

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

Konlove

На правах рукописи
УДК 551.509.324.2(678)

Кондове Альфред Лоуренсе

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ
ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ (НА ПРИМЕРЕ ТАНЗАНИИ)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Специальность: 25.00.30 – «Метеорология, климатология и агрометеорология»

Санкт-Петербург, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский Государственный Гидрометеорологический Университет»

Научный руководитель: Анискина Ольга Георгиевна,
кандидат физико-математических наук, доцент, Кафедра
Метеорологического Прогнозов

Официальные оппоненты: Рубинштейн Константин Григорьевич, профессор, доктор
физико-математических наук, заведующий лабораторией
общей циркуляции атмосферы и климата Гидрометцентра
Российской Федерации

Школьник Игорь Маркович, кандидат физико-
математических наук, заведующий лабораторией
моделирования регионального климата Главной
геофизической обсерватории им.А.И.Воейкова

Ведущая организация: Институт наук о Земле Санкт-Петербургского
государственного университета

Защита состоится «___»___июня__ 2017. г. в __15__ часов __00__ минут на заседании
диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном
гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург,
Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного
Гидрометеорологического Университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург,
Малоохтинский пр., 98. и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.ф.м.н., доцент



Л.В. КАШЛЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Гидродинамическое моделирование процессов является одним из самых важных инструментов исследования и прогнозирования метеорологических полей. Ведущие метеорологические центры создают и распространяют по всему миру гидродинамические системы прогнозирования атмосферных процессов разных масштабов. До настоящего времени исследований по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов в Восточной Африке катастрофически мало. Хотя есть очень большая потребность в гидродинамической модели, которая позволяла бы, как решать практические прогностические цели, так и проводить научные исследования, однако до последнего времени не существовала гидродинамической модели в этом регионе земного шара, в которой очень заинтересована метеорологическая служба Танзании и соседних стран. Поэтому адаптация гидродинамической модели, её верификация, выбор оптимального набора параметризаций физических процессов является очень *актуальной* задачей.

Особенно важным для региона исследований является прогноз осадков, поля которых очень неравномерно распределены и во времени и в пространстве. Использование стандартных синоптических методов прогноза не позволяют качественно решить задачу прогноза, что влечёт за собой большие материальные потери, а часто и человеческие жертвы. Если в оперативную практику гидрометцентров стран Восточной Африки будет включено гидродинамическое моделирование и прогнозирование полей метеорологических величин (в число которых входит прогноз наличия и интенсивности осадков), то это позволит более разумно планировать и осуществлять:

- меры защиты и повысить эффективность борьбы с малярией и тем самым снизить детскую смертность;
- работы в сельском хозяйстве, которое является основой народного хозяйства стран Африки;
- управление работой гидроэлектростанций и других отраслей народного хозяйства.

Кроме практической значимости гидродинамическая модель атмосферных процессов позволяет изучать основные закономерности атмосферной циркуляции на территории Восточной Африки, выявлять процессы, определяющие осадкообразование.

Настоящая диссертационная работа посвящена обоснованию и разработке гидродинамического моделирования атмосферных процессов и созданию комплексного метода прогнозирования осадков на территории Восточной Африки на основе мезомасштабной гидродинамической модели WRF.

Целью диссертационной работы является создание на основе мезомасштабной гидродинамической модели WRF гидродинамической системы моделирования, позволяющей повысить качество кратко- и среднесрочных прогнозов осадков в Восточной Африке (на примере Танзании).

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- статистический анализ пространственно-временной структуры полей осадков на территории Танзании на основе данных Метеорологического Агентства Танзании;
- адаптация мезомасштабной модели WRF для моделирования процессов на территории Танзании (выбор модельного домена, его дискретизации, определение набора параметризации физических процессов);
- верификация адаптированной модели WRF;
- разработка системы ансамблевого прогноза осадков на основе адаптированной модели WRF;
- разработка системы уточнения результатов прогноза осадков с использованием методов оптимального управления;
- формулировка методики оперативного гидродинамического прогноза полей метеорологических величин для использования в Метеорологических службах стран Восточной Африки.

Предметом исследования являются процессы в атмосфере Восточной Африки, определяющие поля метеорологических величин, в общем, и особенно поля осадков.

Объектом исследования является гидродинамическое моделирование процессов на территории Восточной Африки.

Методы исследования. Методы математического моделирования применялись для описания эволюции полей метеорологических величин на территории Танзании. Также в диссертационном исследовании применены статистические методы пространственно

временного анализа полей метеорологических величин, статистические методы обработки результатов моделирования, методы кластерного анализ и корреляционного анализа, использовались методы оптимального управления для осуществления корректировки результатов моделирования с использованием фильтра Калмана.

Положения, выносимые на защиту:

1. Адаптированная к территории Восточной Африки мезомасштабная гидродинамическая модель WRF. Адаптация заключалась в выборе оптимального модельного домена и его дискретизации. Сейчас эта модель в оперативном режиме используется Танзанийским метеорологическим агентством.

2. Оценка чувствительности гидродинамического моделирования к физическим процессам, параметризуемым в гидродинамической модели WRF. Определены физические процессы, оказывающие наибольшее влияние на осадкообразование, и схемы параметризаций этих процессов в мезомасштабной гидродинамической модели WRF.

3. Создана система ансамблевого прогноза осадков на основе разных методов параметризаций физических процессов. Отобраны лучшие параметризационные блоки для создания ансамбля, влияющие на прогноз осадков.

4. Разработана методика комплексного прогноза осадков, включающая в себя гидродинамический ансамблевый прогноз и фильтрацию Калмана.

Научная новизна.

Произведено выделение регионов Танзании с подобными режимами осадков на основе кластерного анализа с разными способами определения расстояния между кластерами и последующим синтезом результатов использования разных методик кластеризации. Эти результаты позволяют лучше понять атмосферные процессы, происходящие на исследуемой территории, и могут быть использованы для создания отдельных прогностических комплексов для каждого региона.

С использованием адаптированной к региону мезомасштабной гидродинамической модели WRF произведёно исследование и определены основные процессы, определяющие поля метеорологических величин на исследуемой территории.

Произведён анализ существующих схем параметризации физических процессов и выбраны комбинации параметризаций, позволяющие оптимальным образом описывать

атмосферные процессы на территории Восточной Африке.

Построена система ансамблевого прогноза на основе различных схем параметризации физических процессов и применён метод диаграмм Талаграна для оценки ансамбля.

Построена система коррекции результатов гидродинамического прогноза осадков на основе фильтрации Калмана.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Полученное территориальное деление исследуемой территории на регионы с подобным режимов осадков необходимо для дальнейшего изучения процессов осадкообразования и для эффективного прогнозирования осадков.

2. Созданная система гидродинамического прогноза осадков, включающая в себя адаптированную гидродинамическую модель WRF, систему ансамблевого прогноза и корректировку результатов моделирования на основе фильтрации Калмана, внедряется в оперативную практику (сейчас внедрена частично без ансамблевого прогноза и калмановской фильтрации) Танзанийского метеорологического агентства.

3. Используемые методы адаптации мезомасштабной модели WRF и её верификации могут быть использованы в различных оперативных подразделениях (особенно в Африке), занимающихся прогнозами погоды;

4. Разработанная методика корректировки результатов моделирования на основе фильтрации Калмана может быть эффективна при прогнозе любых полей любыми (не только гидродинамическими) методами.

Обоснованность и достоверность полученных результатов определяется корректным применением статистических методов и методов математического моделирования, а также аргументированностью исходных положений, непротиворечивостью рассуждений, корректным использованием математического аппарата. Подтверждается согласованностью с оценками, полученными в независимых исследованиях, а также сравнением с результатами наблюдений.

Личный вклад автора в данную диссертационную работу состоит в формулировке целей и задач работы, разработке алгоритмов, проведении численных экспериментов, анализе результатов и формулировке выводов.

Апробация результатов.

Материалы диссертации докладывались на семинарах кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ.

Были представлены в виде доклада на семинарах в Танзанийском Метеорологическом Агентстве (ТМА), Дар-эс-Салаам, Танзания, 2013, 2015 год.

Докладывались на международных конференциях CORDEX — AFRICA Analysis Team, Cape Town, South Africa, 2015, 2016 год.

По теме диссертации опубликовано 4 статьи, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в высокорейтинговом зарубежном издании. Опубликованные работы полностью отражают содержание и защищаемые положения диссертации.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 144 страницы и включает 31 рисунок и 21 таблицу. Список использованных источников состоит из 81 наименования российских и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, описывается теоретическая новизна и практическая значимость исследования.

Первая глава посвящена исследованию климатологии осадков в Танзании. Описываются проведенные исследования пространственно-временного распределения осадков в этом регионе.

Анализировались среднемесячные количества осадков на территории Танзании. Использовались данные 140 метеорологических станций, проводящих наблюдения за осадками на этой территории в период с 1856 по 2014 гг., которые были получены из архива Global Historical Climatology Network (GHCN). Кроме этого, автором были получены данные синоптических наблюдений на 15 метеорологических станциях из Танзанийского Метеорологического Агентства за период с 1960 по 2014 гг. На основе этих данных для

каждого года и каждого месяца были рассчитаны и проанализированы среднемесячные значения количества осадков, их среднеквадратические отклонения и вариации.

Построенные по этим данным месячные суммы осадков на 15 метеорологических станциях диаграммы размаха («ящик с усами», box and whisker plot) (рисунок 1) дали возможность установить экстремумы месячных сумм осадков, а также выявить, что на всей исследуемой территории четко выделяются длительный и короткий влажные сезоны. На метеорологических станциях, которые расположены на западе (Кигома), северо-западе (Букоба), севере (Муанза), северо-востоке (Аруша) и на побережье Индийского океана (Дар эс Салаам и Хандени), наблюдается одинаковая временная изменчивость осадков – два максимума: первый в марте или апреле, а второй в ноябре или декабре. На этих станциях наблюдают большое количество осадков (до 400 мм/месяц).

На станциях, расположенных в центре (Додома), юге (Иринга и Сонгеа) и южном высокогорье (Мбея) отмечается только один длительный сезон осадков с ноября по май, в который на этих станциях количество осадков меньше 300 мм/месяц, кроме станции Сонгеа, где наибольшее количество осадков составляет 318 мм/месяц.

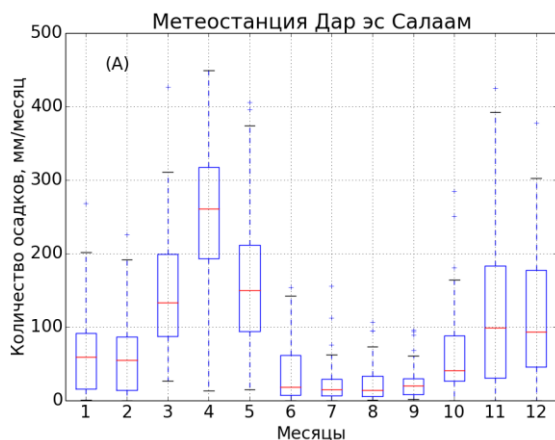
На всей территории наблюдается минимальное количество осадков в период с июня по сентябрь. В этот период большое количество осадков отмечается только на станциях с двумя максимумами и составляет около 10 мм/месяц. Осадки в этот период вызваны с несколькими факторами:

запаздывание ВЗК – главный механизм формирования осадков на этой территории;

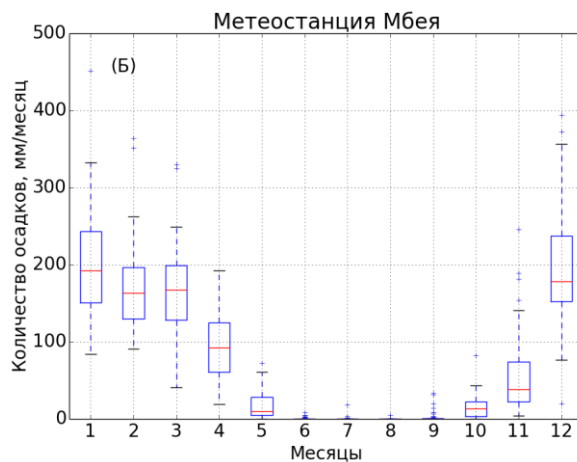
для станций, расположенных на побережье Индийского океана, осадки связаны с муссонами;

на севере и северо-западе осадки связаны с западными потоками и потоками с озера Виктория.

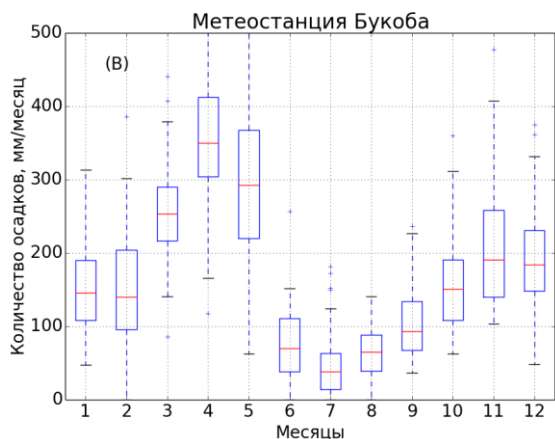
а)



б)



в)



г)

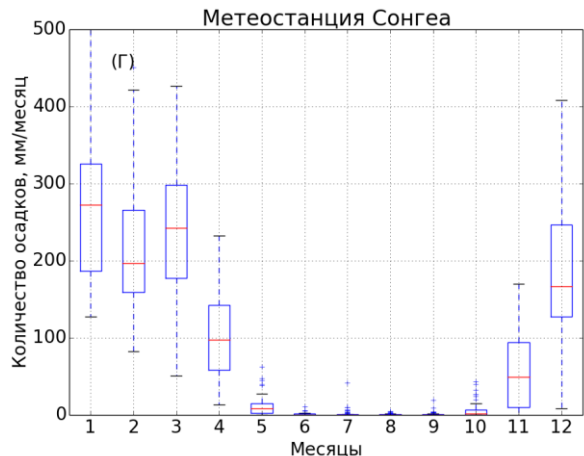


Рисунок 1– Среднемесячные значения осадков на метеостанциях а) Дар эс Салаам , б) Мбея, в) Букоба, г) Сонгеа

Выделены регионы (юг и южное высокогорье), где существует только один влажный сезон с октября по май, а с мая по октябрь количество осадков практически равно нулю. Только на одной станции из этого региона (Килуа), где наблюдается летом небольшие осадки (3 мм/месяц).

Основной вывод, сделанный в заключении данного этапа, что количество осадков на территории исследования обладает очень сильной изменчивостью, как во времени, так и по пространству. Полученные результаты дали возможность лучше понять структуру выпадения осадков и выделить главные факторы формирования осадков на данной территории, что очень важно при адаптации численной модели, так как качество прогноза осадков и их математического моделирования сильно зависит от учета этих факторов .

Далее, в данной главе для наилучшего моделирования и последующей верификации было проведена процедура районирования территории Танзании по сезонным и месячным суммам осадков с использованием методов кластеризации. При кластеризации использованы данные об осадках на 15 станциях за период с 1960 по 2014 гг. Кластеризация была сделана с помощью неиерархического метода К-средних, в котором проводится анализ дисперсии.

Нельзя сказать о большой согласованности результатов кластеризации, но если использовать информацию о климатических условиях Танзании, то выделяются четыре региона, которые представлены на рисунке 2.

Результаты кластеризации будут в дальнейшем использованы при моделировании атмосферных процессов и для верификации результатов моделирования.

Во второй главе дается описание используемой в данной работе мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW (версия 3.6.1) и рассматривается вклад данного исследования в работе метеослужб развивающихся стран Африки, особенно Танзании.

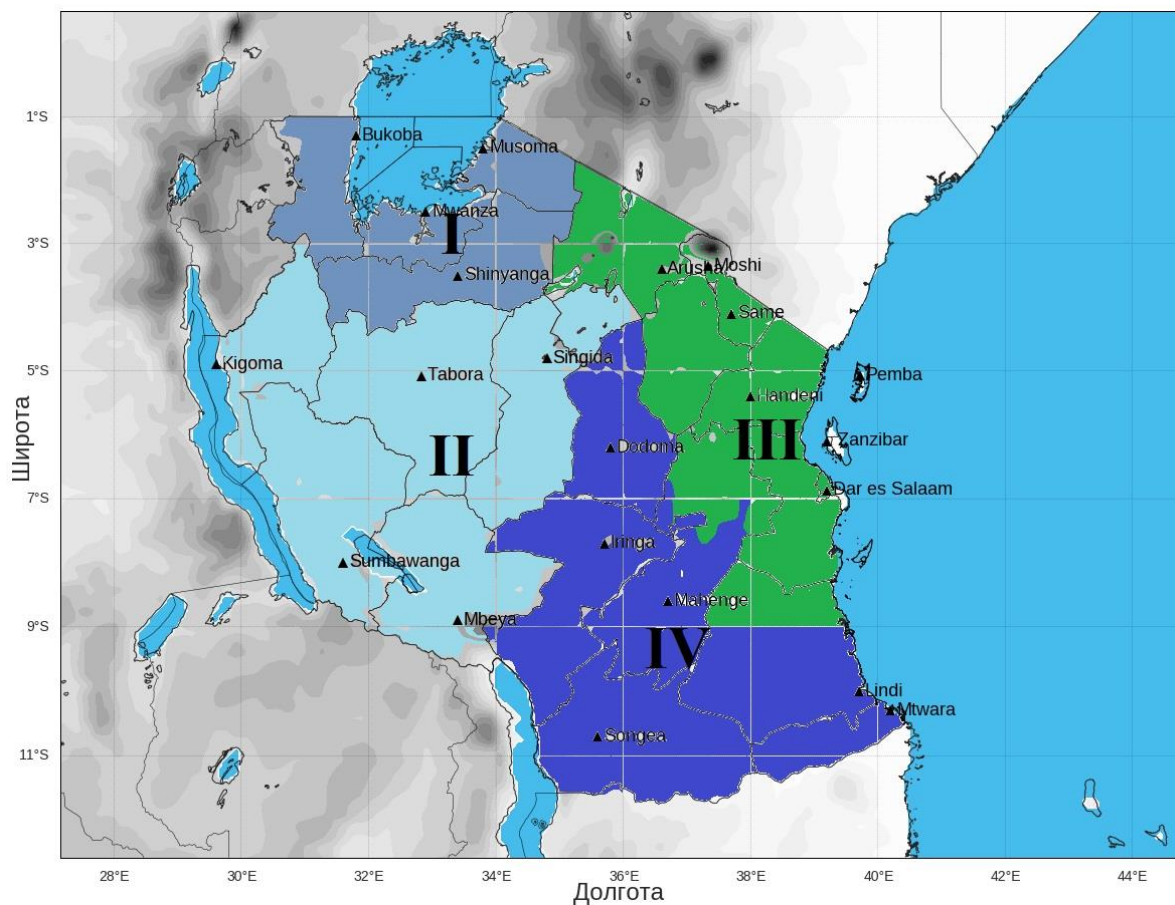


Рисунок 2 – Четыре региона, полученные после процедуры кластеризации

Выявляются процессы, наибольшим образом определяющие погоду и климат тропической зоны. В результате сделан вывод о том, что наибольшее влияние на осадкообразование и на качество его описания в гидродинамической модели оказывают процессы преобразования гидрометеоров в облаках, конвективные процессы и процессы в пограничном слое атмосферы.

В данной главе описывается процедура адаптации модели WRF для территории Танзании. Для выбора оптимальной модельной области и определения лучшей дискретизации было сгенерировано три разных конфигурации модели WRF: По вертикали во всех экспериментах использовалось 27 уровней.

На первом этапе была создана модельная область размером 92 узла с запад на восток и

75 узла с юга на север, горизонтальным разрешением 30 км. Таким образом, область моделирования охватывает всю территорию Танзании, а также страны восточной Африки. В этой области осуществлялся прогноз на 24 часа ежедневно от 06 часов в периоды: с 04 по 14 мая 2006, с 02 по 11 апреля 2008 года, с 24 по 29 апреля 2010 года и с 10 по 19 ноября 2011 года.

Из анализа результатов, следует, что давление прогнозируется моделью с высокой точностью, относительная ошибка прогноза во всех регионах минимальна и составляет 0,04 – 0,8 %. Во всех регионах модель занижает прогностическую максимальную температуру. Относительная ошибка изменяется в интервале от 6,8 до 23,9 % в зависимости от сложности рельефа (в южном высокогорье ошибка максимальна) и наличия больших водоемов, таких как озеро Виктория (на севере западе) и Индийский океан (в восточном).

Качество гидродинамического прогноза основных метеорологических величин в данном цикле исследований неплохо, но хотелось уменьшить ошибку в прогнозе максимальной температуры. Для этого на следующем этапе численных экспериментов создана модельная область с использованием трёх вложенные сетки.

Конфигурация модельной области – первая область размером 100x72 узлов, вторая область размером 217x154 и третья область размером 382x292 узлов с горизонтальным разрешением 39, 13 и 4,3 км, соответственно. В этом варианте модели осуществлялся прогноз на 24 часа от 06 часов ежедневно в периоды: с 04 по 14 мая 2006, с 02 по 11 апреля 2008 года, с 24 по 29 апреля 2010 года и с 10 по 19 ноября 2011 года.

Полученные прогностические поля температуры для всех сеток (разрешением 4,3; 13 и 39 км), представлены на рисунке 3.

В результате анализа результатов экспериментов со вложенными сетками было установлено, что модель более высокого разрешения (13 и 4.3 км) позволяет давать прогнозы максимальной температуры с более высокой оправдываемостью по сравнению с моделью с разрешением 39 км. Это относится ко всей модельной территории кроме юга страны, где прогноз максимальной температуры на сетки с более грубым разрешением (39 км) более точен. Это объясняется тем, что станция Сонгеа, по которой проводилась верификация прогноза на юге страны, расположена на территории с более простыми условиями – меньшее влияние орографии и подстилающей поверхности, отсюда следует меньшая пространственно-

временная неоднородность всех метеорологических величин (в том числе облачности и притоков тепла, влаги и количества движения). Поэтому более грубая версия модели позволяет давать достаточно точный прогноз, не внося в решение дополнительных шумов.

Полученные с использованием вложенных сеток результаты устраивают с точки зрения качества прогноза, но на прогноз заблаговременностью 24 часа требуются 23 часов модельного времени при мощности компьютера, доступной метеослужбе Танзании. А согласно современным требованиям, суточные прогнозы должны рассчитываться менее, чем за 10 минут модельного времени.

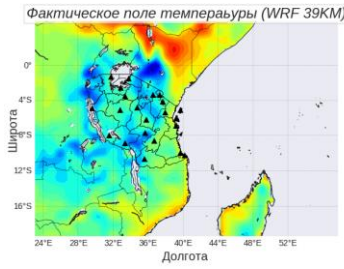
И наконец, рассматривалась область моделирования с двумя сетками горизонтального разрешения 15 и 5 км. Внутренняя область моделирования охватывает всю территорию Танзании, а внешняя всю восточную Африку. Были проведены эксперименты в следующие периоды:– с 08 по 22 апреля 2014г., с 15 по 24 декабрь 2011г.

Анализ экспериментов показал, что лучшие результаты получены на сетке с разрешением 5 км, при этом влияние граничных условий незначительно. Поэтому в дальнейшем будет использоваться модельная область с одной сеткой разрешением 5 км.

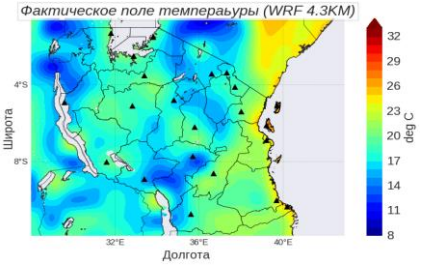
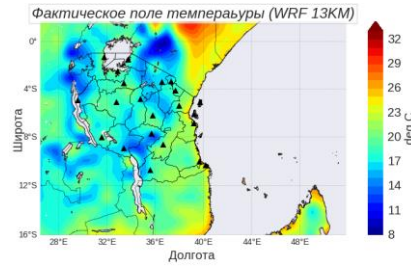
Следующей решаемой задачей был выбор оптимального набора параметризаций физических процессов. Для этого в прогностической области и на лучшей конфигурации модельного домена проводились численные эксперименты с разным набором параметризаций.

Условия экспериментов отличались от предыдущей серии заблаговременностью прогнозов. Это связано с тем, что влияние параметризаций на качество прогноза увеличивается с увеличением срока прогноза. Поэтому в этой серии экспериментов верифицировались прогнозы с заблаговременностью 72 часов. Верификация по-прежнему проводилась отдельно для разных регионов Танзании и отдельно для двух сезонов: с марта по май и с октября по декабрь.

а)

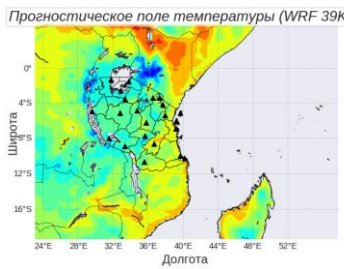


б)

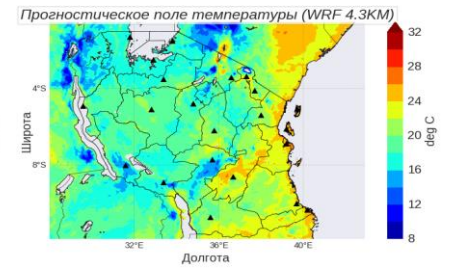
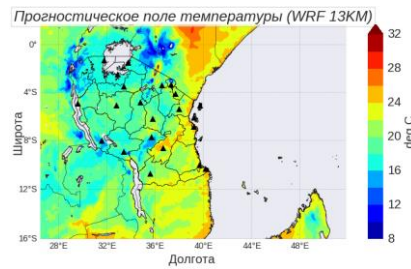


в)

г)

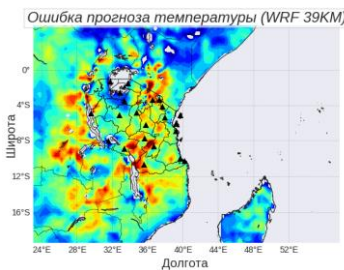


д)

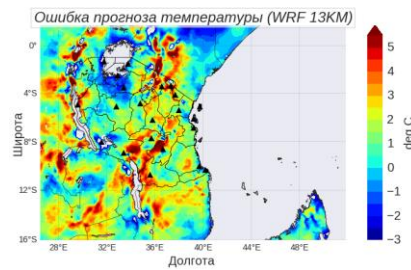


е)

ж)



к)



л)

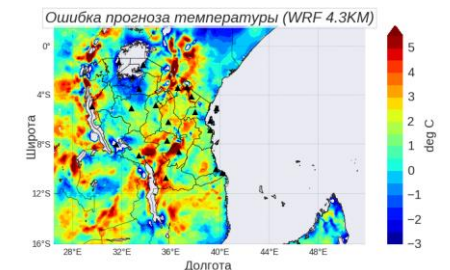


Рисунок 3 – Фактические (а, б и в), прогностические (г, д и е) поля и ошибки прогноза (ж, к и л) поля температуры по модели WRF с разрешением 39 (левый столбец), 13 (средний) и 4.3 (правый) км.

Состав комбинаций параметризаций, используемый в численных экспериментах включает в себе шесть комбинаций схем параметризаций

- Кесслера (KS) – Каина - Фритша (KF) – Ёнсей(YSU),

- Пурдуде - Линь(PL) – Беттса-Миллера-Янича (BMJ) – Меллора-Ямады-Янича (MYJ),
- Пурдуде - Линь (PL) – ансамблевая Грелла-Дэвени (GD) – АСМ2,
- WSM6 – Беттса Миллера Янича (BMJ) – Ёнсей (YSU),
- Томпсона(ТН) – Ансамблевая Грелла-Дэвени (GD) – Меллора-Ямады-Янича (MYJ),
- Томпсона (ТН) – трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d (G3d) – АСМ2.

Оценивались качество прогноза максимальной, минимальной и средней температуры воздуха. Под максимальной и минимальной температурой понимается максимальное и минимальное значение температуры воздуха на высоте 2м за сутки. Средняя температура – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м.

В конце этой главы сформулированы основные выводы и описана адаптированная модель, которая будет использована в дальнейших исследованиях:

– качество прогноза полей основных метеорологических величин удовлетворительное. Очевидно, что большее разрешение по горизонтали позволяет лучше описывает мезо и мелкомасштабные процессы, но улучшение качества прогнозов основных метеорологических величин при этом не принципиальное. Поэтому было выбрано оптимальное разрешение модели и размер вычислительной области с точки зрения качества прогнозов, доступных вычислительных ресурсов и эффективности модели. Выбрана следующая конфигурация модели: горизонтальное разрешение 5км; одна модельная область размером 297 узлов с юга на север и 392с запад на восток.

– был сделан вывод о том, что модельная ошибка прогноза максимальной температуры наибольшая в декабре, минимальная в апреле. Это объясняется тем, что модель мезомасштабная и в декабре наибольшее влияние на погоду оказывают муссоны Индийского океана, которые не полностью воспроизводятся моделью, а в апреле в основном процессы определяются более крупномасштабными процессами, связанными с положением ВЗК, которые очень хорошо учитываются в модели.

Давление прогнозируется с высокой точностью во всех регионах.

Лучшими комбинациями схем параметризаций физических процессов с точки зрения качества прогноза температуры и давления являются следующие

Топмсона – Грелла-Дэвени – АСМ2,
Кесслера – Каина-Фритша – Ёнсей
Пурдье-Линь – Беттса-Миллера-Янича – Миллер-Ямады-Янича.

В третьей главе рассматривается прогноз осадков с использованием адаптированной гидродинамической мезомасштабной модели WRF и описываются исследования по выбору лучшей схемы параметризации физических процессов, определяющих наличие и количество осадков, и анализируются результаты верификации прогноза осадков.

Ранее было выяснено, что основным процессом определяющим осадкообразование является конвекция, поэтому сначала исследовалась чувствительность качества прогноза осадков именно к описанию конвекции.

Исследование чувствительности проводилось при моделировании в периоды с 04 по 14 мая 2006 года, с 2 по 11 апреля 2008 года, с 24 по 29 апреля 2010 года и с 10 по 19 ноября 2011 года.

Выбор этих периодов связан с тем, что в эти дни на территории Танзании в городе Дар эс Салам и во всех городах, находящихся на побережье Индийского океана, таких как Мтвара, Линди, Морогоро и Танга, включая острова Занзибар и Пемба, выпало рекордно большое количество осадков.

Прогнозы рассчитывались с заблаговременностью 24 часа от 06Z ежедневно в указанные периоды. Всего в верификации прогноза осадков участвовало 330 прогнозов.

Для верификации использовались результаты наблюдения за осадками на станции Дар эс Салаам. Результаты модельного прогноза интерполировались из узлов расчётной сетки в точку с координатами этой станции.

Оценивалось влияние на качество прогноза осадков схемы параметризации конвекции, а также схемы описания неконвективных осадков. Всего было проведено шесть циклов численных экспериментов для всех дней описанного временного периода. В каждом цикле использовалась одна из следующих схем описания конвективных процессов, без параметризации конвекции (NC), схема Каина-Фритш (New Eta) (KF), схема Беттса-Миллер-Янич (BMJ), ансамблевая схема Грелла-Дэвени (GD) и трёхмерная (3d) ансамблевая схема параметризации конвекции Грелла (G3d). Полученные результаты представлены на рисунке 4.

В результате были сделаны следующие выводы:

– если не описывать конвективные процессы, то наблюдается худшая оправдываемость прогноза осадков. Это говорит, о том, что качество прогнозов осадков с помощью гидродинамической модели осадков на данной территории зависит от схемы параметризации конвекции.

– использование ансамблевой схемы параметризации Грелла-Дэвени (GD) для описания конвекции приводит к лучшему качеству прогнозов.

– качество прогноза лучше в сезон с октября по декабрь.

В данной главе также исследовалась чувствительность прогноза осадков к комбинации схем параметризации микрофизических свойств облаков, конвекции и пограничного слоя атмосферы. Были проведены численные эксперименты с различной комбинацией схем параметризации перечисленных физических процессов. Всего использовалось шесть комбинаций параметризаций физических процессов. Использовались те же параметризации, что были использованы при проведении экспериментов по выбору лучшей конфигурации модельной области и описаны в главе 2. В численных экспериментах моделирование проводилось с заблаговременностью 72 часа ежедневно от 00 часов в период с 08 по 24 апреля 2014 года. Особое внимание уделено прогнозам в период с 11 по 13 апреля, так как в этот период наблюдались осадки очень большой интенсивности. Например, на побережье Индийского океана на станции Дар-эс-Салаам 11.04.2014гг. количество осадков 138 мм/сутки. На территории Танзании экстремальными считаются осадки интенсивностью больше 50 мм/сутки. При верификации сначала находили ответ на вопрос: правильно ли прогнозируется факт наличия или отсутствия осадков. Для этого были оценены ошибки прогноза пространственного распределения осадков (мм/72 часов) по данным Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) с разрешением 25 км и WRF при использовании разных комбинации в период с 10 апреля 2014гг.

Результаты при использовании всех комбинаций параметризаций согласовываются между собой и с данными TRMM в том, что много осадков на побережье Индийского океана. При рассмотрении результатов моделирования в деталях, очевидно сильное влияние схемы параметризации конвективных процессов на качество прогнозы осадков. Более того прогностические поля осадков, полученные с использованием комбинаций, состоящих из схем Беттса-Миллера-Янича (BMJ) и ансамблевой Грелла Дэвени (GD), схемы параметризации

микрофизики Пурдуде Линь (PL), Томпсона (TH) и WSM6, охватывали большую территорию и имели большую интенсивность относительно других комбинаций. Такая тенденция может быть связана с тем что, в данном цикле исследований на побережье Индийского океана наблюдались достаточно высокие значения температуры, а поскольку схема Беттса-Миллера-Янича (BMJ) требует достаточного количества влаги и отсутствия выделения скрытого тепла на ранней стадии конвективных восходящих движений, то именно она показала лучшую оправдываемость.

В заключении данного этапа исследования был сделан вывод о том, что:

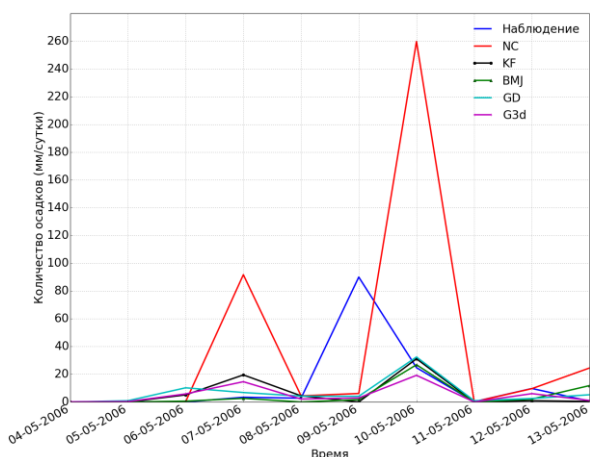
- осадки экстремальной интенсивности не очень хорошо прогнозируются адаптированной гидродинамической мезомасштабной моделью WRF;
- лучшей для прогноза осадков на большей части страны (восток, юг) является комбинация схем параметризаций — Пурдуде Линь - Грелл Дэвени - ACM2, а на северо-западе — Пурдуде Линь - Беттс Миллер Янич-МҮҮ;
- качество прогноза осадков в основном зависит от схемы параметризации конвекции и несущественно зависит от схемы параметризации микрофизики и ППС.

Было проведено дополнительное исследование чувствительности прогноза осадков к схеме параметризации микрофизики и сделан вывод о том, что повысить качество прогноза можно используя более точные двухмоментные схемы параметризации. В связи с этим в дальнейших численных экспериментах участвовали не только две признанные ранее лучшими схемы параметризации конвекции (трехмерная Грелла Дэвени и Беттса Миллера Янича-МҮҮ), а ещё и схема Каина-Фритша и трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d, предполагая, что более точные схемы параметризации микрофизики в сочетании со схемами параметризации конвекции могут дать более качественный прогноз.

Также в данной главе описываются исследования качества прогноза экстремальных осадков в зависимости от схемы параметризации конвекции, конденсации и микрофизики облаков. Для этого были приведены моделирование с комбинациями разных схем параметризации. Всего в экспериментах участвовало 28 комбинаций, которые были получены таким образом, что каждая схема параметризации микрофизики облаков комбинировалась четыре раза со схемой конвекции.

На рисунке 4 представлены результаты 48 часового прогноза с 10 по 12 апреля 2014 года и с 14 по 16 декабря 2015 года.

а)



б)

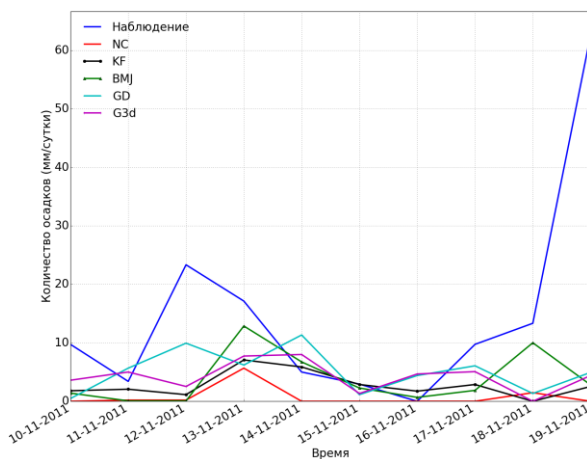


Рисунок 4 – Реальное прогностические значения количества осадков на станции Дар-эс-Салам в периоды а) с 04 по 14 мая 2006 года, б) с 10 по 19 ноября 2011 года.

В заключении третьей главы сформулированы следующие результаты:

– количество модельных осадков существенно зависит от схемы параметризации конвективных и микрофизических процессов;

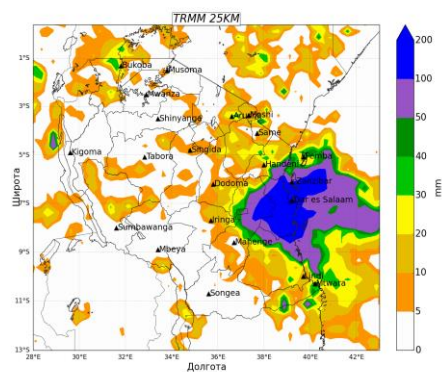
– максимальное и минимальное прогностическое количество осадков связано с использованием схем параметризации конвекции Грелла 3d и Грелла Дэвени, соответственно;

– можно ранжировать схемы параметризации конвекции по количеству прогнозируемых осадков (от максимального к минимальному) следующим образом Грелла 3d, Каина-Фритша, Бетса Миллера Янича и Грелла Дэвени.

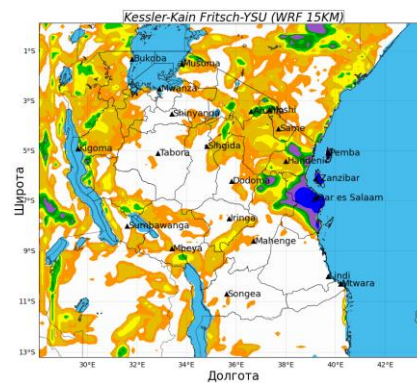
Линь- Беттс Миллер Янич-МҮҮ г) WSM6-Беттс Миллер Янич-YSU д) е) Томпсон-Грелл Дэвени -МҮҮ и ж) Томпсон-Грелл 3d-ACM2

Эти выводы справедливы для двух влажных сезонов.

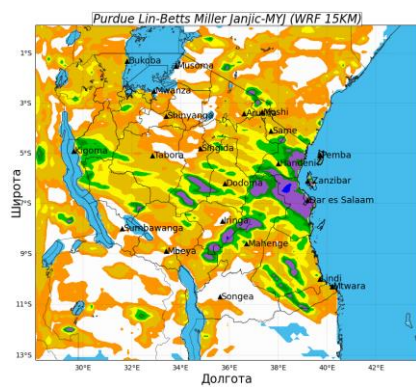
а)



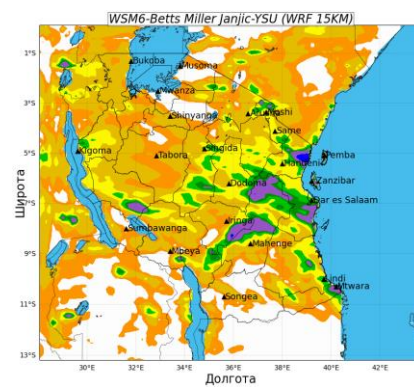
б)



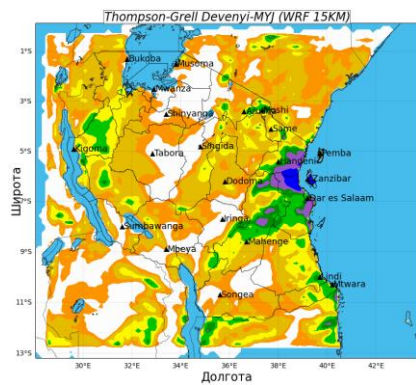
в)



г)



д)



е)

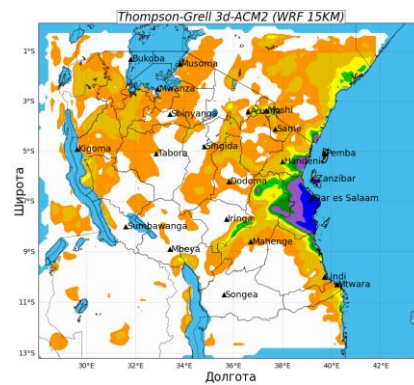


Рисунок 5 — Пространственное распределение количества осадков по данным TRMM (а) и при разных комбинациях схем параметризаций (б) Кесслера-Каина-Фритша -YSU, в) Пурдуде

Четвертая глава посвящена разработке схемы ансамблевого прогноза осадков, целью которой являлась повышения качества получаемого с использованием адаптированной мезомасштабной модели WRF прогноза осадков. При разработке схемы ансамблевого прогноза осадков полагалось, что каждый член ансамбля должен быть согласован с неопределенностью в наблюдениях. Схема ансамблевого прогноза были создана путем варьирования комбинаций схем параметризации физических процессов, таким образом, что каждая схема параметризации микрофизики облаков была четыре раза скомбинирована со схемами параметризации конвективных процессов при фиксированной схеме параметризации пограничного слоя атмосферы и с одинаковыми начальными данными для каждого члена ансамбля. Итого первоначально был создан ансамбль, состоящий из 28 членов. Были рассчитаны суммарные и среднеквадратические ошибки прогноза количество осадков, как для всех членов ансамбля, так и для каждого члена ансамбля отдельно за период с 11 по 12 апрель 2014гг.

На первом этапе был оценена корректность данного ансамбля. Были построены ранговые гистограммы (диаграммы Талаграна), целью которых является оценка степени разброса членов ансамбля, а, следовательно, и степень доверия к ансамблю. Первичный анализ заставил отказаться от 12 членов ансамбля.

Далее в экспериментах были использованы прогностические значения 16 членов ансамбля и наблюдения, по которым построены диаграммы Талаграна. Весь диапазон прогностических значений разделён на 17 интервалов и отдельно рассматривались ситуации осадков небольшой (меньше 50 мм/два дня) и большой интенсивности.

Полученные результаты показали, что в 10 из 16 случаев, что составляет примерно 63%, модель точно прогнозирует слабые осадки. Что же касается качества прогноза экстремальных осадков, то многие (9 из 16) члены ансамбля, что составляет около 56%, превышают прогностическое количество осадков, следовательно, качество прогноза осадков большой интенсивности невысокое (44%). Но несмотря на большие ошибки в прогнозе сильных осадков, модель позволяет качественно оценивать ситуации (наличие или отсутствие) экстремальных осадков.

В заключение, данного этапа сделан вывод о том, что в оперативной практике схему ансамблевого прогноза осадков, состоящую из 16 членов ансамбля, можно использовать при

прогнозе слабых осадков, а интенсивность осадков большей интенсивности лучше прогнозировать другим методом. Ансамблевый прогноз позволяет прогнозировать только наличие или отсутствие интенсивных осадков и требует дальнейших исследований.

В дальнейшем предполагается добавить в систему ансамблевого прогноза осадков учёт неточностей в начальных данных.

В пятой главе рассматриваются вопросы о применении фильтр Калмана для уточнения прогноза осадков, основываясь на современных подходах. Фильтр Калман работает по алгоритму прогноз-коррекция. Он состоит из двух повторяющихся этапов:

- прогностическое уравнение;
- система уравнений коррекции.

На первом этапе прогнозируется вектор состояния в следующий момент времени с модельными ошибками. На втором этапе на основе результатов измерений модифицируют прогностическое значение, учитывая неточность и зашумленность результатов прогноза и результатов измерений.

Алгоритм фильтрации формулируется следующим образом

а) Прогностические уравнения

1. Прогностические уравнения для вектора состояния системы

$$x_k^- = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (1)$$

2. Прогностические уравнения для ковариационной матрицы вектора ошибки

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

б) Система уравнений коррекции

3. Вычисление коэффициента Калмана

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

4. Обновление оценки вектора состояния системы с учетом измерения z_k

$$x_k = x_k^- + K_k (Z_k - Hx_k^-) \quad (4)$$

5. Обновление ковариационной матрицы вектора ошибки

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (5)$$

где K – текущий момент времени

- $k-1$ – предыдущий момент времени
- x_k^- – априорное значение вектора состояния системы в текущий момент времени
- x_{k-1} – вектор состояния системы в предыдущий момент времени
- P_k^- – априорное значение ковариационной матрицы вектора ошибки
- P_{k-1} – ковариационная матрица вектора ошибки в прошлый момент времени
- K_k – коэффициент Калмана (Kalman gain)
- Z_k – результаты измерений в текущий момент времени
- I – единичная матрица
- A – оператор модели системы,
- B – переменная, определяющая управляющее воздействие
- H – матрица, определяющая отношение между измерениями и состоянием системы
- R – ковариационная матрица ошибок измерения
- Q – матрица ошибок, определение шума процесса

Использовалось одномерный линейный фильтр Калмана для корректировки результатов моделирования WRF.

Для решения поставленной цели были использованы результаты, полученные ранее и описанные в главе 3 – за периоды с 08 по 24 апреля 2014 г и с 15 по 24 декабря 2011г оценивалось качество моделирования на станции Дар-эс-Салаам.

Был разработан алгоритм корректировки результатов моделирования с помощью системы уравнения 1 – 5. Самой сложной задачей при использовании одномерного линейного

фильтр Калмана является определением ковариационных матриц ошибок измерений и моделирования.

В данной работе для определения ковариационных матриц ошибок были использованы дисперсия измерений и моделирования, соответственно. Ковариационная матрица рассчитывалась отдельно для короткого и длинного влажных сезонов на станции Дар-эс-Салаам.

Качество прогноза осадков с корректировкой фильтром Калмана оценивалось путем сравнения результатов моделирования с фильтрацией и без и данных наблюдений. Были рассчитаны среднеквадратическая ошибка и коэффициент детерминации.

В качестве примера, в таблице 1 и на рисунке 7 представлены результаты расчетов для периода с 08 по 24 апреля 2014 г.

Если проанализировать значения коэффициента детерминации без фильтра и после использования фильтра Калмана, то виден максимальный коэффициент детерминация (89%) при использовании комбинации параметризаций Кесслера – Каина-Фритш – Ёнсей и минимальный (63%) для комбинации WSM6 – Бетс Миллера Янича – Ёнсей.

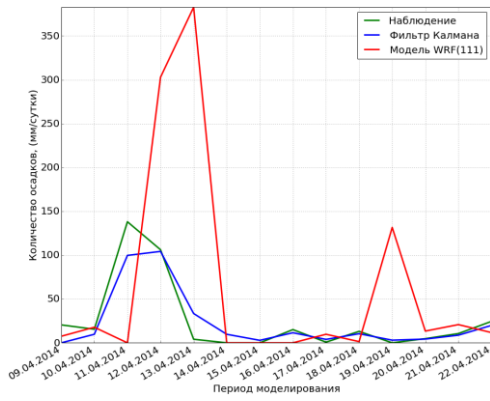
Результаты численных экспериментов для второго сезона, показывают, что в этот период среднеквадратичное отклонение несущественно отличается для разных комбинаций параметризаций. Наибольшее улучшение качества прогноза осадков за счёт применения фильтра получено при использовании комбинации параметризаций Пурдуге - Линь – Бетса - Миллера - Янича – Миллера - Ямады - Янича (2%), а наименьшее для комбинации Томпсона – Грелла - Девени – Миллера - Ямады - Янича (0.08%).

Таблица 1 – Среднеквадратическая ошибка и коэффициент детерминации количества осадков при моделировании без фильтра и с фильтром Калмана на станции Дар-эс-Салаам за период с 08 по 24 апреля 2014 г.

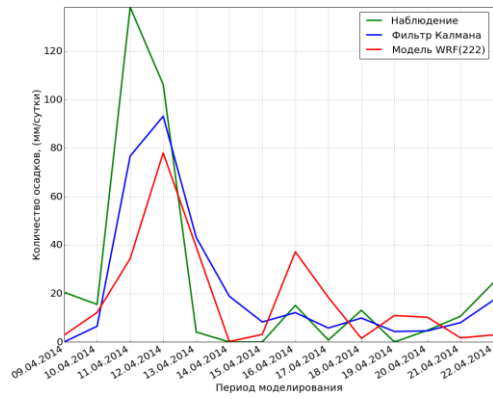
Условия прогноза	Эксперименты					
	111	222	237	621	832	857
Среднеквадратическая ошибка прогноза количества осадков						
Без фильтра Калмана	125,2	32,4	38,0	44,9	42,6	38,9
С фильтром Калмана	14,5	21,6	21,8	26,8	26,7	20,8
Коэффициент детерминация, %						
Без фильтра Калмана	3	41	19	0,1	1	19
С фильтром Калмана	89	76	76	63	64	78

Коэффициенты детерминация в данном цикле численных экспериментов для какого периода очень высокие, в основном более 70% после использования фильтра, за исключением комбинации Кесслер – Каин-Фритш – Ёнсей.

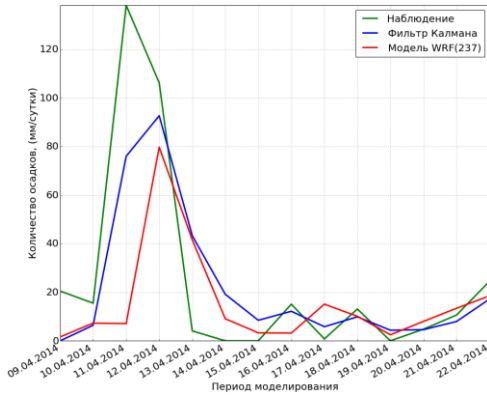
а)



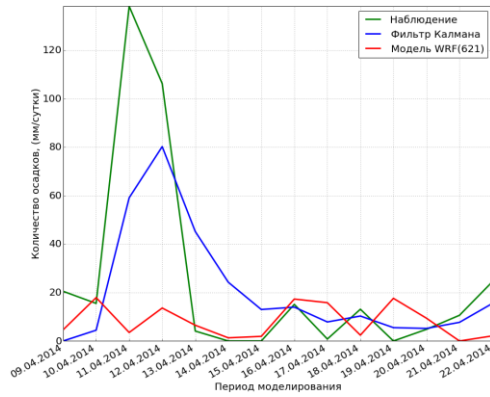
б)



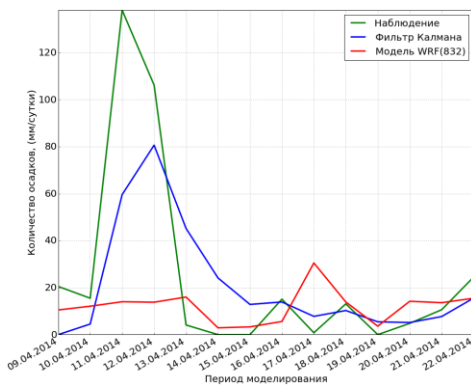
в)



г)



д)



е)

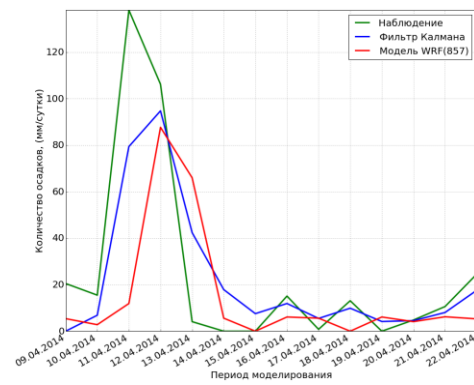


Рисунок 6 – Временной ход количества осадков на станции Дар-эс-Салаам по данным наблюдения (зеленый), с использованием фильтра Калмана (синий) и без фильтра Калмана (красный) при использовании разных схемы параметризации с 08 по 24 апреля 2014гг.

В заключении приведены основные результаты проделанной работы. В ходе выполнения диссертации получены следующие результаты:

1. Для территории Танзании адаптирована мезомасштабная гидродинамическая модель WER, которая уже сейчас используется в оперативной практики Метеорологического Агентства Танзании. Используя результаты адаптации, методику проведения численных экспериментов и полученный опыт можно произвести адаптацию модели к любому региону Восточной Африки.

2. Результаты статистического анализа пространственно- временной структуры полей осадков показывают, что осадки на территории Танзания распределяются неравномерно и возникают за счет разных физических механизмов. Существует четыре типа временного распределения осадков, согласно которым территория Танзании может быть разделена на четыре региона.

3. В результате численных эксперименты с использованием различных комбинаций схем параметризации физических процессов сделаны выводы об основной роли схем параметризации конвекции, и о не существенном влиянии на качество прогноза осадков в исследуемом регионе схемы параметризации пограничного слоя атмосферы и микрофизики облаков.

4. Гидродинамическое моделирование лучше производить с использованием методики вложенных сеток, которые должны совпадать с четырьмя регионами Танзании. Лучшая схема в период с марта по май; в первом и третьем регионах-комбинация параметризаций Томпсона-Грелла Дэвени-Миллера Ямады Янича; в втором регионе -комбинация параметризации — WSM6- Беттса Миллера Янича - Ёнсей; в четвертом -комбинация параметризации — Пурдуде Линь - Грелла Дэвени -АСМ2. В период с октября по декабрь; в первом регионе -комбинация параметризаций Пурдуде Линь - Беттса Миллера Янича - Миллера Ямады Янича; в втором и четвертом регионах -комбинация параметризации — Пурдуде Линь - Грелла Дэвени -АСМ2; в третьем -комбинация параметризации Томпсона -G3d-АСМ2.

5. Была создана система ансамблевого прогноза и установлено на основе разных комбинаций физических процессов улучшая качество прогноза неэкстремальных осадков. Сделано предположение, что улучшение моделирования экстремальных осадков возможно при создании ансамбля за счёт введения ошибок в начальные данные.

б. Были разработаны методы использования фильтра Калмана для учета неточности модели и улучшения качества прогноза осадков. Применение фильтра Калмана улучшило качество прогнозов осадков. Для дальнейшего усиления эффекта от фильтрации Калман следует перейти к двумерному фильтру.

Публикации соискателя по теме диссертации.

В изданиях из перечня ВАК:

1.Kondowe, A.L. (2014) Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model.

Natural Science, 6, 691-699. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2014.610069>.

2.Кондове А.Л, Анискина О.Г(2016) Сравнение схем физических параметризации в модели WRF. Ученые записки РГГМУ. Научно-теоретический журнал. – СПб.РГГМУ, № 44 от 30 сентября 2016г.

Публикации в других изданиях:

1.Kondowe A.L., O.G Aniskina (2014). Impacts of Grid Spacing and Cumulus Schemes on the Quality of Rainfall Forecasts over Tanzania. ISSN 2311-2158. The Way of Science. 2014. № 8 (8).

2.Kondowe A.L., O.G Aniskina (2015). The Role of the WRF Model Parameterization Schemes on the Quality of Meteorological Variables Forecast over Tanzania. ISSN 2413-1032 International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” № 4 (4) Vol.1, December 2015.

3.Лобанов В.А, Кондове А.Л, Шукри О.А «Сценарные оценки будущего климата на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана проекта CMIP5» для выполнения лабораторных работ при обучении в магистратуре по направлению подготовки 280200 «Прикладная гидрометеорология». ЛР № 020309 от 30.12.96, РГГМУ.