
2019	28	2,1	0,0	6,5	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0
2019	29	2,9	0,0	3,6	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0
2019	30	1,8	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4	0,0

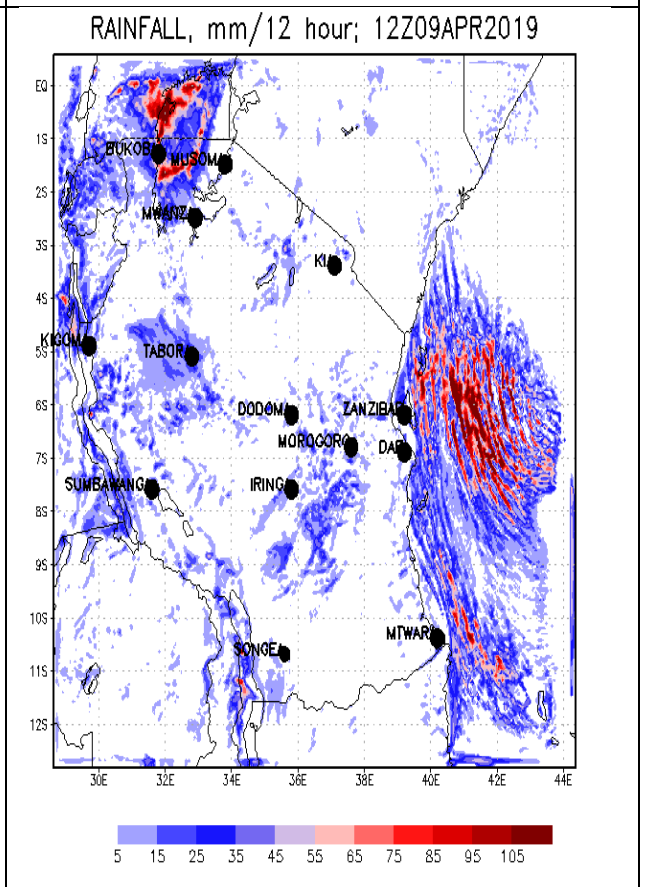
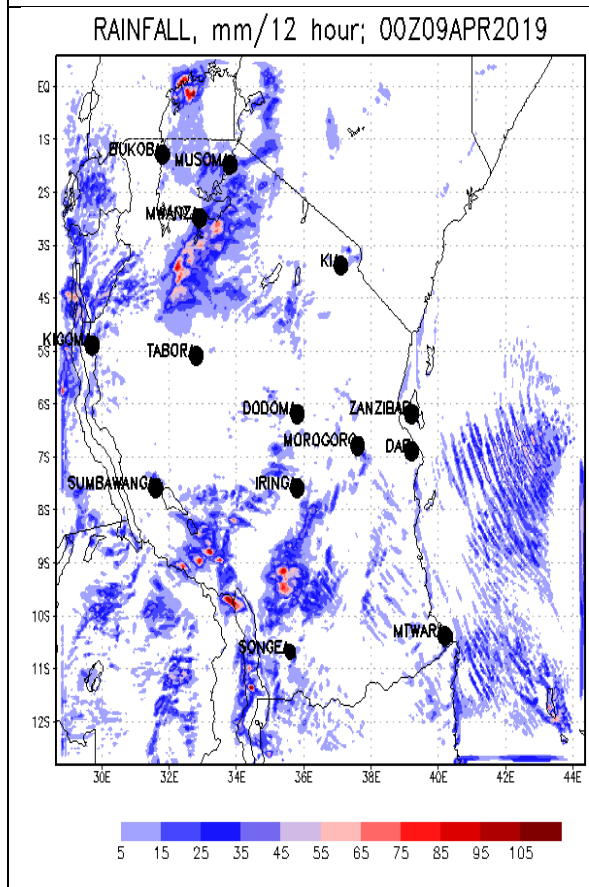
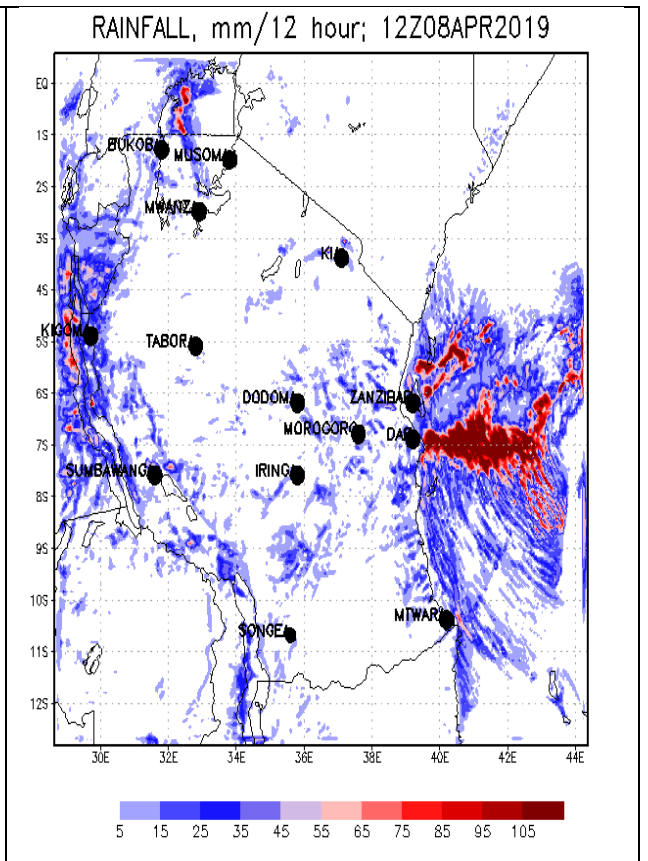
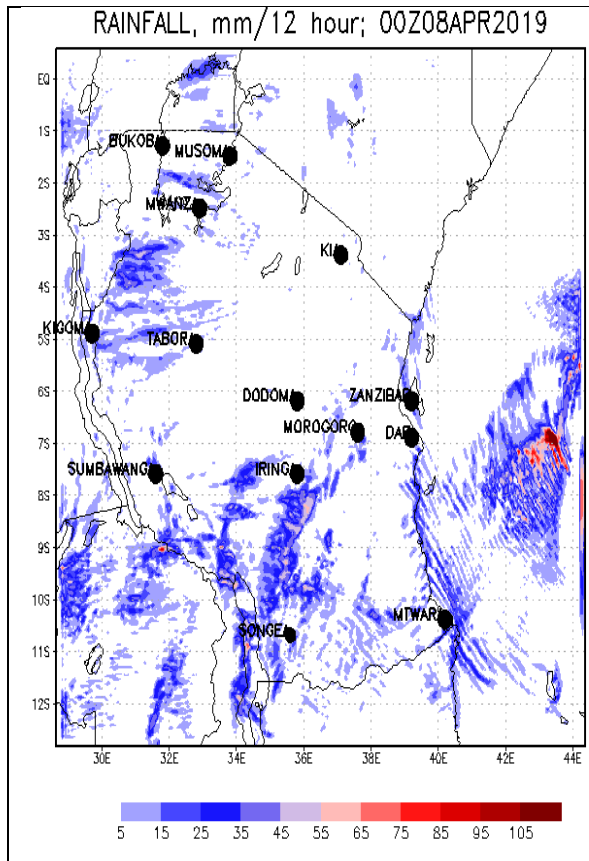
Данные о количестве осадков в мм							
		Мванза		Сонгеа		Морогоро	
		Месяц		Месяц		Месяц	
Год	Дата	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь
2019	1	2,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
2019	2	6,4	53,2	0,0	0,0	13,0	0,0
2019	3	4,8	0,0	0,0	0,0	90,8	0,0
2019	4	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0
2019	5	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0
2019	6	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0
2019	7	0,0	0,0	13,6	2,3	0,5	0,0
2019	8	0,0	0,0	7,0	0,0	9,3	0,0
2019	9	0,6	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
2019	10	0,0	0,0	16	0,0	0,0	0,0
2019	11	1,8	0,0	1,2	0,0	2,8	0,6
2019	12	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	0,6
2019	13	0,0	0,0	1,8	0,0	1,8	0,0
2019	14	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	17	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0
2019	18	0,0	0,0	12,0	0,0	10,2	0,0
2019	19	0,0	0,0	1,7	0,0	7,7	0,0
2019	20	0,8	0,0	0,0	0,0	13,1	0,0
2019	21	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	22	12,8	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0
2019	23	0,4	0,0	0,0	0,0	8,6	0,0
2019	24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	26	92,6	0,0	0,0	0,0	17,0	0,0
2019	27	12,8	0,0	0,3	0,0	1,0	0,0
2019	28	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
2019	29	12,6	0,0	0,0	0,0	33,8	0,0
2019	30	0,0	0,0	0,0	0,0	36,3	0,0

Данные о количестве осадков в мм							
		Табора		Занзибар		Сумбаванга	
		Месяц		Месяц		Месяц	
Год	Дата	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь	Апрель	Июнь
2019	1	3,9	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
2019	2	33,1	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0
2019	3	5,0	0,0	63,9	0,0	4,1	0,0
2019	4	4,5	0,0	0,7	0,0	0,9	0,0
2019	5	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	6	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0
2019	7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	0,0
2019	8	0,0	0,0	0,6	0,0	9,6	0,0
2019	9	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	0,0
2019	10	21,5	0,0	4,8	0,0	5,7	0,0
2019	11	5,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0
2019	12	0,0	0,0	17,8	0,0	0,0	0,0
2019	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	17	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
2019	18	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
2019	19	0,0	0,0	17,3	0,0	0,0	0,0
2019	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
2019	22	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	23	17,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	26	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	27	51,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	28	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019	29	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
2019	30	0,0	0,0	5,4	0,0	0,0	0,0

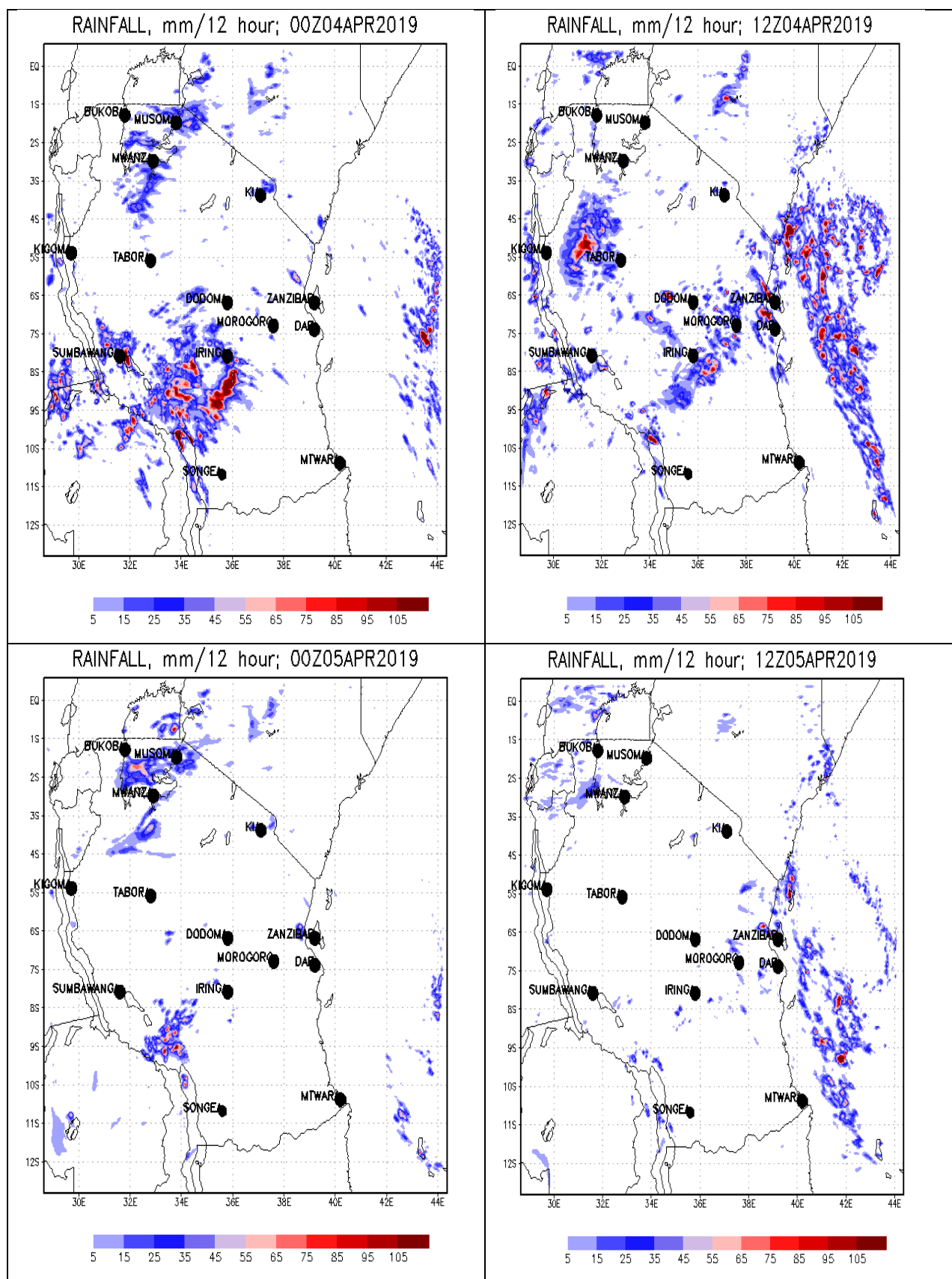
Приложение Е – Прогностические поля осадков
Апрель 2019 года с параметризацией конвекции

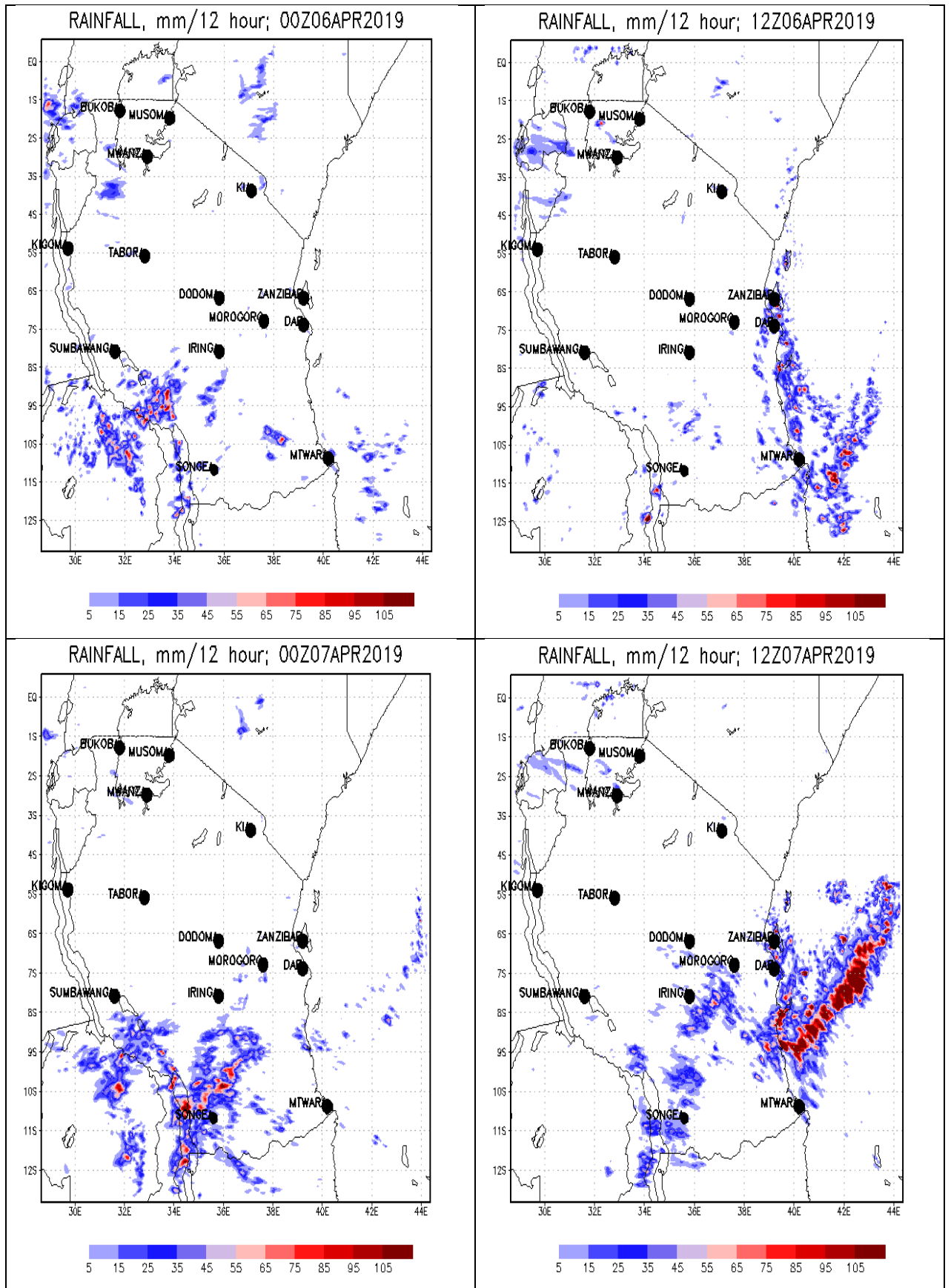


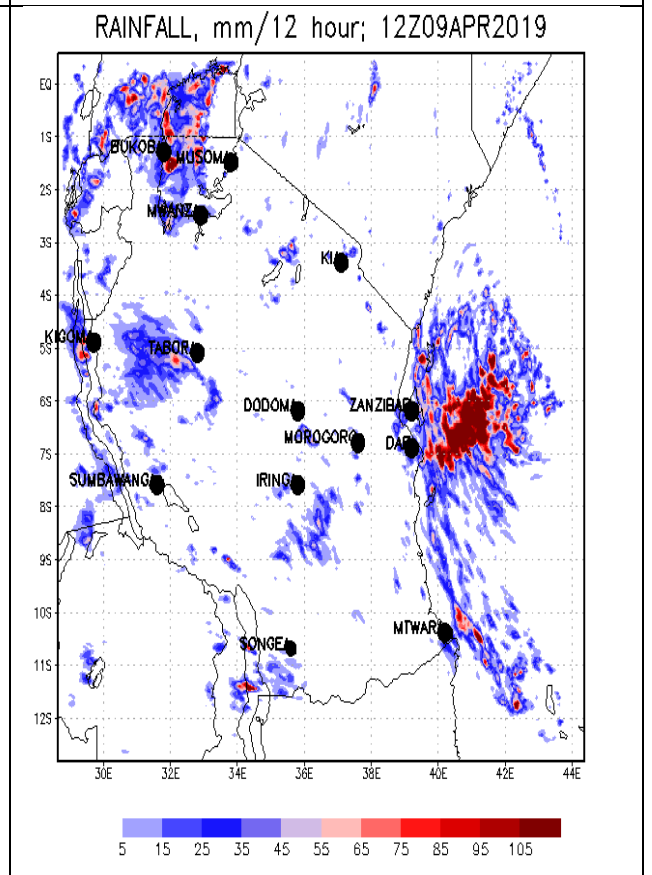
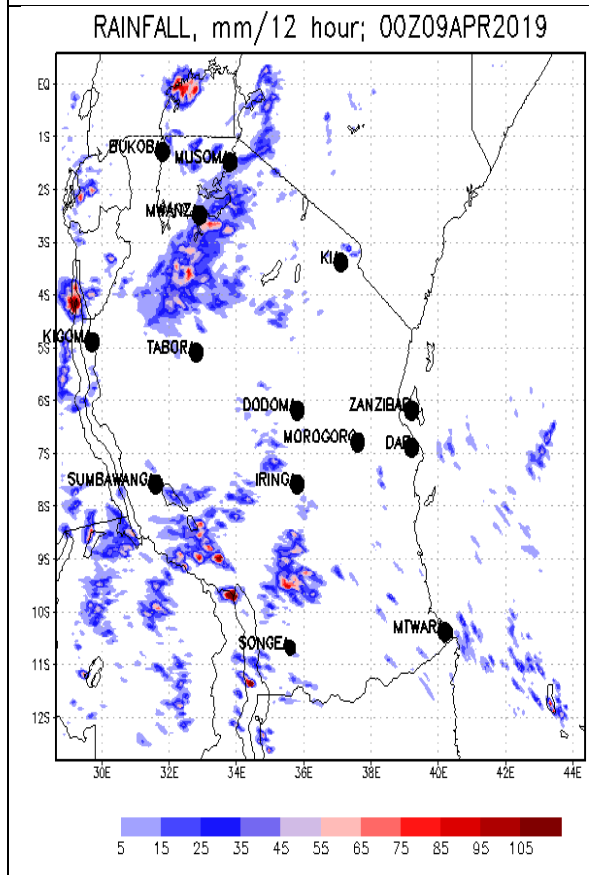
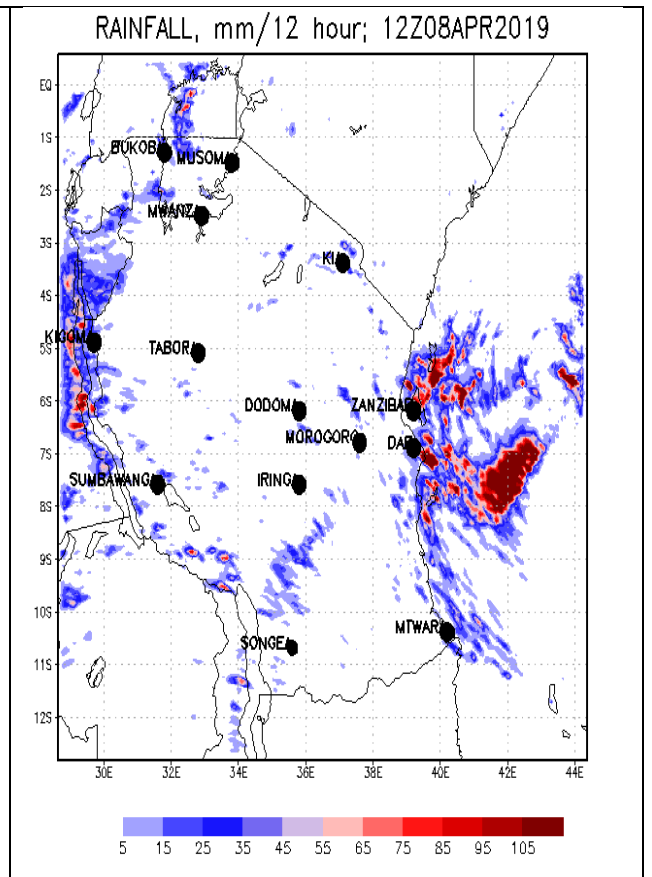
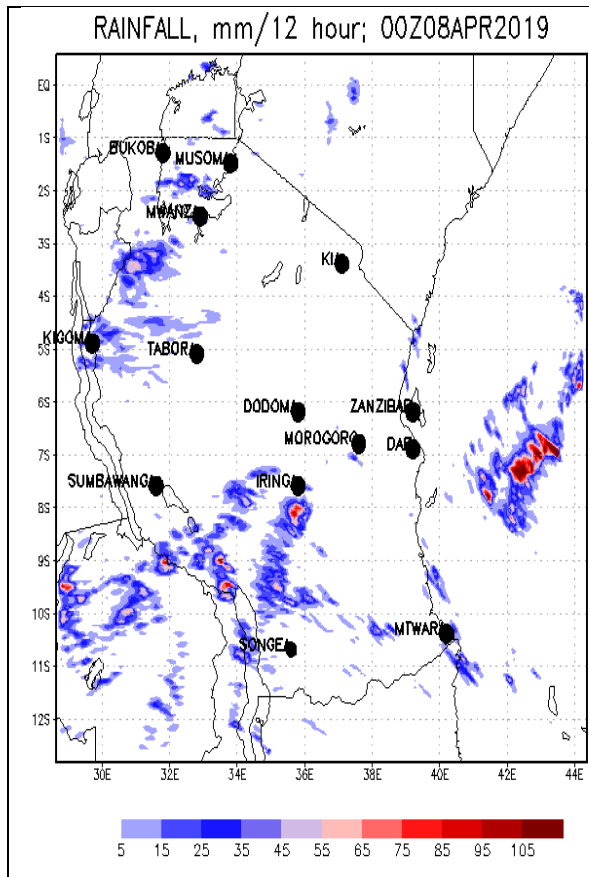




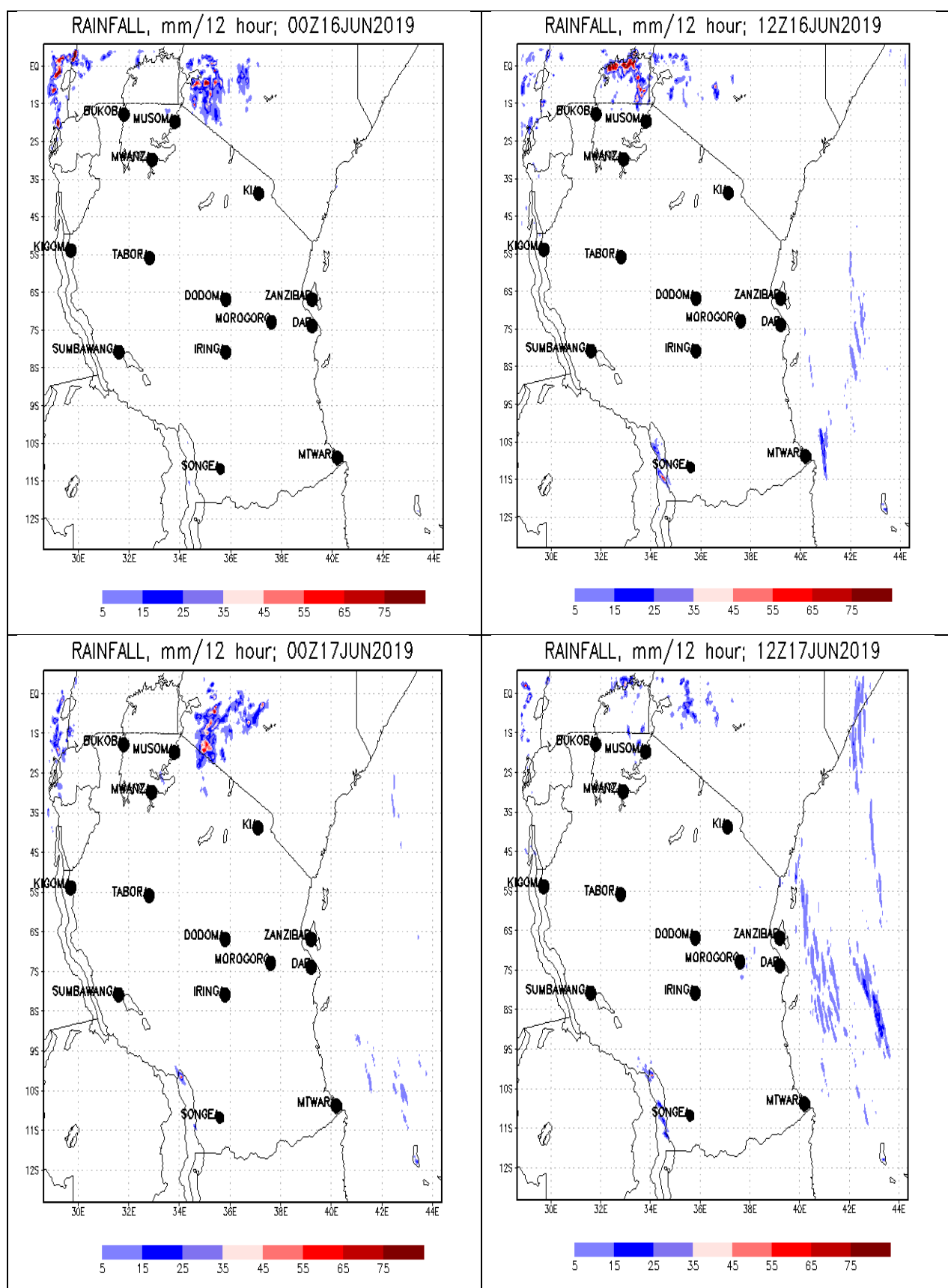
Апрель 2019 года без параметризации конвекции.

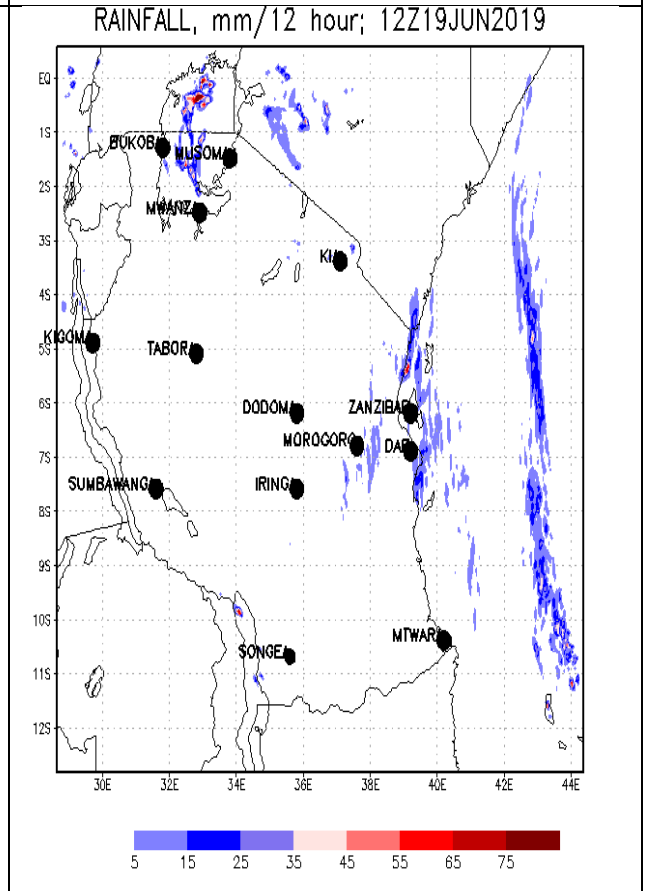
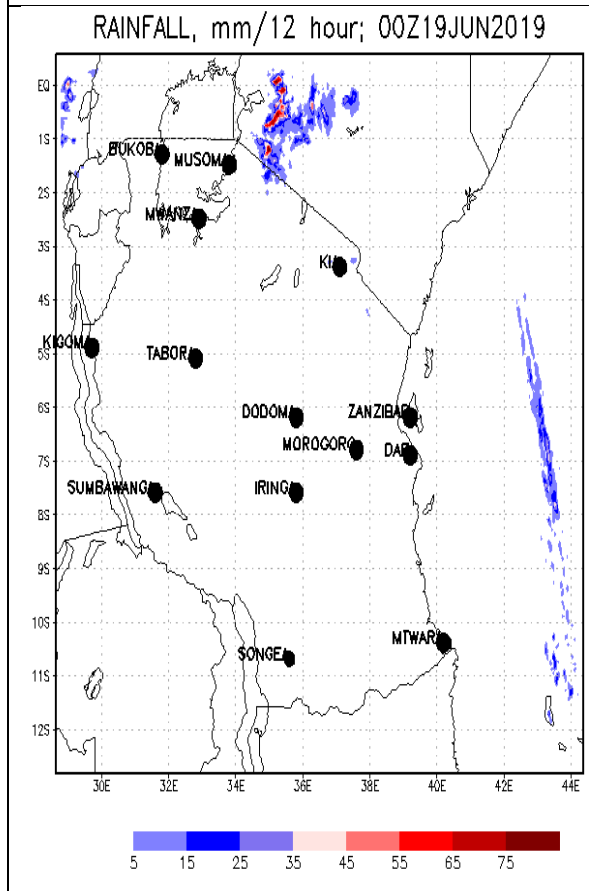
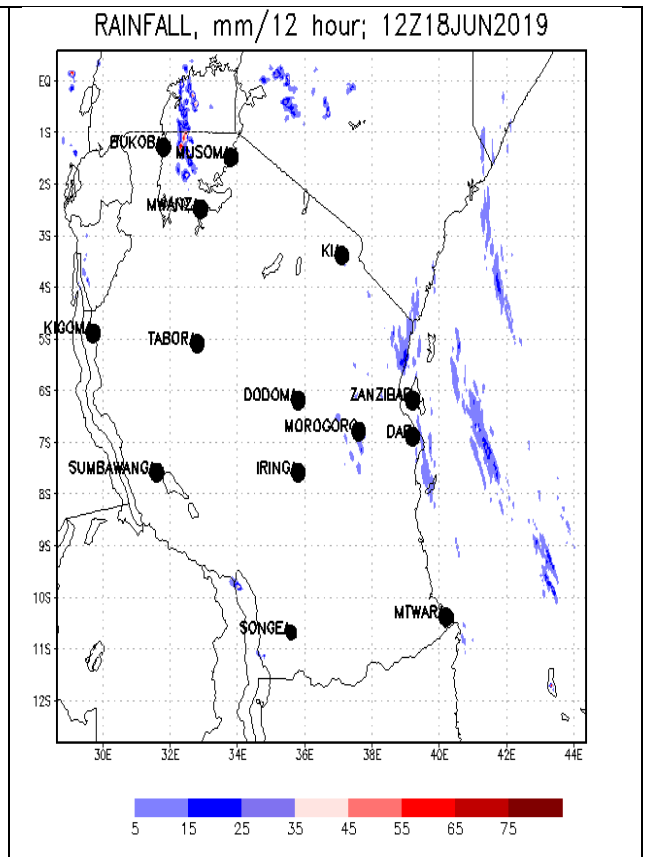
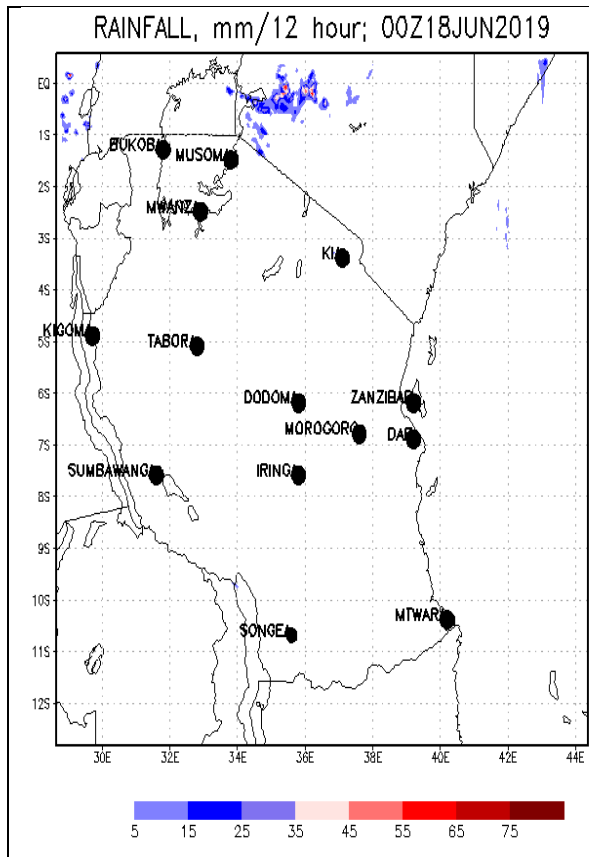


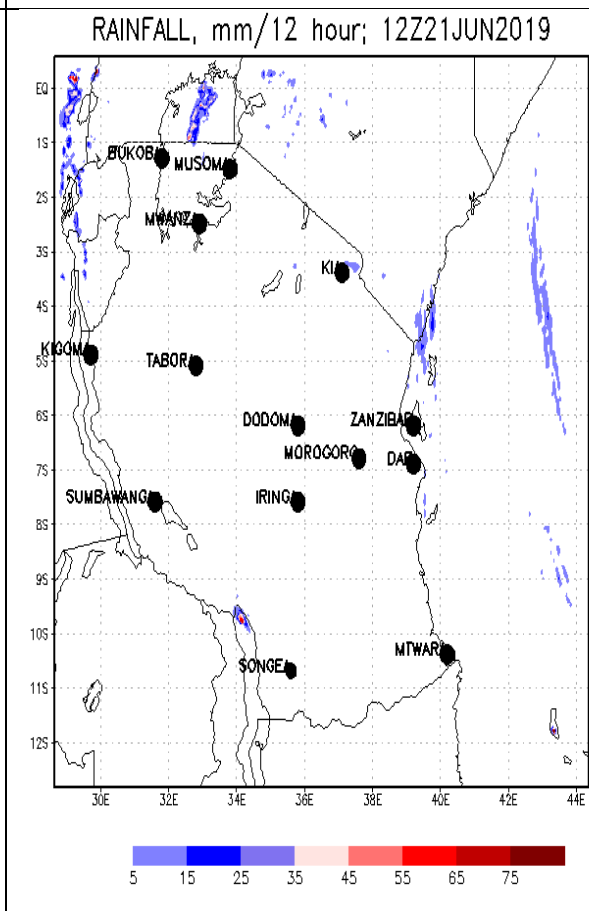
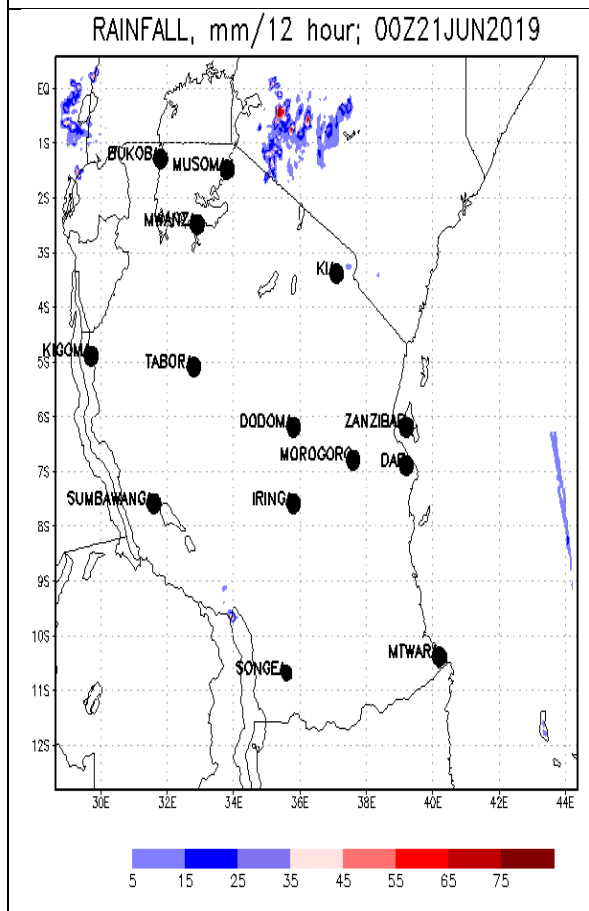
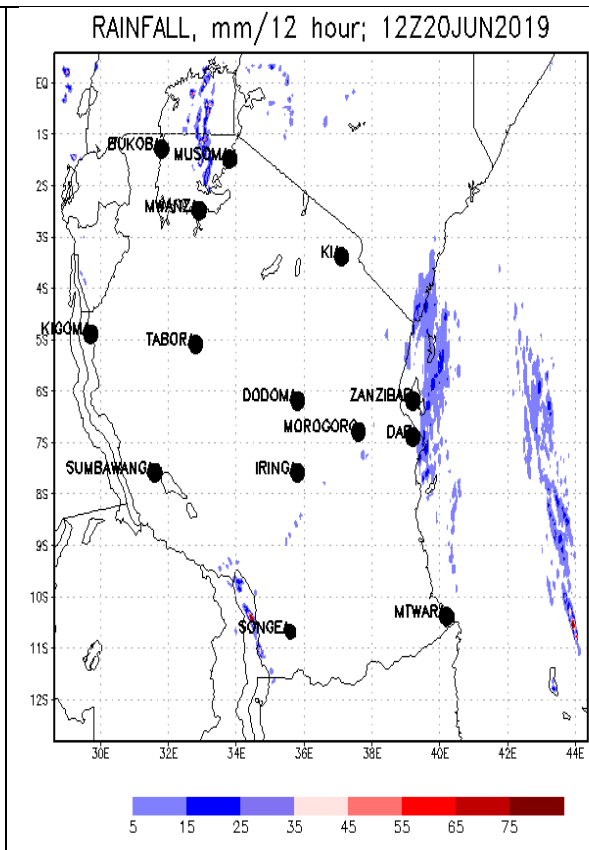
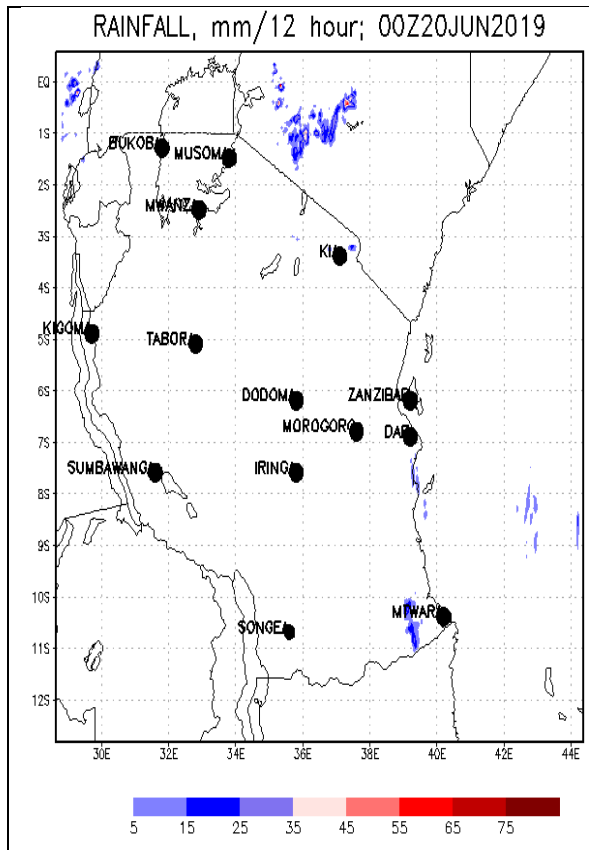




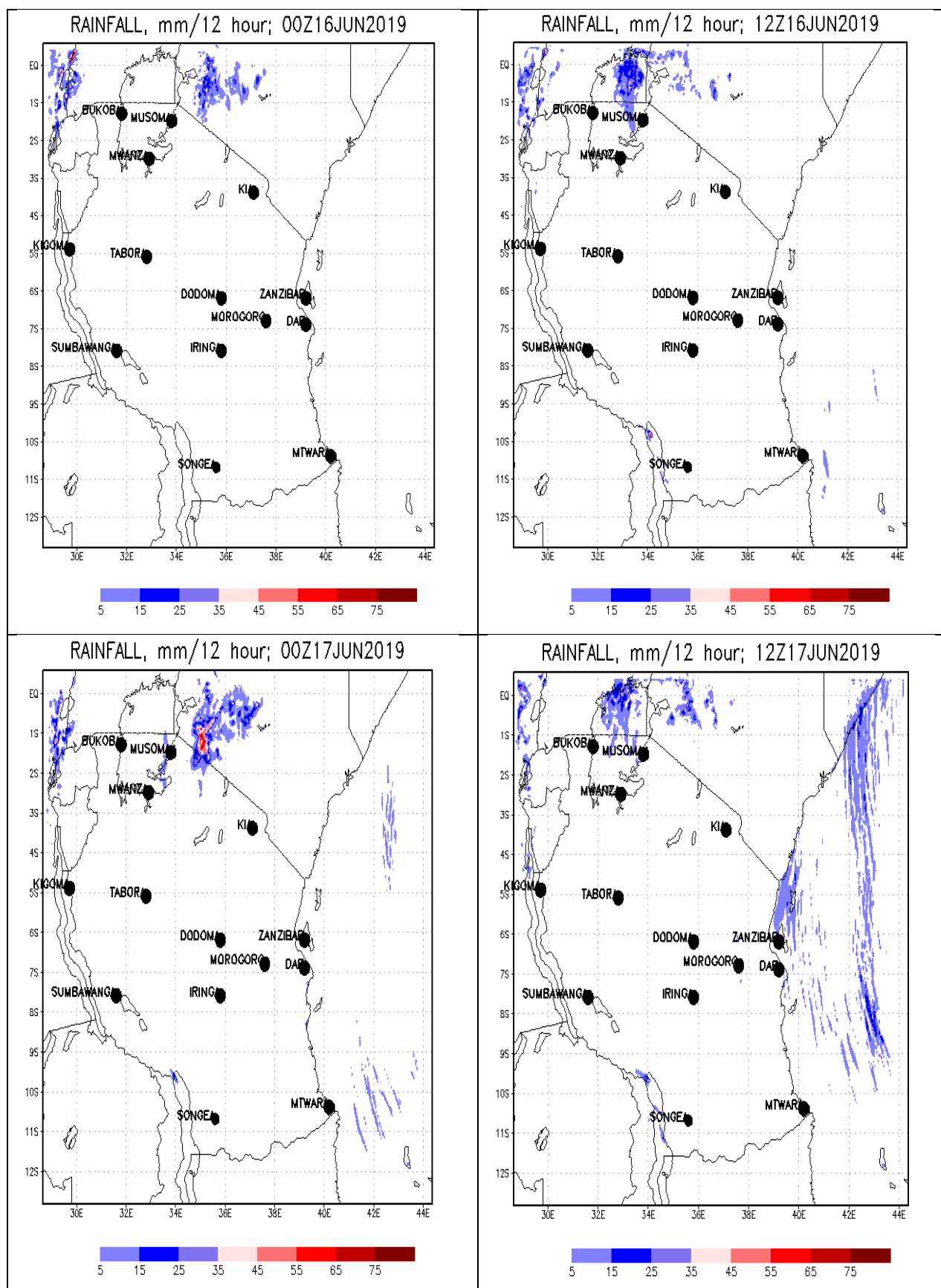
Июнь 2019 года без параметризации конвекции.

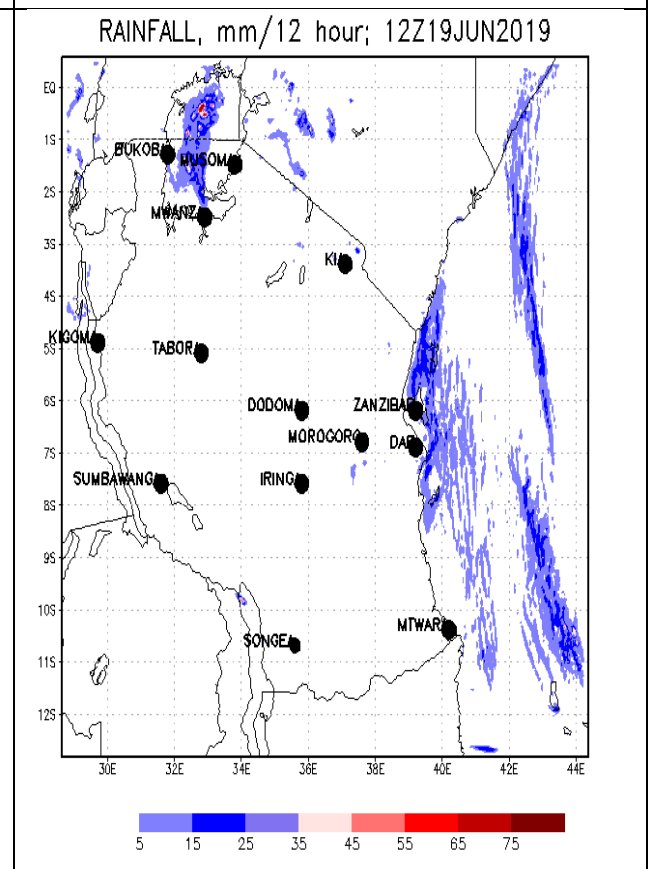
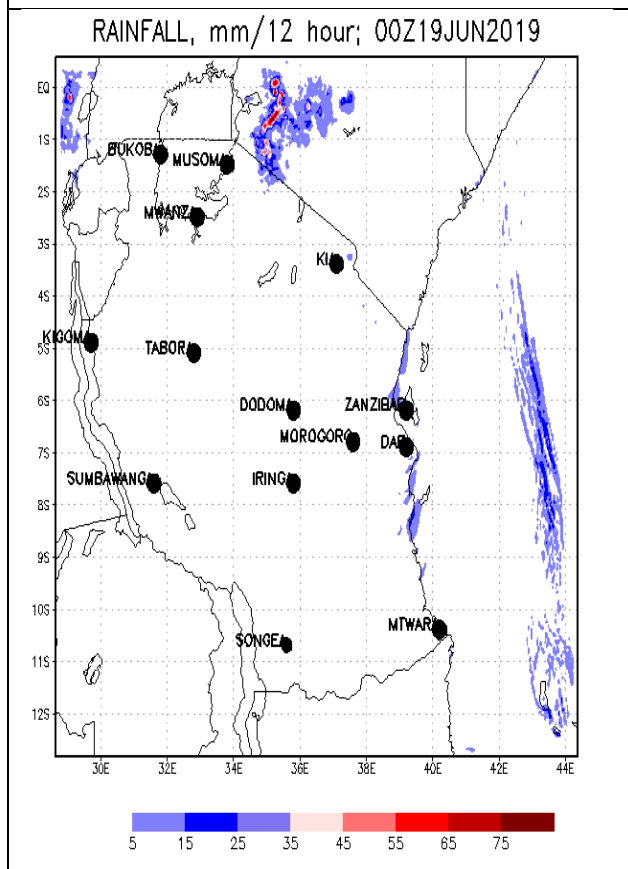
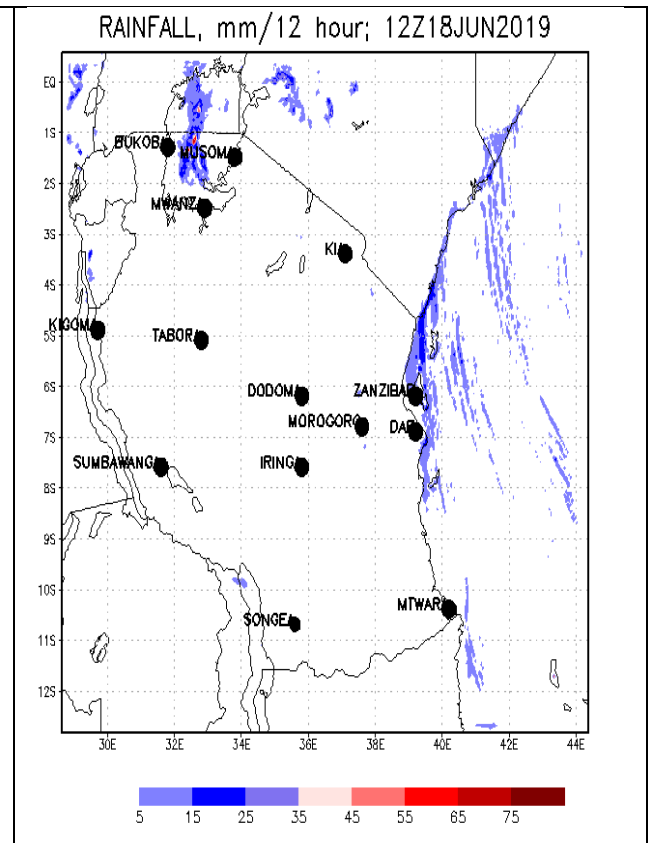
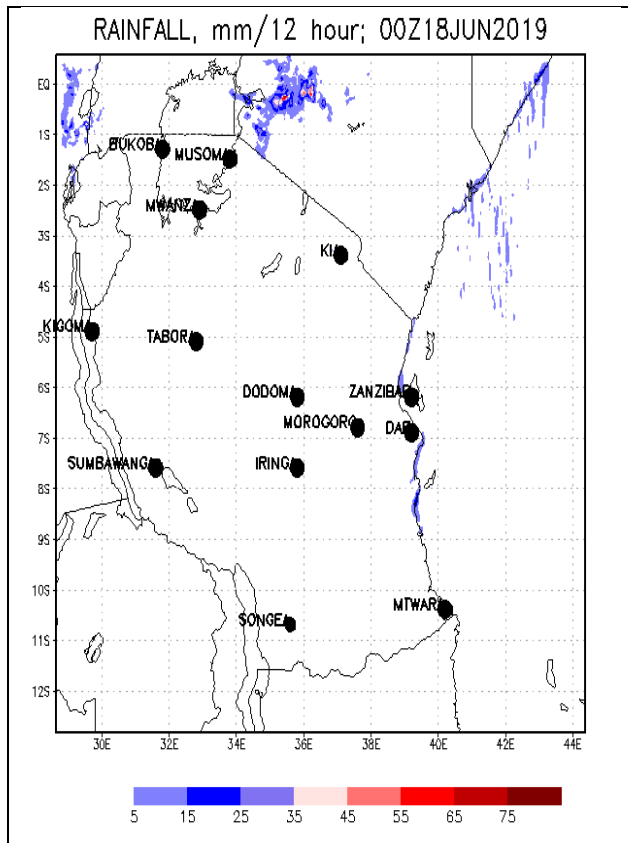


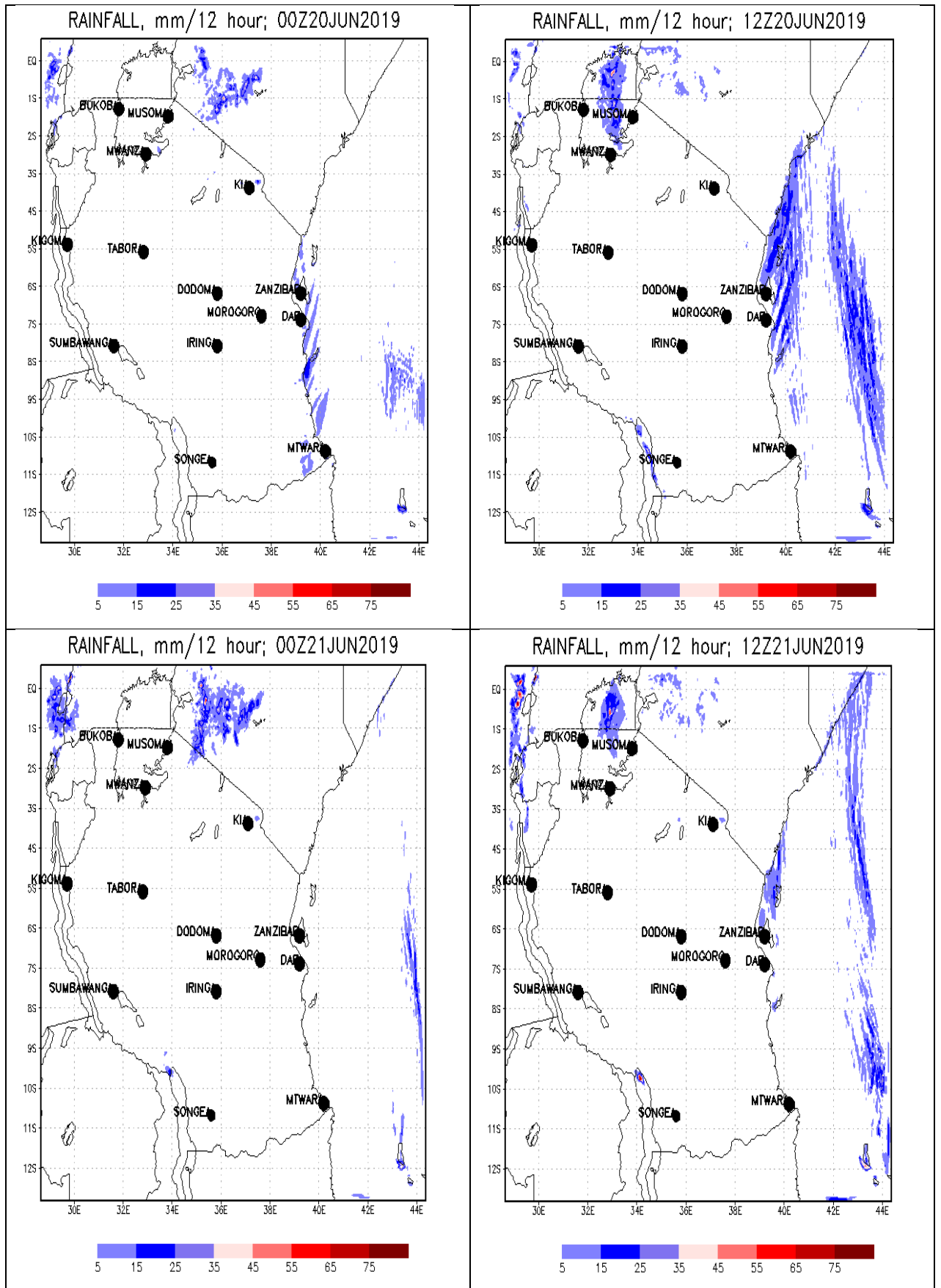




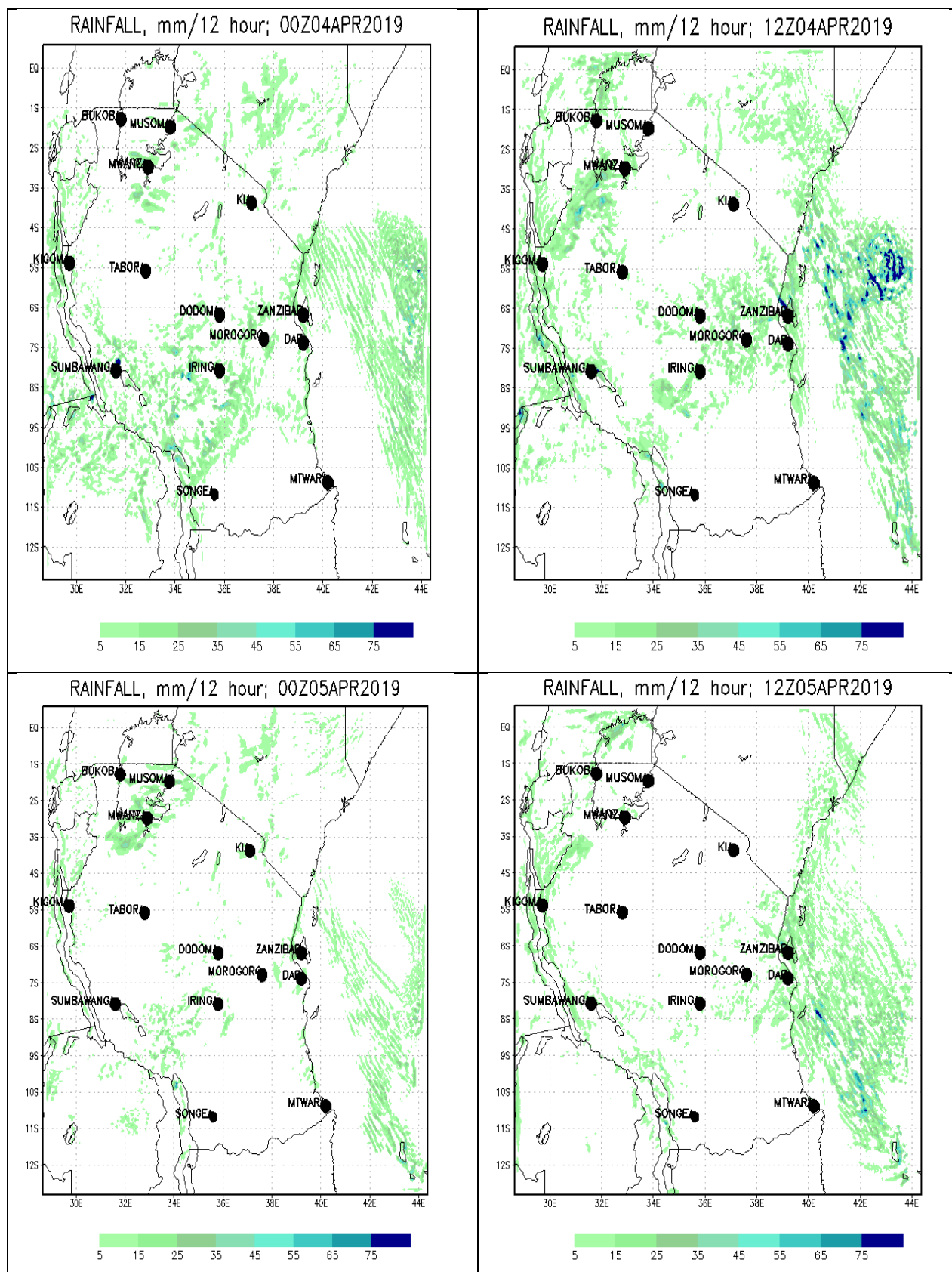
Июнь 2019 года с параметризацией конвекции



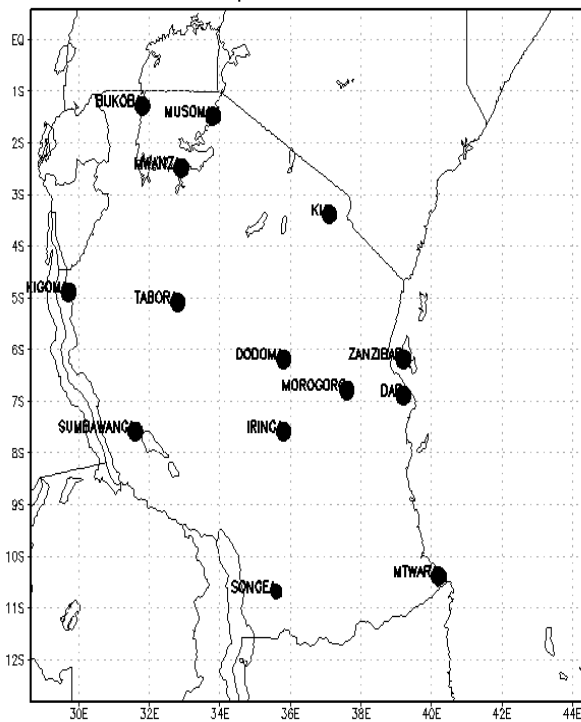




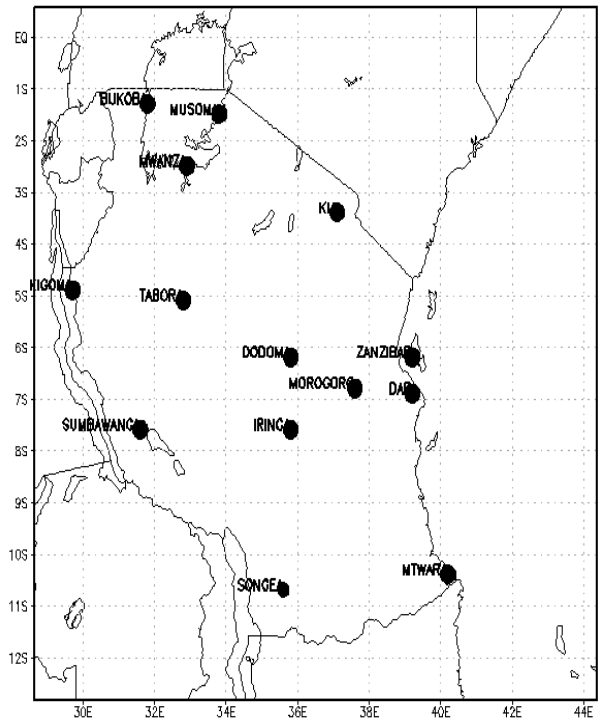
Приложение Ж – Разница прогностических полей осадков
Апрель 2019 г. без параметризации конвекции и с параметризацией
конвекции.



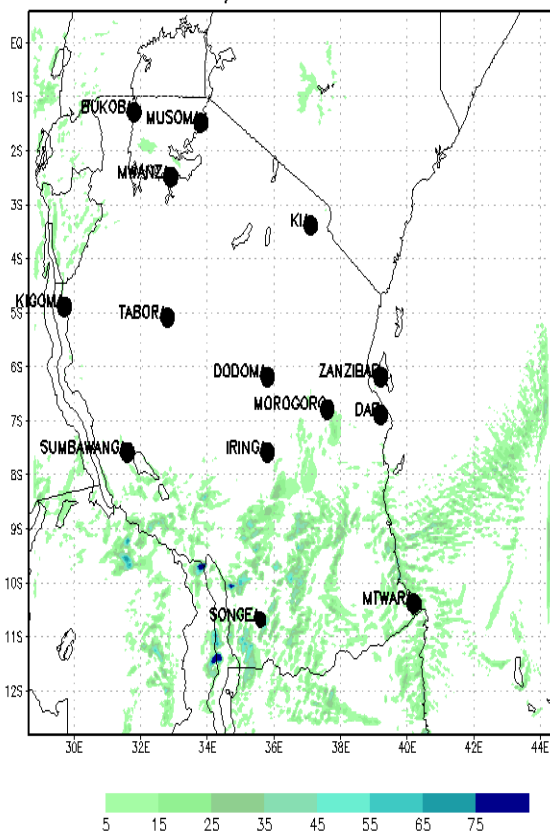
RAINFALL, mm/12 hour; 00Z06APR2019



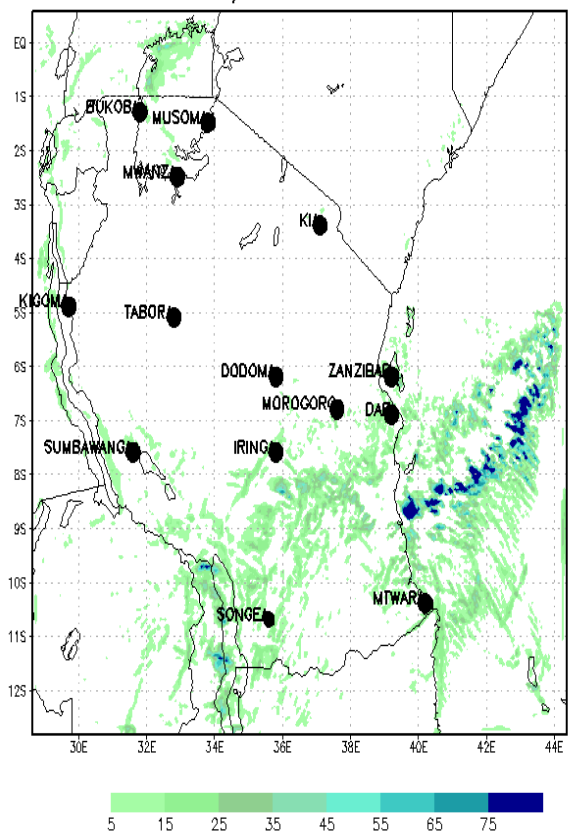
RAINFALL, mm/12 hour; 12Z06APR2019

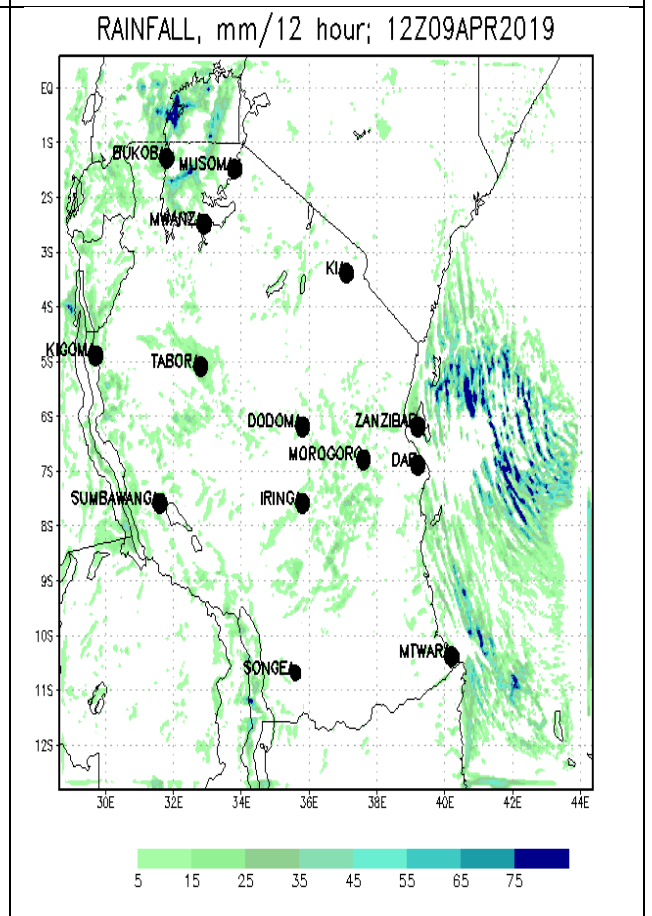
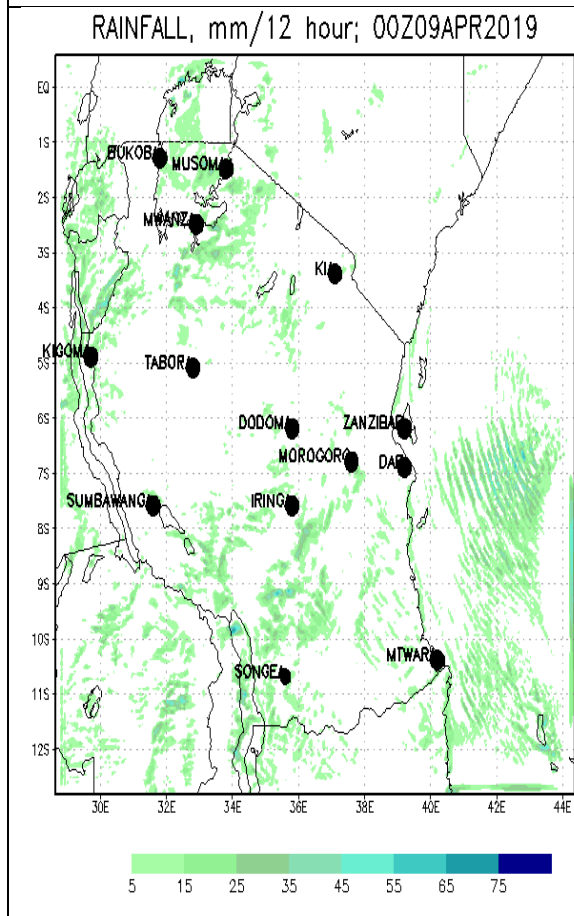
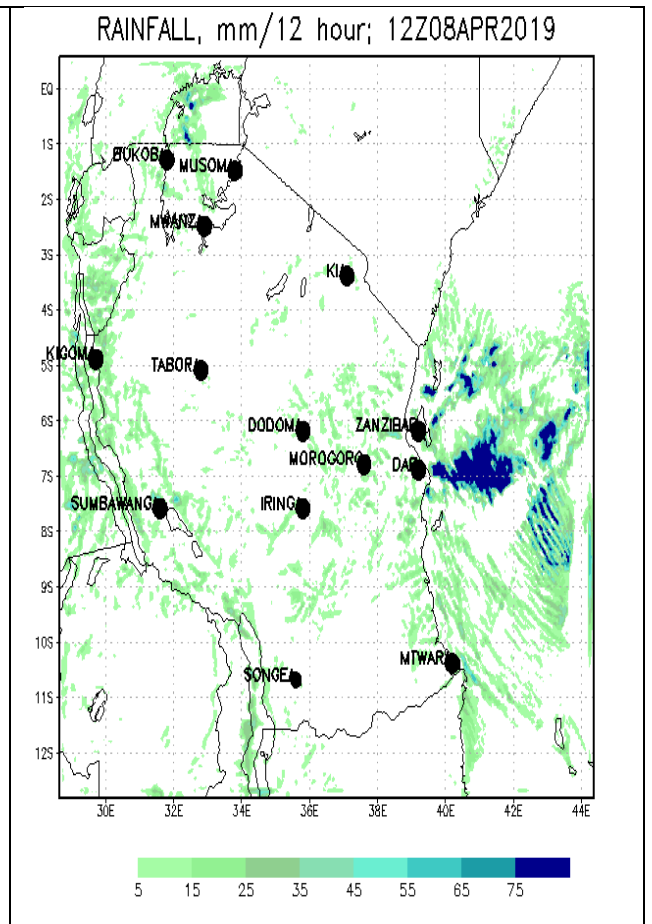
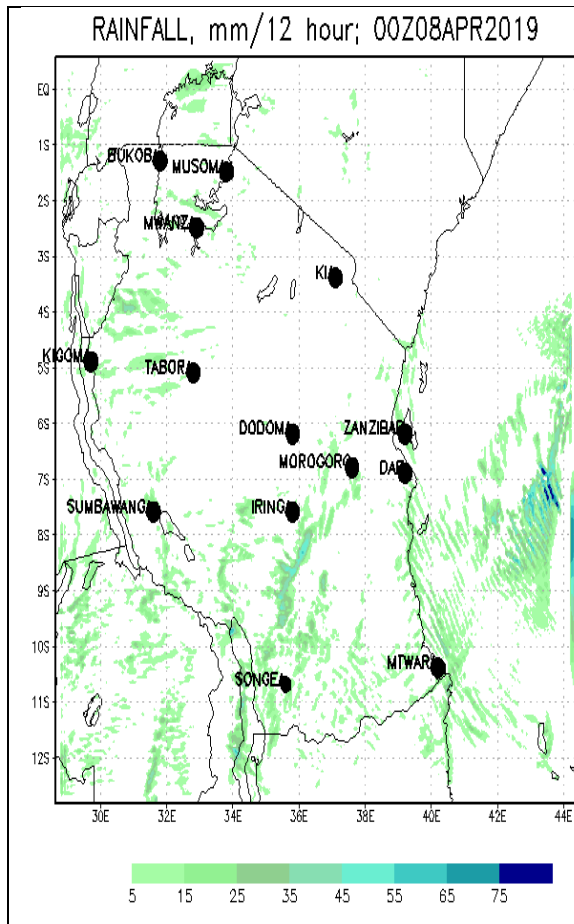


RAINFALL, mm/12 hour; 00Z07APR2019



RAINFALL, mm/12 hour; 12Z07APR2019





Июнь 2019 с параметризацией осадков и без неё.

