

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

На правах рукописи
УДК 551.509.324.2(678)

Кондове Альфред Лоуренсе

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

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Специальность: 25.00.30 – «Метеорология, климатология и агрометеорология»

S

Санкт-Петербург, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения	4
Введение	5
1 Прогноз и климатология осадков в Танзании	14
1.2 Гидродинамическое моделирования атмосферных процессов над территорией Восточной Африки	14
1.3 Исследование пространственно-временных закономерностей распределения осадков на исследуемой территории (Танзания)	17
2 Численная гидродинамическая мезомасштабная модель WRF и её использование для территории Восточной Африки	35
2.1 Описание численной гидродинамической модели WRF	35
2.2 Параметризация физических процессов в гидродинамической модели	39
2.3 Использование гидродинамической мезомасштабной модели WRF в Танзании	46
2.4 Адаптация гидродинамической модели WRF к условиям Танзании	49
2.5 Верификация прогноза основных метеорологических величин к набору параметризаций физических процессов	65
3 Прогноз осадков с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF	78
3.1 Исследование влияния схемы параметризации конвективных процессов на качество прогнозов осадков	78
3.2 Влияние разных комбинаций схем параметризации физических	87

	процессов на качество прогнозов осадков	
4	Ансамблевые прогнозы	110
4.1	Оценка ансамбля с использованием ранговых диаграммы	111
4.2	Создание схема ансамблевого моделирования осадков	114
5	Применение фильтр Калмана для уточнения прогноза осадков	121
5.1	Системы уравнения фильтра Калмана	122
5.1.1	Прогностические уравнения фильтра Калмана	123
5.2	Применение фильтра Калмана для улучшения качества прогнозов осадков	127
	Заключение	133
	Список использованных источников	135

СОКРАЩЕНИЯ

WRF	– Мезомасштабная гидродинамическая модель
ВЗК	– Внутритропическая зона конвергенции;
МAM	– Среднее значение величины за период март-апрель-май;
ОНД	– Среднее значение за период октябрь-ноябрь-декабрь;
ЦДА	– Центры действия атмосферы;
NC	– Без схемы параметризации конвекции;
KF	– схема параметризации конвекции Каина Фритша;
BMJ	– схема параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича;
GD	– схема параметризации конвекции Грелла-Дэвени;
G3d	– схема параметризации конвекции Грела 3d;
OKF	– старая схема параметризации конвекции Каина-Фритша
ECMWF	– Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды
NCAR	– Национальный центр атмосферных исследований
TMA	– Танзанийское Метеорологическое Агентство

ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамическое моделирование атмосферных процессов является одним из самых востребованных инструментов исследования и прогнозирования атмосферных процессов. Сегодня в метеорологическом сообществе именно гидродинамическому моделированию посвящено большое число исследований. С его помощью изучают процессы и само моделирование является объектом исследований.

Качество гидродинамического моделирования сильно зависит от разрешения модели. При этом зависимость качества моделирования от разрешения не является прямой и линейной, может быть ситуация, когда модель лучшего разрешения показывает худшие результаты. Кроме этого качество численного моделирования сильно зависит от описания неадиабатических процессов – параметризаций. Разные схемы параметризаций описывают с разной точностью и детальностью физические процессы. Для разной местности должен быть свой набор параметризаций физических процессов. Многие исследования посвящены выбору наиболее подходящих для конкретной модели и конкретной местности набору параметризаций [1]. Схемы параметризаций физических процессов являются одним из основных источников неопределенностей в гидродинамических моделях, особенно роль параметризаций повышается в случае использования модели высокого разрешения [2]. Важно понять, с какой именно неопределённостью связаны ошибки в моделировании основных метеорологических величин, таких как температура, влажность и профили ветра, и оценить насколько более сложные схемы параметризаций физических процессов улучшат результаты моделирования. Только когда выбрана

наилучшая комбинация схем параметризаций физических процессов можно поставить и, следовательно, решить вопрос о моделировании сложных полей метеорологических величин, к которым относятся осадки.

Создать гидродинамическую модель одному «с нуля» сегодня невозможно. Даже если над созданием модели работает целый коллектив, то процесс очень сложен, длителен и не всегда гарантирован хороший результат. Поэтому сегодня метеорологические службы стран, где отсутствуют давние наработки по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов, вступают в метеорологические консорциумы или адаптирует, находящие в открытом доступе гидродинамические модели.

Гидродинамическая мезомасштабная модель атмосферы должна быть адаптированной к исследуемой территории так, чтобы выбранная модельная область позволяла корректно ставить граничные условия, чьё влияние на область интегрирования было минимальным. Шаги интегрирования по времени и дискретизация по пространству должны обеспечивать необходимую точность воспроизведения атмосферных процессов и одновременно не требовать чересчур больших компьютерных ресурсов. Кроме этого, должен быть использован подходящий к данной местности и выбранному разрешению набор параметризаций [2, 5].

Гидрометслужбы стран Африки сильно нуждаются в гидродинамических моделях атмосферы, но исследований там практически не ведётся. Проведённый обзор научной литературы позволил выяснить, что в одной из самых значимых стран Африки – Танзании – исследований, посвященных гидродинамическим прогнозам погоды практически нет. А потребности в гидродинамическом объективном прогнозировании в интересах оперативного прогноза и научных исследований очень большие.

Одной из самых сложных и важных метеорологических проблем Африки является прогноз осадков.

Количество осадков в восточной Африке (Танзания, Уганда, Кения) характеризуется большой пространственной и временной изменчивостью из-за сложного рельефа, наличия больших внутренних озер (таких как Виктория, Ньяса, Танганьика), влияния Индийского океана на востоке, а также особенностей циркуляции синоптического масштаба (таких как внутритропическая зона конвергенции (ВЗК), муссонная циркуляция) и мезомасштабными циркуляциями [6]. Они существенно влияют на местные климатические условия и пространственное распределение таких метеорологических величин, как температура и осадки. Эти особенности обуславливают климатические различия в количестве осадков, режим которых меняется от влажных до засушливых районов, где серьезные метеорологические засухи и малое количество осадков являются постоянной угрозой жизни. В последние годы в восточной Африке наблюдаются засушливые периоды, когда дефицит осадков оказывает существенное влияние на сельское хозяйство, что препятствует экономическому развитию исследуемого региона [7].

Численные и климатические модели еще не широко изучены для исследования и оперативного прогнозирования погоды в развивающихся странах, включая Танзанию. В последние годы именно с гидродинамическим моделированием связаны надежды на улучшение качества прогноза погоды. По этой причине моделирование атмосферных процессов на территории Танзании является очень актуальной задачей для исследования.

Таким, образом, актуальность данной темы исследования состоит в том, что улучшение качества прогноза погоды на территории Танзании позволяет более разумно планировать и осуществлять:

меры защиты и готовности к борьбе с малярией;
работы в сельском хозяйством;
работу электростанций и других отраслей народного хозяйства.

Для описания эволюции атмосферных процессов на территории Танзании и прогнозирования осадков в данной работе была применена гидродинамическая модель WRF [3-4]. Одной из важнейших задач исследования является определение оптимального набора методов параметризаций физических процессов. Так как целью было уточнение прогноза осадков, то особое внимание уделялось изучению параметризаций физических процессов, влияющих на осадкообразование. Было исследовано влияния разных схем параметризации на качество прогноза количества осадков и на улучшения качества прогноза погоды в целом.

Точность прогноза при помощи гидродинамической модели, как уже отмечалось, зависит от многих факторов. Из них самыми важными являются: точность и детальность начальных данных, разнообразие физических процессов, которые описываются уравнениями модели, соответствующие физические параметризации и возможность усвоения данных измерений в расчетах модели.

Одной из главных проблем в создании мезомасштабной модели для использования в конкретном регионе является определение наиболее подходящей конфигурации модели. В различных регионах преобладают разнообразные условия и свои уникальные проблемы, поэтому оптимальные настройки для одной области могут дать худшие результаты в другой. Одним из наиболее важных элементов в настройке модели является выбор набора физических параметризаций, которые будут использоваться [2], [5].

Достоинством модели WRF является то, что она обеспечивает большой набор вариантов параметризации, из которых можно выбирать схемы,

руководствуясь теми или иными требованиями к детализации описания физики неадиабатических процессов. Это многообразие создаёт свои проблемы для моделирования, так как выявление лучшего пакета описания физических процессов становится очень сложной задачей.

Кроме практической значимости гидродинамическая модель атмосферных процессов позволяет решить и научные задачи – 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, 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 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 в исследуемом регионе, 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 цели 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.

Доклаживались 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 работ российских и зарубежных авторов.

1 Прогноз и климатология осадков в Танзании

1.2 Гидродинамическое моделирования атмосферных процессов над территорией Восточной Африки

До настоящего времени исследований по гидродинамическому моделированию атмосферных процессов в Восточной Африке не очень много. Гидродинамическому моделированию в этом регионе посвящены работы Ваниха Паскаль Феликс [8] и Хабелва Хамза Аихумани [9]. При этом не рассматривается прогноз погоды. Можно смело заключить, что данное исследование является первым, посвящённым созданию комплекса гидродинамического прогноза погоды в Восточной Африке.

До последнего времени не существовала гидродинамической модели в этом регионе земного шара, в которой очень заинтересована метеорологическая служба Танзании и соседних стран. Поэтому, как уже отмечалось, создание модели (в данном случае адаптация существующей), её верификация, выбор оптимального набора параметризаций физических процессов является очень актуальной задачей.

Вопросы параметризации физических процессов приобретают тем большую актуальность, чем на больший срок дается прогноз и чем более детально требуется описать атмосферные процессы. В этом случае очень важен учет неадиабатических мезо- и микромасштабных притоков тепла, влаги и количества движения. Для краткосрочных прогнозов атмосферные процессы можно в определенной степени считать менее зависимыми от внешних притоков энергии. Однако, чем детальнее требуется прогноз, тем адекватнее следует

учитывать разные факторы и тем точнее надо описывать все подсеточные процессы, то есть наиболее корректно подбирать схемы параметризаций, что требует глубокого понимания происходящих физических процессов [10].

Большинство из небольшого количества исследований, посвященных прогнозам осадков с использованием гидродинамических моделей в тропическом регионе, это работы по исследованию и прогнозу климата.

Исследованию влияния схемы параметризации радиации в модели WRF на качество описания климата Восточной Африки посвящена работа X Zhang, 2007[11], в которой автор пришел к выводу, что модель WRF хорошо описывает годовую изменчивость осадков.

Влиянию качества описания глубокой конвекции на качество прогноза посвящена работа С. Hohenegger и др., 2007 [12]. В исследованиях 2009 года S. Davolio и др. [13] и M.L. Weisman и др. [14] сделали вывод о большой чувствительности качества прогноза осадков к неопределенностям в начальных и граничных условиях, что значительно уменьшает качество численных прогнозов осадков даже при использовании модели высокого разрешения.

В работе М.М. Miglietta и др. 2012 года [15] доказывается, что описание процессов на подстилающей поверхности в климатической модели существенно влияет на температуру и несущественно на количество осадков.

Сравнительный анализ результатов моделирования с помощью локальной модели (CLM) на один год представлен в работе M.F. Tewari и др., 2004, [16]. Авторы по результатам численных экспериментов оценили влияние схем Кайн-Фричш и Тидтке [17, 18] для параметризации конвективных процессы на количество прогноза осадков. Область моделирования охватывала весь Африканский континент. Результаты показали, что более реальные значения прогностических осадков получены при использовании схемы Тидтке, но

количество осадков часто занижается. Использование схемы Кайн-Фричш для параметризации конвекции наоборот существенно завышает количество осадков.

Исследования [19-20] посвящены изучению влияния разных схем параметризации физических процессов на качество прогнозов осадков региональной климатической моделью RegCM2 [21-22] для экваториальной Африки. С помощью этой модели была найдена зависимость между температурой воды озера Виктория и количеством осадков в восточной Африке [23]. Установлено, что модель завышает сезонное количество осадков в восточной части Конго, Уганде и, частично, в Кении.

В работах [24-25] авторы описывают многолетние численные эксперименты по исследованию чувствительности качества прогноза осадков к схемам параметризации конвективных процессы и радиации в модели RegCM3. Было установлено, что модель чаще завышает количество осадков. Результаты исследований позволяют говорить о том, что схема параметризации конвекции Грелла (Grell) [26] занижает количество осадков, а схема параметризации Эммануэля (Emmanuel) [27] дает более точные прогнозы количества осадков с точки зрения пространственного распределения, но завышает количество осадков.

Выше приведены результаты практически всех, имеющихся исследований по моделированию и прогнозу осадков на Африканском континенте. Их немногочисленность ещё раз доказывает актуальность данного исследования.

Методика проведения исследований и их результаты могут быть использованы в любом регионе земного шара. Но результаты исследований будут (и частично уже используются) Метеорологическим агентством Танзании, и близлежащих стран.

Так как все численные эксперименты будут проводиться применительно к территории Танзании, то на первом этапе работы было исследовано пространственно временное распределение осадков в этом регионе. При проведении аналогичной адаптации модели к другому региону считаем необходимым проведения этого этапа с целью исследования поведения характеристик метеорологических величин в исследуемой области.

1.3 Исследование пространственно-временных закономерностей распределения осадков на исследуемой территории (Танзания)

Танзания находится на юге Восточной Африки, занимает площадь около 945090 км², включая острова Мафии, Пемба и Занзибар и является самой большой страной восточной Африки.

Танзания расположена к югу от экватора, в пределах от 29 до 42° в.д. и от 12 до 1° ю.ш. Омывается на востоке Индийским океаном и озерами Танганьика на западе, Виктория на север–западе и Ньяса на юго-западе. Танзания обладает различной орографией и многообразными природными условиями. Вдоль побережья расположена небольшая равнина, большую часть страны занимает плато, средняя высота которого около 1290 м над уровнем моря. Вулкан Килиманджаро – высочайшая точка Африки (5895 м) – расположен на север–востоке страны.

В большей части страны климат субэкваториальный (климат экваториальных муссонов), только в северной части наблюдается экваториальный климат. Температурный режим на территории Танзании однороден: средняя зимняя температура 22°C, а в горных районах колеблется от 12 до 20 °C. Среднемесячная летняя температура изменяется от 25°C на юге

страны до 27°C на севере и 24°C в горных районах. На островах климат влажный, средняя дневная температура от 28 до 30°C. Температура воды в Индийском океане от 24 до 26 °C.

В центральной части Танзании (высота над уровнем моря от 1200 до 1700 м) выделяют три климатические области

- северо-восточную зону влажного экваториального климата с двумя максимумами выпадение осадков,
- озёрную зону влажного экваториального климата с одним коротким сухим сезоном,
- область Танганьиского плоскогорья и юго-востока.

Горные районы и юго-восточная часть страны имеют все признаки тропического климата, что обуславливается особенностями рельефа.

Количество выпадающих осадков очень неоднородно. На территории Танзании бывает два сезона дождей:

- с марта по май,
- с октября по декабрь.

Эта годовая цикличность связана не только с циркуляциями синоптического масштаба (ВЗК, муссонной циркуляцией), но и с мезомасштабными циркуляциями, вызванными региональными факторами, такими как наличие больших водоемов и сложного рельефа. ВЗК мигрирует, следуя за движением солнца с временным запаздыванием на один месяц [28].

В период с декабря по февраль ВЗК располагается на 10 – 15° ю.ш., причем преобладающий северо-восточной муссон меняет свое направление после пересечения экватора и становится северо-западным [29, 30]. Этот поток воздуха довольно сухой, за счет чего в северной части страны наблюдается относительно сухая погода. Здесь и на побережье Индийского океана осадки возникают за счет

орографического подъема воздуха, бризовой циркуляции. Орографические подъемы и конвергенция воздушных масс в области ВЗК вызывают в этот период значительное выпадение осадков в южной части страны [31].

В период с марта по май, перенос влаги осуществляется за счет ВЗК, которая смещается с юга на север. За счет крупномасштабной конвергенции и неустойчивости преобладающих воздушных масс Индоокеанского происхождения выпадает много конвективных и неконвективных осадков [32, 33].

В период с октябрь по декабрь ВЗК мигрирует с севера на юг намного быстрее по сравнению с движением в северном направлении [33] и в регионе преобладают северные и западные ветра, которые приносят влажный термодинамически неустойчивый воздух на северо-запад и запад страны.

По сравнению с другими тропическими регионами в Восточной Африке имеется много крупных озёр, которые обеспечивают условия для взаимодействия крупномасштабных климатических процессов с озерными мезомасштабными потоками.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что основными факторами, влияющими на осадки в Танзании являются:

- субтропические антициклоны (Южный Индийский, Южный Атлантический, Азорский, Арабские системы высокого давления) и связанное с ними перемещение ВЗК;
- воздушные массы, поступающие с запада;
- рельеф;
- большие водоемы (озёра Виктория, Танганьика, Ньяса и Индийский океан).

Разнообразный рельеф (рисунок 1.1) данной территории способствует большой пространственной изменчивости распределения осадков. Высота орографии колеблется от 50 м на побережье Индийского океана до 5880 м на северо-востоке (пик Килиманджаро).

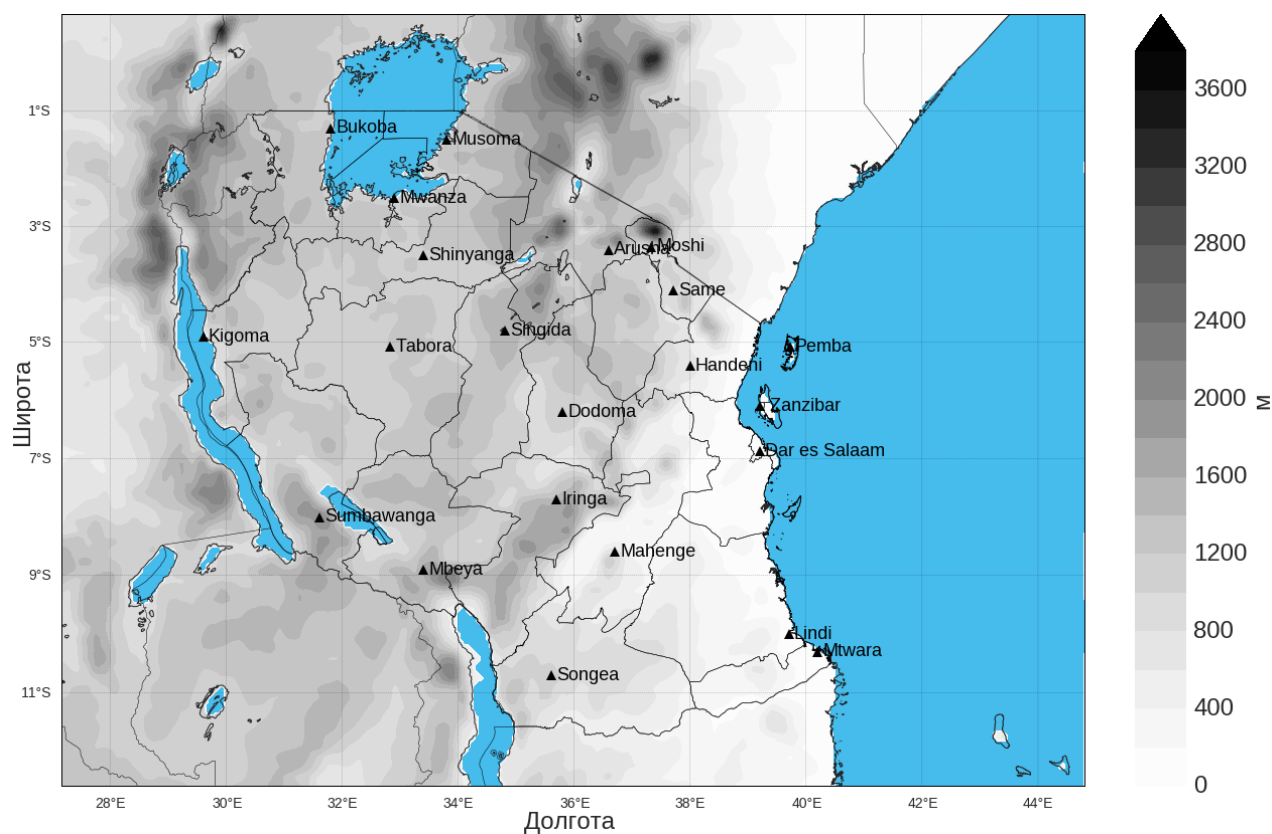


Рисунок 1.1. – Территория Танзании: Высота орографии и расположение метеорологических станций

На первом этапе исследования была получена климатология осадков. Для этого использовались данные со 140 метеорологических станций, проводящих наблюдения за осадками на территории Танзании в период с 1856 по 2014 гг., которые были получены из архива Global Historical Climatology Network (GHCN)[34]. Местоположение станций представлено на рисунке 1.2. Стоит

отметить, что из 140 станций, которые входят в архив GHCN, только 21 являются метеорологическими (рисунок 1.1).

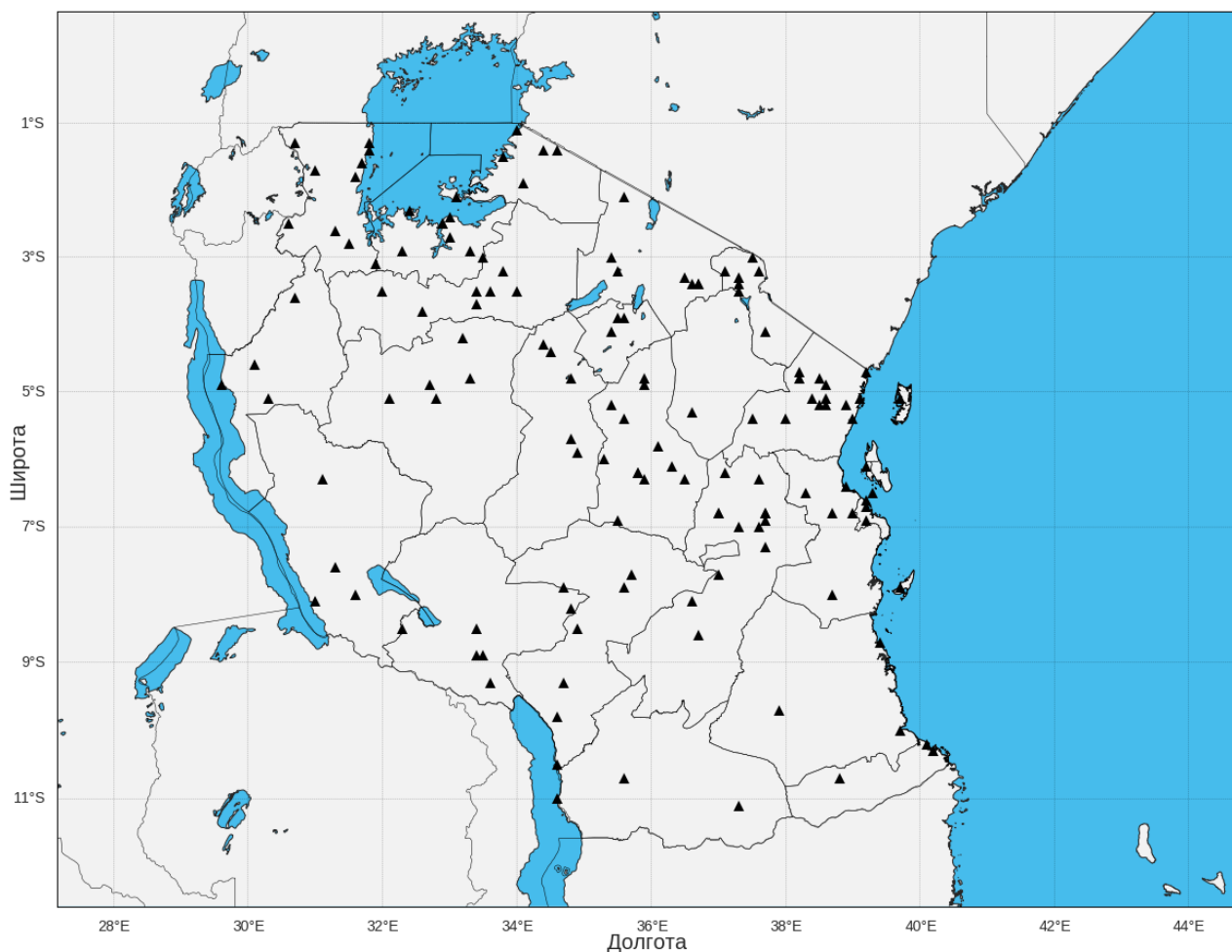


Рисунок 1.2. – Территория Танзании: Расположение станций, проводящих измерение количества осадков

Кроме этого для оценки качества прогнозов были получены данные синоптических наблюдений на 15 метеорологических станциях из Танзанийского Метеорологического Агентства. На основе этих данных для каждого года

(индекс y) и каждого месяца (индекс m) рассчитаны и проанализированы среднемесячные значения метеорологических величин.

Для анализа количество осадков на территории Танзании использовались следующие статистические моменты:

среднее количество осадков:

$$\bar{Y}(m) = \frac{\sum_y Y(y, m)}{N(st)}, \quad (1.1)$$

где $\bar{Y}$ – среднее количество осадков, мм/месяц;

$Y(y, m)$ – количество осадков за месяц, мм/месяц;

$N(st)$ – количество станций.

среднеквадратическое отклонение количество осадков:

$$\sigma(m) = \sqrt{\frac{\sum [Y(y, m) - \bar{Y}(m)]^2}{N(y) - 1}}, \quad (1.2)$$

где $\sigma(m)$ – среднеквадратическое отклонение количества осадков, мм;

$N(y)$ – количество станций, участвующих в анализе за год y .

коэффициент вариации количества осадков:

$$V(m) = \frac{\sigma(m)}{\bar{Y}(m)}, \quad (1.3)$$

где $v(m)$ – коэффициент вариации количества осадков.

На рисунках 1.3 и 1.4 представлен годовой ход среднемесячных значений, среднеквадратичных отклонений и коэффициента вариации многолетних значений месячных сумм осадков для территории Танзании.

Анализ годового хода средних значений и среднеквадратических отклонений многолетних месячных сумм осадков выявили, что с октября по май в Танзании наблюдается влажный период, где четко выражены два сезона дождей: первый с октября по декабрь, а второй с марта по май при этом с января по февраль наблюдается переходный сезон. Апрель и декабрь являются месяцами с максимальным количеством осадков – 221,1 и 135,0 мм/месяц, которым соответствует и максимальное среднеквадратичное отклонение – 9,9 и 7,2 мм/месяц, соответственно.

С мая по август среднеквадратичное отклонение количества многолетних значений месячных сумм осадков убывает вместе с убыванием средних многолетних значений месячных сумм осадков.

Минимальное значение в годовом ходе среднемесячных количеств осадков и среднеквадратичных отклонений наблюдается в августе – 19,0 и 3,5 мм/месяц, соответственно.

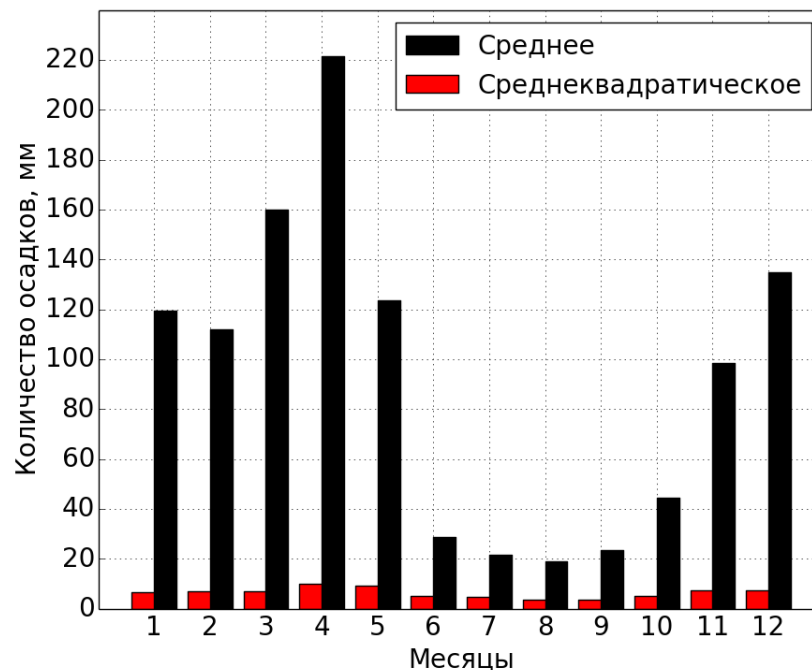


Рисунок 1.3 – Годовой ход средних значений и среднеквадратических отклонений многолетних месячных сумм осадков

Если совместно проанализировать годовой ход средних значений и среднеквадратических отклонений, то чётко видна их схожесть. Максимальные значения наблюдаются в зимние и летние месяцы.

Из анализа графика, представленного на рисунке 1.4, видно, что годовой ход коэффициента вариации многолетних значений месячных сумм осадков на территории Танзании изменяются в очень широком диапазоне и достигает своего максимума 98.8 % в июле и минимального значения 28.8% в марте. Это говорит об очень сильной изменчивости количества осадков и о трудности их прогнозирования.

Далее были проанализированы месячные суммы осадков на 15 метеорологических станциях.

На рисунках 1.5 и 1.6 представлены диаграммы размаха («ящик с усами», box and whisker plot) месячных сумм количества осадков на территории Танзании за период с 1960 по 2014 гг.

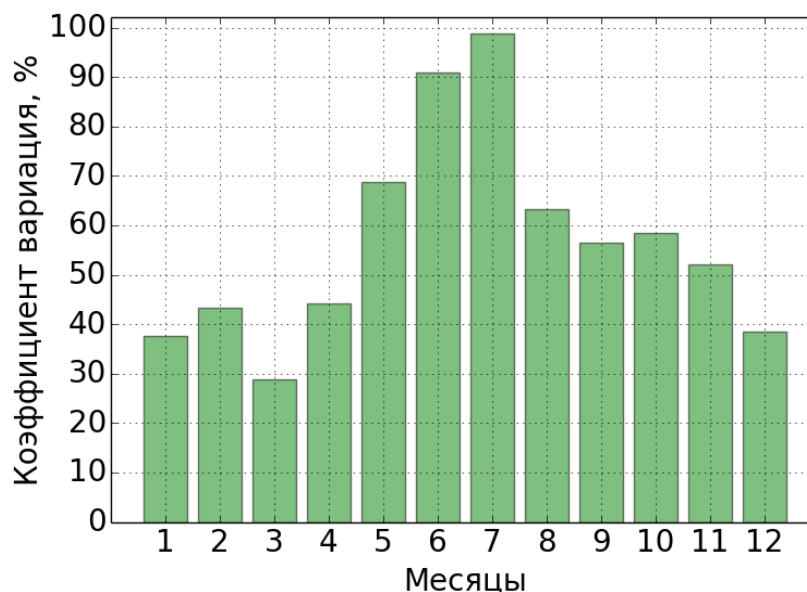


Рисунок 1.4 – Годовой ход коэффициента вариация многолетних значений месячных сумм осадков

Из анализа диаграмм размаха следует, 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).

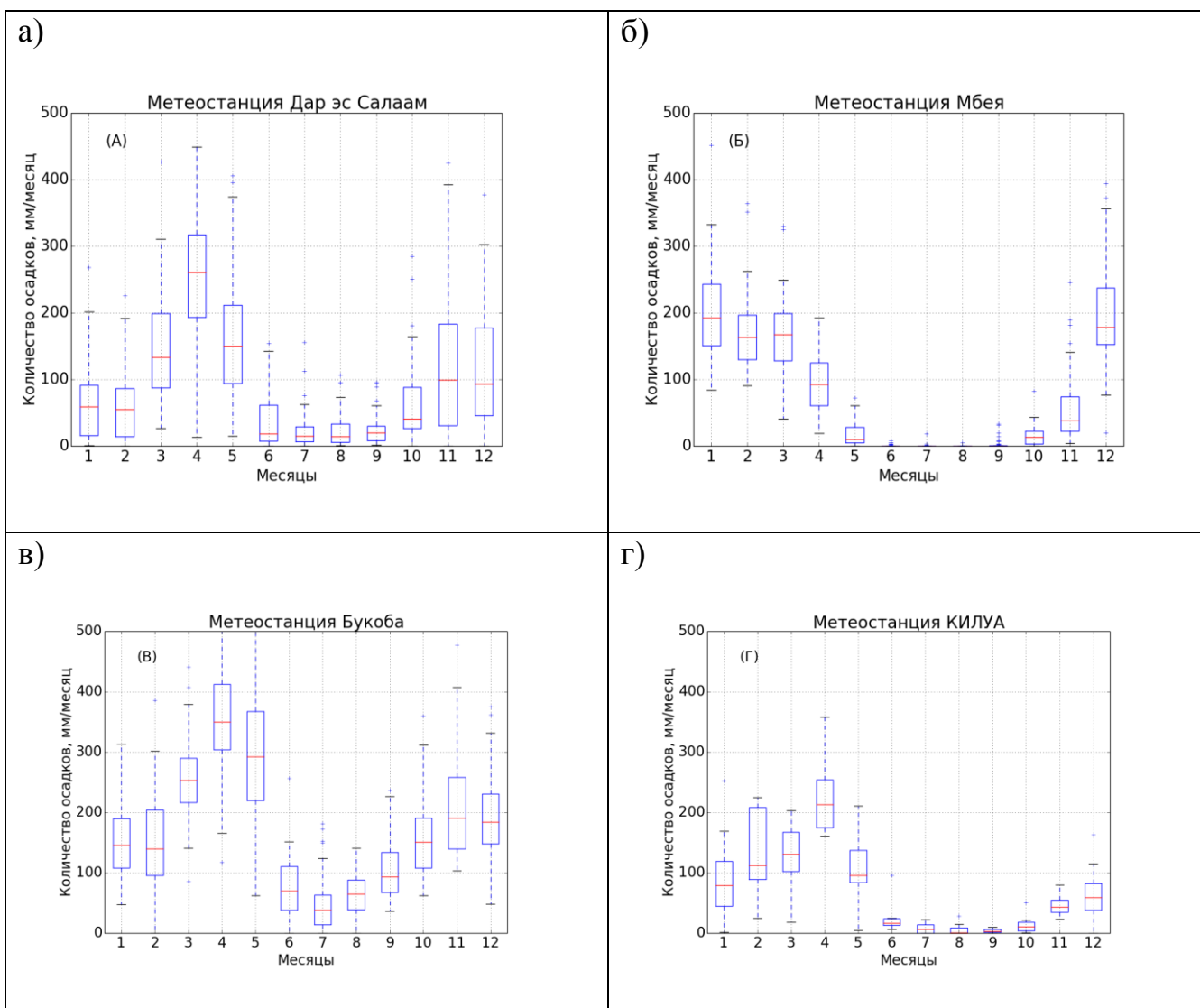
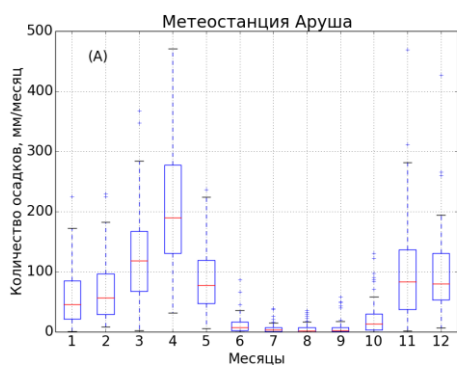
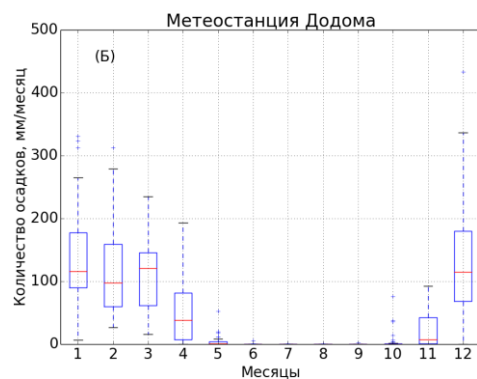


Рисунок 1.5 – Диаграммы размаха среднемесячного количества осадков на метеостанциях а) Дар эс Салаам , б)Мбея, в)Букоба, г) Килуа

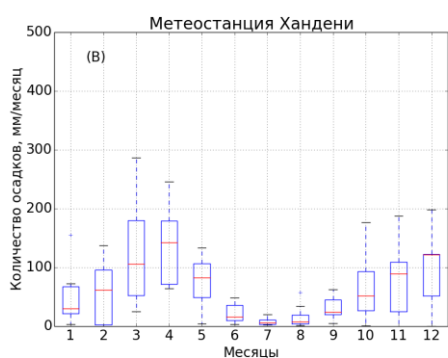
а)



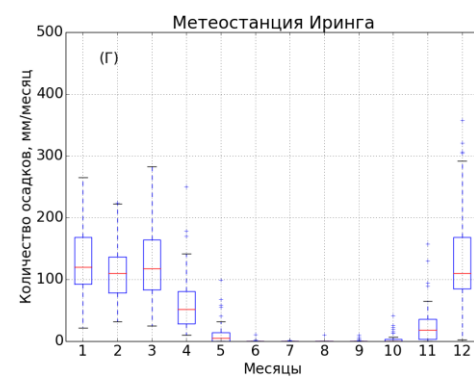
б)



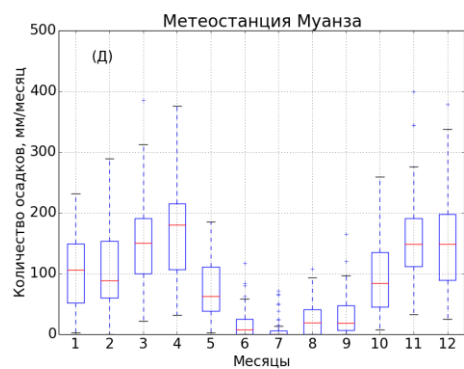
в)



г)



д)



е)

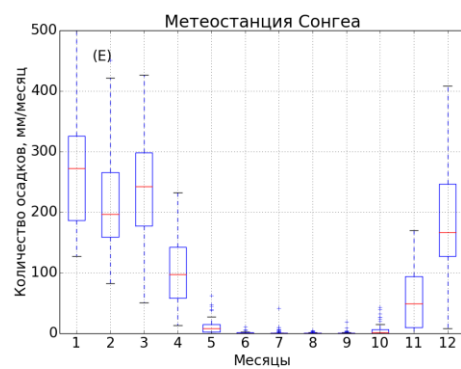


Рисунок 1.6 – Диаграммы размаха среднемесячного количества осадков на метеостанциях а) Аруша б) Додома в) Хандени г) Иринга д) Муанза и е) Сонгеа

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

На всей территории наблюдается минимальное количество осадков в период с июня по сентябрь. В этот период большое количество осадков отмечается на станциях с двумя максимумами и составляет около 10 мм/месяц. Осадки в этот период вызваны 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 воздушными потоками и потоками с озера Виктория.

На станциях, где осадки случаются один раз в год, в зимние время года вообще не наблюдается осадков, кроме станции Килуа, где среднее количество осадков 3 мм в месяц.

Резюмируя результаты этого этапа исследования, можно сказать, что количество осадков на территории исследования обладает очень сильной изменчивостью, как во времени, так и по пространству. Поэтому для эффективного проведения сельскохозяйственных работ и работы гидроэлектростанций, необходимы качественные прогнозы осадков, как краткосрочные, так и долгосрочные.

Неравномерное пространственно-временное распределение осадков оказывает влияние на математическое моделирование и качество прогноза

осадков. Для наилучшего моделирования на территории и последующей верификации было проведено районирование территории Танзании по сезонным и месячным суммам осадков с использованием методов кластеризации. При кластеризации использованы месячные данные об осадках на 15 станциях за период с 1960 по 2014 гг. Кластеризация была сделана с помощью неиерархического метода кластерного анализа К-средних, в котором проводится анализ дисперсии. Процедура начинается с К случайных кластеров и в дальнейшем минимизируется изменчивость внутри кластеров и увеличивается изменчивость между кластерами [35].

Для каждой полученной месячной суммы осадков были рассчитаны аномалии осадков для каждой станции

$$\text{Аномалия } (Y(st, y, m)) = Y_i(st, y, m) - \bar{Y}(st, m) \quad (1.4)$$

где $\bar{Y}(st, m)$ — среднее количество осадков на станции st в месяц m ,
в мм.

Отдавая себе отчёт в том, что процедура кластеризация не даёт точного ответа на вопрос о схожести или различии объектов, было проведено несколько экспериментов по районированию территории по количеству осадков. В районировании использовались ряды среднемесячных сумм осадков для каждого месяца на каждой станции. Так как кластерный анализ сильно зависит от метода определения расстояния, то в каждом эксперименте использовался свой метод определения расстояния. При окончательном анализе в один окончательный кластер объединялись станции в нескольких экспериментах попавшие в один кластер.

Использовались следующие способы определения расстояния между объектами:

а) Евклидово расстояние

$$S(x,y)=\sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2}; \quad (1.5)$$

б) Квадрат евклидова расстояния

$$S(x,y)=\sum_i (x_i - y_i)^2; \quad (1.6)$$

в) Расстояние городских кварталов (манхэттенское расстояние)

$$S(x,y)=\sum_i |x_i - y_i|; \quad (1.7)$$

в) Расстояние Чебышева

$$S(x,y)=\max |x_i - y_i|; \quad (1.8)$$

г) Степенное расстояние

$$S(x,y)=\left(\sum_i |x_i - y_i|^p\right)^{1/r}; \quad (1.9)$$

где p, r – параметры, определяемые пользователем.

Параметр p ответственен за постепенное взвешивание разностей по отдельным координатам, параметр r ответственен за прогрессивное взвешивание больших расстояний между объектами.

д) абсолютное значение косинуса угла между векторами

$$\cos \alpha = \text{abs}\left(\sum \frac{x_i \cdot y_i}{x_i \cdot y_i}\right); \quad (1.10)$$

е) угол в радианах $(0, \pi)$ между линиями, проходящими через центр кластера, определяемые векторами;

ж) коэффициент корреляции

(1.11)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

и) абсолютное значение коэффициента корреляции

(1.12)

$$r = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \right|;$$

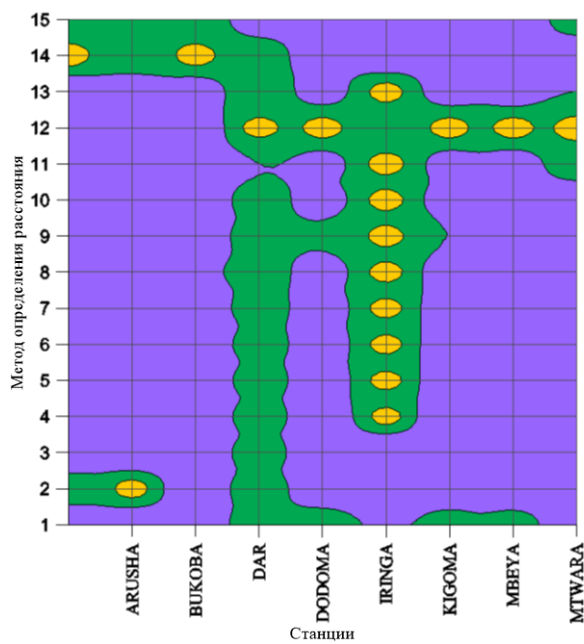
к) количество точных совпадений.

После проведения предварительных исследований в данной работе а priori (согласно результатам, описанного выше анализа) полагали, что территорию Танзании можно разделить на четыре региона – восточной, северо-западной, южной и южный высокогорный.

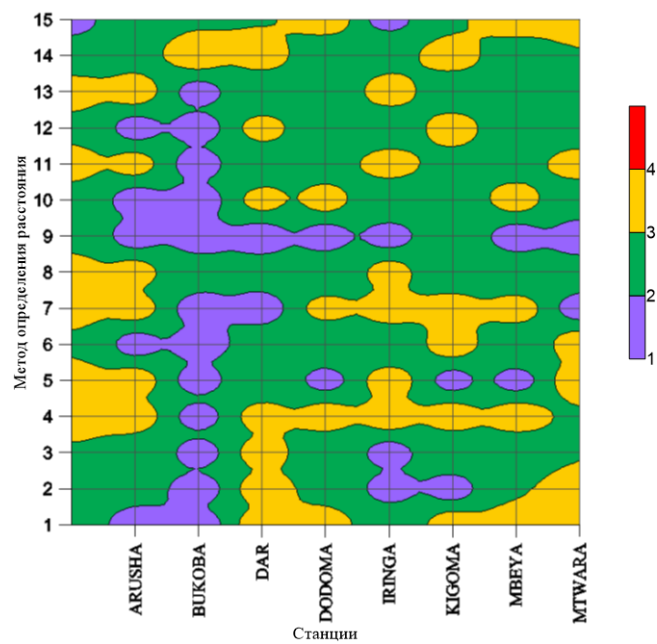
Полученные результаты представлены на рисунке 1.7, где одним цветом отмечены станции, попадающие в один кластер.

Анализ результатов процедуры кластеризации среднемесячных сумм осадков при а priori заданном количестве кластеров равным четырём (K=4) не позволяет с большой уверенностью разделить территорию Танзании, так как нет большой согласованности между результатами. Но, если учесть информацию о климатических условиях Танзании, то выделяются четыре региона (рисунок 1.8):

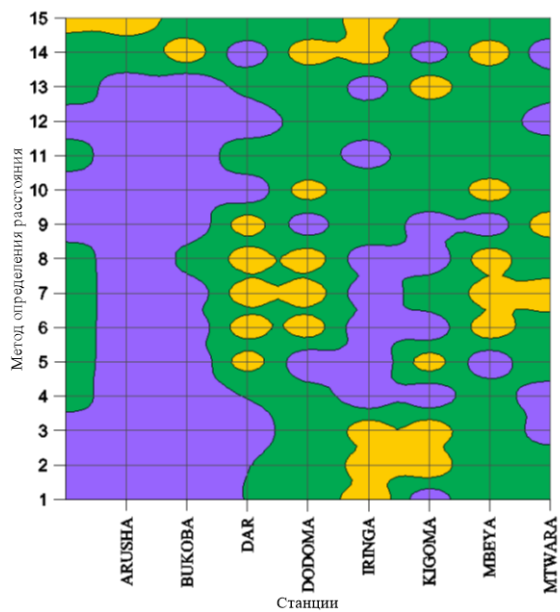
а)



б)



в)



г)

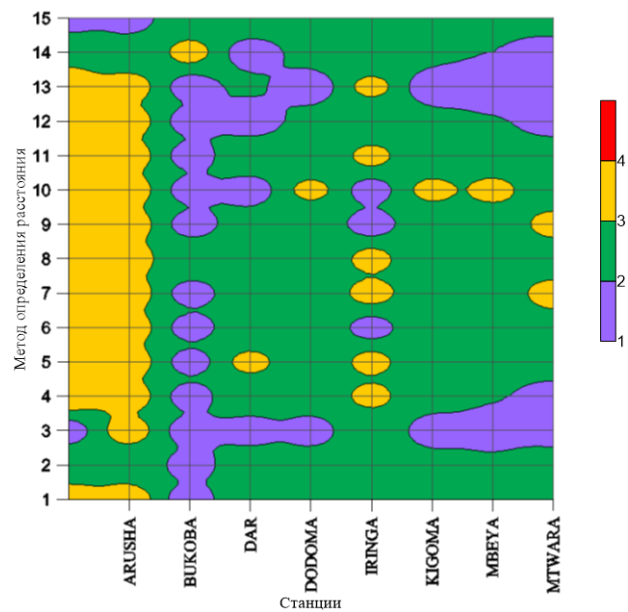


Рисунок 1.7 – Результаты процедуры кластеризации по месячным суммам осадков

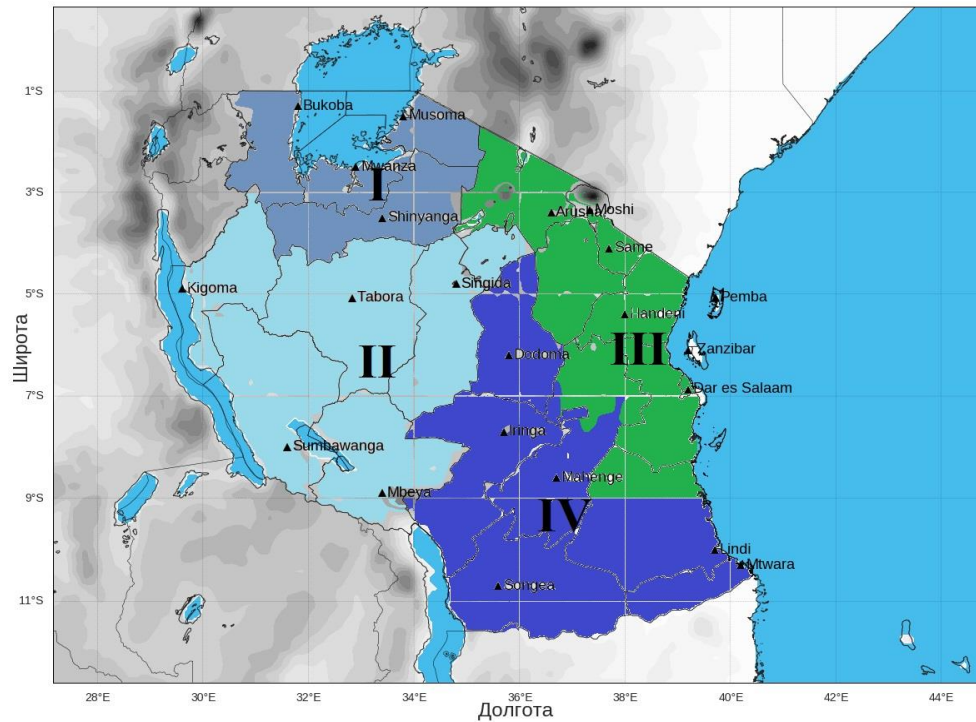


Рисунок 1.8 – Четыре региона, выделенные после процедуры кластеризации

Первый район, включает в себя северную часть страны (озеро Виктория), в него входят метеостанции Букоба, Мванза и Мусома.

Второй район включает центральную (метеостанция Додома, Табора) и западную части страны (метеостанция Кигома).

Третий район включает северо-восточные (метеостанции Аруша и Сааме) и восточные территории (метеостанция Дар эс Салаам, Танга), остров Занзибар и побережье Индийского океана.

Четвертый район включает юг и юго-восток страны (метеостанции Иринга, Рувума и Мтвара).

Результаты кластеризации будут использованы при моделировании атмосферных процессов (например, для использования метода телескопизации и вложенных сеток) и для верификации результатов моделирования.

Результаты кластеризации неплохо совпадают с климатическим делением территории Танзании, но всё-таки отличаются. Области в которых находятся станции Додома (центр), Махенге (центр), Мтвара и Линди (юг) попали в один четвёртых кластер, в который стандартно входят станции Сонгеа и Иринга.

2 Численная гидродинамическая мезомасштабная модель WRF и её использование для территории Восточной Африки

2.1 Описание численной гидродинамической модели WRF

Гидродинамическая модель WeatherResearchForecastingmodel (WRF) это мезомасштабная численная модель прогноза состояния атмосферы, созданная с целью обеспечить потребности, как в оперативном прогнозировании, так и в исследованиях атмосферы [37].

Разработка модели велась совместно многими исследовательскими организациями разных стран, большой вклад внесён Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) и Национальным центром прогнозирования окружающей среды (NCEP) [37].

Модель WRF предназначена для моделирования с высоким разрешением от нескольких метров до нескольких километров с возможностью явно описать конвекцию и облачность.

В настоящее время модель WRF используется при решении многих научных задач, таких как ассимиляция данных, параметризация физических процессов, моделирование атмосферной химии, идеализированное моделирование и даунскайлинг климатических и региональных моделей.

Используемая в данном исследовании версия модели WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием ортографической координаты η , которая напоминает сигма-координату и изменяется от 0 на верхней границе атмосферы до 1 на поверхности, но

отличается от сигма системы координат тем, что она определяется не через полное давление p , а через его гидростатическую составляющую P_h :

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (2.1)$$

$$\mu = P_{hs} - P_{ht}, \quad (2.2)$$

где P_{hs}, P_{ht} – гидростатическое давление на нижней и верхней границах модельной области, соответственно;

P_h – гидростатическая компонента давления;

μ – масса единичного столба сухого воздуха.

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\nabla \cdot V u) + \mu \alpha \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = F_U, \quad 2.3$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot V v) + \mu \alpha \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = F_V, \quad 2.4$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (\nabla \cdot V w) - g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial P}{\partial \eta} - \mu \right) = F_W, \quad 2.5$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + (\nabla \cdot V \theta)_\eta = F_\Theta, \quad 2.6$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (\nabla \cdot V q_m)_\eta = F_{Qm}, \quad 2.7$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\nabla \cdot V \mu)_\eta = 0, \quad 2.8$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{\mu} [(V \cdot \nabla \Phi)_\eta - g W] = 0, \quad 2.9$$

Эти прогностические уравнения дополняются диагностическими:

уравнением статики

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = -\alpha_d \mu, \quad (2.10)$$

и уравнением состояния:

$$P = P_0 \left(\frac{R_d \theta_m}{P_0 \alpha_d} \right)^\gamma, \quad (2.11)$$

$$\nabla.Va = \frac{\partial u a}{\partial x} + \frac{\partial v a}{\partial y} + \frac{\partial \Omega a}{\partial \eta} = u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} + \Omega \frac{\partial a}{\partial \eta},$$

В системе (2.3) — (2.11) использованы следующие обозначения:

$V=V(u, v, w)$	– компоненты трехмерного вектора скорости;
F	– слагаемые форсинга для u, v, w , и Θ ;
P	– давление;
P_0	– давление на уровне моря;
ϕ	– геопотенциал;
Θ	– потенциальная температура;
g	– ускорение свободного падения;
R_d	– универсальная газовая постоянная для сухого воздуха;
Q	– отношение смеси водяного пара, частиц облаков, дождя, льда, бал облачности и т.д;
t	– время;
$\dot{\eta}$	– аналог вертикальной скорости.

удельный объем сухого воздуха,

$$\alpha_d = \frac{1}{\rho_d}$$

виртуальная потенциальная температура

$$\theta_m = \theta \left(1 + \frac{R_d}{R} \right) q_v \approx \theta (1 + 1.61 q_v)$$

Для численного решения системы уравнений в модели WRF-ARW используется конечно-разностный подход с расщеплением по времени. Медленные (низкочастотные) моды, связанные с процессом переноса, описываются с использованием схемы Рунге-Кутты третьего порядка точности по времени, а высокочастотные акустические моды, связанные с процессом адаптации полей массы и скорости, для сохранения вычислительной устойчивости интегрируются с меньшим шагом по времени [38-39].

Интегрирование акустических мод реализуется в виде коррекции к интегрированию методом Рунге-Кутты. Процедура интегрирования на каждом шаге по времени делится на три этапа

$$\varphi = \varphi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\varphi^t), \quad (2.12)$$

$$\varphi^{t+\Delta t} = \varphi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\varphi), \quad (2.13)$$

$$\varphi^{t+\Delta t} = \varphi^t + \Delta t R(\varphi), \quad (2.14)$$

где φ — любая прогностическая переменная,

R — не содержащие производную по времени слагаемые в системе уравнений (2.3) — (2.11).

Основным преимуществом такой схемы интегрирования является её устойчивость во времени при условии соответствия характеристик схемы критерию устойчивости. Для пространственной дискретизации используется расштанная C-сетка по классификации Аракавы [40].

2.2 Параметризация физических процессов в гидродинамической модели

Прогностические уравнения (2.3) — (2.11) непосредственно описывают лишь сеточные атмосферные процессы, то есть процессы с горизонтальным масштабом, который отождествляется с длиной волны, соответствующей четырёхшаговому колебанию [41].

При разработке гидродинамических моделей атмосферы оформилось направление, которое называется параметризацией атмосферных процессов подсеточного масштаба. Целью этого научного направления является отыскание параметров или структурных элементов модели атмосферы, которые рассчитываются при интегрировании прогностических уравнений, и связей между этими параметрами или элементами модели с некоторыми величинами, которые отражают результирующий или суммарный эффект процессов подсеточного масштаба на сеточные (крупномасштабные) атмосферные процессы [42].

В связи с развитием вычислительной техники и, следовательно, возрастанию возможности проводить численные эксперименты с высоким разрешением, сегодня используются более сложные схемы параметризаций физических процессов, чем ранее. Также появилась возможность явно описывать некоторые ранее подсеточные процессы.

В гидродинамической модели WRF предусмотрена параметризация следующих процессов:

- конвекция;
- микрофизика облаков и осадков;
- распространение радиации (коротковолновой и длинноволновой);
- турбулентность и диффузия;

- процессы в планетарном пограничном и приземном слоях;
- процессы настилающей поверхности и в почве.

В ходе выполнения данного исследования были выявлены процессы, наибольшим образом определяющие погоду и климат тропической зоны, влияние которых изучалось на описание осадков. Такими процессами являются:

- микрофизика облаков,
- конвективные процессы,
- процессы в пограничном слое атмосферы.

Рассмотрим основные особенности использованных схем параметризации этих процессов.

а. Микрофизика облаков

Эти схемы описывают процессы, происходящие в облаках. Они различаются по сложности от относительно простых одномоментных схем, которые явным образом прогнозируют каждый вид гидрометеоров, до более сложных двухмоментных схем, которые описывают не только соотношение смеси каждого гидрометеора, но и учитывают водность облаков, концентрацию дождевой воды и облачных ядер конденсации. Каждый компонент, создающий облако (гидрометеоры: водяной пар, жидкие облачные частицы, кристаллические (ледяные) облачные частицы, частицы осадков – дождя, снега и крупы), имеет своё прогностическое уравнение, описывающее эволюцию гидрометеоров [43]. В данной работе исследовалась чувствительность прогноза к описанию микрофизики облаков в следующих параметризациях:

- а) Параметризация Кесслера – описывает облака и осадки только в жидком состоянии [44],
- б) Параметризация Линя – учитывает пять видов гидрометеоров, которые характеризуются соответствующими удельными долями влаги: водностью

облаков (q_c), ледностью облаков (q_{ci}), водностью дождя (q_r), ледностью снега (q_s) и ледностью крупы (q_g) [45],

в) Параметризация WSM6 – включает в себя описание процессов формирования шести гидрометеоров: водяной пар (q_v), жидкие частицы облачности (q_{cw}), кристаллы льда (q_{ci}), частицы дождя (q_r), снега (q_s) и крупы (q_g) [46]. Есть аналогичная параметризация WSM5, отличающаяся только количеством описываемых гидрометеоров.

г) Параметризация Томпсона – учитывает наличие в облаке льда, снега и крупы, учитывает концентрацию облачных кристаллов (N_i) и рассматривает эволюцию всех этих гидрометеоров во времени [47].

д) Параметризация Моррисона – учитывается пять типов гидрометеоров: облачные капли и кристаллы, дождь, снег и крупу. Она базируется на двухмоментной параметризации микрофизики [48,49]. В ней прогностическими параметрами являются концентрация и отношения смеси для облачных кристаллов, частиц дождя, снега и града и отношения смеси для облачных капель и водяного пара.

е) Параметризация WDM5 – несколько более сложный вариант по сравнению с WSM5, который предполагает наличие воды в разных фазах и переохлажденной воды. В ней рассматриваются процессы формирования пяти гидрометеоров: водяной пар, жидкие частицы облачности, кристаллы льда, частицы дождя и снега. В отличие от одномоментной схемы WSM5, WDM5 описывает и концентрацию частиц облаков и осадков [50].

к) Параметризация WDM6 – описывает такие же гидрометеоры, как и в WSM6, но разница заключается в том, WDM6 позволяет исследовать воздействие аэрозолей на свойства облака и процессы образование осадков. Прогностические

уравнения WDM6 включают и уравнения для концентрации количества облачности и дождевой воды, вместе с облачными ядрами конденсации [51].

б. Конвективные процессы

Численные модели без схемы параметризации конвекции не могут реалистично описать восходящие и нисходящие потоки, даже если разрешение модели достаточно для описания конвективных потоков и облаков. Методы параметризации конвекции базируются на описании свойств, как восходящих, так и нисходящих потоков, учёте процессов перемешивания воздуха в облаках и в окружающей среде.

В настоящее время в численной модели WRF существует два типа используемых схем параметризации конвекции:

Потоковые схемы (mass flux) основаны на моделирование конвективной обратной связи в каждом узле сетки явным способом. Конвективная обратная связь в данном контексте понимается, как изменение профилей по вертикали температуры и влажности в результате конвективных процессов.

Схемы приспособления основаны на одновременном приспособлении профилей температуры и влажности в узле сетки к некоторому базовому профилю, то есть подстраивается (приспосабливается) состояние атмосферы к постконвективному состоянию.

С точки зрения математической формулировки все схемы параметризации конвекции должны отвечать на следующие основные вопросы:

- а) каковы свойства образующихся (параметризуемых) облаков,
- б) как конвекция влияет на состояние окружающей среды,
- в) как крупномасштабные процессы контролируют процессы конвекции с точки зрения местоположения и интенсивности осадков.

В данном исследовании рассматривались следующие схемы параметризации конвекции:

а) Схема Каина-Фритша (КФ)

Основная особенность этой схемы заключается в рассмотрении единичного конвективного облака и в особом подходе к расчету обмена воздухом между облаком и окружающей средой в одномерной модели облака.

Диагноз конвекции осуществляется на основе расчёта плавучести частицы на модельных уровнях, начиная с уровня конденсации с шагом 50 гПа. В случае отсутствия плавучести у частицы на высоте выше уровня конденсации, активируется схема расчёта мелкой конвекции на основе турбулентной кинетической энергии для потока массы, а не конвективной доступной потенциальной энергии. Конвекции активируется, когда частица преодолевает отрицательную плавучесть и может подняться. Затем происходит перестройка профилей температуры и влажности за счет восходящего и нисходящего потоков. Новый профиль (температуры и влажности) должен изменять конвективную общую доступную потенциальную энергию слоя не более 10% [52].

б) Схема Беттса-Миллера-Янича

В этой схеме описание конвективных процессов основано на решении упрощенного уравнения притока тепла в предположении существования баланса между вертикальным адвективным и конвективным притоками тепла. Суть параметризации состоит в отыскании опорных равновесных профилей, как для мелкой, так и для глубокой конвекции [53]. Эта схема приспособления, которая базируется на анализе конвективной доступной потенциальной энергии, поступающей от крупномасштабных процессов. Сначала определяется высота нижней границы облаков, за которую принимается уровень конденсации с

максимальной эквивалентной потенциальной температурой, и верхняя граница облаков – модельный уровень, где воздушные частицы еще обладают плавучестью. Как правило, это высота чуть ниже уровня выравнивания температур. Если частица не обладает плавучестью в столбе атмосферы, то конвекция не будет активирована в этом узле сетки. Если разница высот между нижней и верхней границей облаков меньше 200 гПа, то активируется схема для мелкой конвекции. Из-за этих особенностей схемы большие значения конвективной доступной потенциальной энергии в нижних слоях атмосферы не являются достаточным условием для активации конвекции в модели. Поэтому эта схема лучше подходит в случаях со значительным количеством влаги в нижних и средних слоях атмосферы и положительной конвективной доступной потенциальной энергией.

в) Ансамблевая схема Грелла-Дэвени

Грелла и Дэвени предложили создать ансамбль на основе использования разных гипотез статического и динамического контроля возникновения конвекции и разных внешних влияющих параметров, которые задаются несколькими значениями, определенными по той или иной методике плюс несколькими их возмущенными значениями.

В результате получается ансамбль, состоящий из нескольких подансамблей, который можно применять так же, как результаты стандартного ансамблевого прогноза: вычислять средние по ансамблю значения, рассчитывать статистику успешности каждого члена ансамбля и затем вычислять среднее взвешенное значение по ансамблю, строить функцию плотности вероятности и определять наиболее вероятное значение [54].

г) Трёхмерная (3d) ансамблевая схема Грелла

У этой схемы много общего со схемой Грелла и Дэвени, но в ней используется гипотеза о квазиравновесном состоянии между членами ансамбля. Основное отличие в том, что она учитывает эффекты опускания воздуха (компенсационного) в окрестностях кучевых облаков [55].

в. Процессы в пограничном слое атмосферы

Потоки на поверхности, скрытые потоки тепла и влаги играют важную роль в развитии и модуляции атмосферных явлений. В гидродинамических моделях атмосферы влияние этих потоков оцениваются с помощью схемы параметризации пограничного слоя атмосферы. В данном исследовании рассмотрены следующие схемы параметризации пограничного слоя:

а) Параметризация университета Ёнсей (YSU) – нелокальная схема, учитывающая вовлечение и параболический профиль метеорологических величин в неустойчивом пограничном слое атмосферы [56].

б) Параметризация Меллора-Ямады-Янича (MYJ) – одномерная прогностическая схема, основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и учитывающая перемешивание по вертикали [57].

в) Параметризация ACM2 учитывает локальное и нелокальное перемешивание по вертикали [58].

Параметризация ACM2 особенно хорошо приспособлена для переноса в пограничном слое метеорологических переменных и малых химических компонентов.

Процессы в почве в численных экспериментах данного исследования всегда описаны с использованием схемы NoahLandSurfaceModel, которая учитывает распространение влаги и тепла в почве в четырех подслоях, а также

описывает эффекты от растительности, снежного покрова и физику мёрзлого слоя почвы [59]. Для учета излучения использовались схема Dudhia (коротковолнового) [60] и RTMM (длинноволнового) [61].

Рассматривалась только часть доступных схем параметризации, которые могут генерировать сотни комбинаций. Выбранные схемы, согласно проведённому обзору научной литературы, часто встречаются в исследованиях и оперативных прогностических моделях мировых центров погоды, а также, согласно проведённому анализу результатов предварительных численных экспериментов, лучше всего подходят для параметризации физических процессов в экваториальном регионе.

2.3 Использование гидродинамической мезомасштабной модели WRF в Танзании

Как уже отмечалось, гидродинамические погодные и климатические модели атмосферы еще не широко используются в развивающихся странах, таких как Танзания. Это связано с несколькими причинами: во-первых, до недавнего времени в Танзании еще не было высокопроизводительной вычислительной техники, необходимой для проведения численных экспериментов с высоким разрешением, а во-вторых, остро не хватает специалистов в этом направлении.

В Танзанийском Метеорологическом Агентстве (ТМА) начали использовать модель WRF в оперативном режиме в 2009 году, но до настоящего времени еще не была выбрана лучшая конфигурация схем параметризации физических процессов и не разработана система достаточно точного прогноза

осадков, отсутствует система ансамблевого прогнозирования погоды. Именно решение этих задач было основой для данного исследования.

В данной работе была проведена адаптация модели WRF-ARW (версия 3.6.1) к территории Танзании. Первым этапом адаптации был выбор оптимальной области прогнозирования и наилучшего шага по времени и пространству. Проводилась верификация каждой конфигурации модели. Для оценки качества моделирования были рассчитаны ошибки прогноза относительно полей реанализа, а также данных наблюдений на метеорологических станциях, координаты которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Метеорологические станции, наблюдения на которых используются для верификации

Название метеостанции	Координаты метеостанции		Фактическая высота	Модельная высота орографии	Разница фактической и модельной орографии, ΔH
	Широта, °	Долгота, °	(H_f), м	(H_m), м	$= H_m - H_f$, м
Дар эс Салаам	-6,87	39,20	55	62,1	7,1
Морогоро	-6,90	37,7	1107	803,6	303,4
Сонгеа	-10,68	35,58	1067	1129,8	62,8
Мбея	-8,90	33,40	1759	1700,8	58,2
Букоба	-1,30	31,80	1144	1185,7	41,7
Занзибар	-6.10	39.20	18	9,5	8,5

Из-за сильной пространственно-временной изменчивости осадков на территории Танзании, которая была определена раньше (глава 1), в численных экспериментах отдельно рассматривались четыре региона, которые были получены по результатам районирования территории Танзании (глава 1), а

именно северо-западный (станция Букоба), восточный (станция Дар эс Салаам), южный (станция Сонгеа) и южный высокогорный (станция Мбея).

Для оценки качества прогноза по данным наблюдений результаты моделирования интерполировались в точку ближайшей метеорологической станции и сравнивались. По интерполированным прогностическим значениям и данным наблюдений, полученным из Танзанийского Метеорологического Агентства (ТМА), при верификации рассчитаны:

- средняя абсолютная ошибка прогноза,
- среднеквадратическая ошибка прогноза,
- средняя систематическая ошибка прогноза,
- относительная ошибка прогноза.

Эти ошибки рассчитывались по формулам (2.15–2.17) и служили для выбора лучших параметров сетки и схемы интегрирования по времени для описания динамики процессов и в дальнейшем критерием для определения лучшей конфигурации параметризаций физических процессов.

$$\text{средняя абсолютная ошибка прогноза} \quad - \quad \delta = \frac{1}{N} \sum |X_i - Y_i|, \quad 2.15$$

$$\text{среднеквадратическая ошибки прогноза} \quad - \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_i - Y_i)^2} \quad 2.16$$

$$\text{средняя систематическая ошибка} \quad - \quad \varepsilon = \frac{1}{N} \sum (X_i - Y_i), \quad 2.17$$

$$\text{относительная ошибка} \quad - \quad \Delta = \frac{1}{N} \sum \frac{X_i - Y_i}{X_i} \quad 2.18$$

где X_i — прогностическое значение метеорологической величины,
 Y_i — наблюдаемое значение метеорологической величины,
 N — количество прогнозов, участвующих в верификации.

2.4 Адаптация гидродинамической модели WRF к условиям Танзании

При адаптации модели WRF для моделирования атмосферных процессов на территории Танзании сначала была определена расчётная область и выбрано разрешение модели по горизонтали и вертикали. В данном исследовании проводились численные эксперименты с разными модельными областями с целью определения наилучшей с точки зрения качества моделирования, эффективности прогноза и имеющихся вычислительных ресурсов.

При проведении численных экспериментов данные для начальных и граничных условий были получены из реанализа Национального Центра Атмосферных Исследований (NCAR) [62].

Для корректного описания процессов в экваториальной зоне используется цилиндрическая проекция в декартовой системе координат.

При адаптации гидродинамической модели важно сначала исследовать, как модель описывает поля основных метеорологических величин — температура, давление, влажность и профиль ветра.

Адаптация модели WRF к территории Танзании проводилась в три этапа, с тремя модельными доменами.

На первом этапе была создана модельная область размером 92 узлов с запад на восток и 75 узлов с юга на север, горизонтальным разрешением 30 км и 27 уровнями по вертикали. Центр модельной области располагался в точке с координатой 5,46° ю.ш. и 39,0° в.д. Таким образом, область моделирования

охватывает всю территорию Танзании, а также страны восточной Африки, как показано на рисунке 2.1.

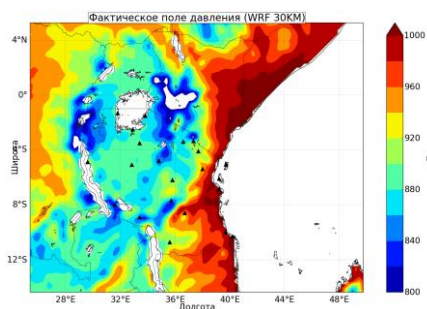


Рисунок 2.1 – Область (красный прямоугольник) моделирования
используемая на первом этапе данной работе

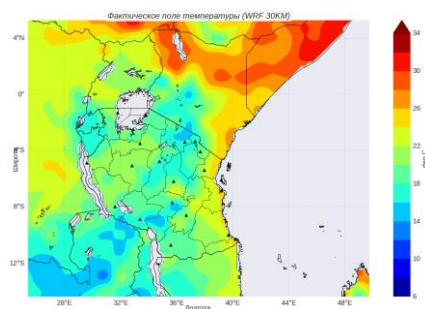
В этой области осуществлялся прогноз на 24 часа от 06 часов ежедневно в периоды: с 04 по 14 мая 2006, с 02 по 11 апреля 2008 года, с 24 по 29 апреля 2010 года и с 10 по 19 ноября 2011 года.

Была проведена верификация прогнозов по полям температуры и давления. В качестве примера на рисунке 2.2 и в таблице 2.2 представлены результаты верификации модели для 05.04.2006 в 06.00.

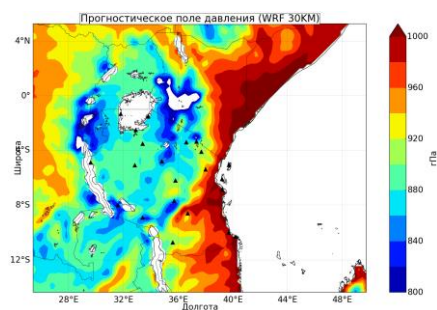
а)



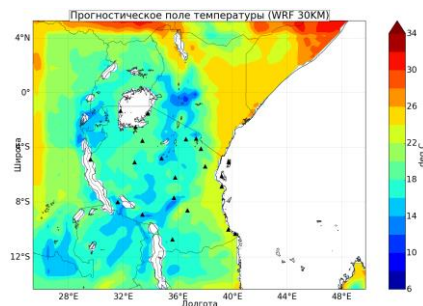
б)



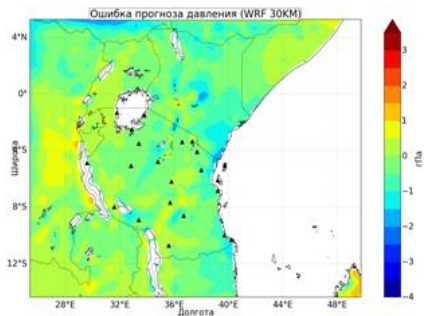
в)



г)



д)



е)

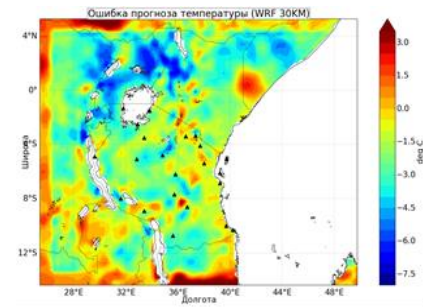


Рисунок 2.2 – Фактические (а, б), прогностические (б, д) поля давления и температуры и ошибки их прогнозирования (в, е) по модели WRF с разрешением 30 км

Таблица 2.2 — Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза максимальной температуры (К) и давления (гПа) в период с 04 по 05 май 2006г

Регион	Метеорологическая величина	Ошибка прогноза	
		δ	$\Delta, \%$
Восточный	Температура, К	-2,2	6,8
	Давление, гПа	0,4	0,04
Южное высокогорье	Температура, К	-5,7	23,9
	Давление, гПа	7,9	0,8
Южный	Температура, К	-2,7	10,1
	Давление, гПа	3,2	0,3
Северо- западный	Температура, К	-4,9	19,0
	Давление, гПа	5,7	0,6

Из анализа результатов, приведённых в таблице 2.2, следует, что давление прогнозируется моделью с высокой точностью, так как относительная ошибка прогноза на всех регионах минимальна и составляет 0,04 – 0,8 %. Минимальная и максимальная ошибка прогноза составляет 0,4 и 7,9 гПа в восточном и южном высокогорье регионах, соответственно.

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 неплохое, за исключением максимальной температуры, прогноз которой желательно улучшить. Для этого на следующем этапе численных экспериментов создана модельная область с вложенными сетками.

Конфигурация модельной области представлена на рисунке 2.3. Внешняя область (красный прямоугольник на рисунке 2.3) размером 100x72 узлов, вторая область (черный прямоугольник) размером 217x154 и третья область (синий прямоугольник) размером 382x292 узлов с горизонтальным разрешением 39, 13 и 4,3 км, соответственно. По вертикали во всех экспериментах 27 уровней.

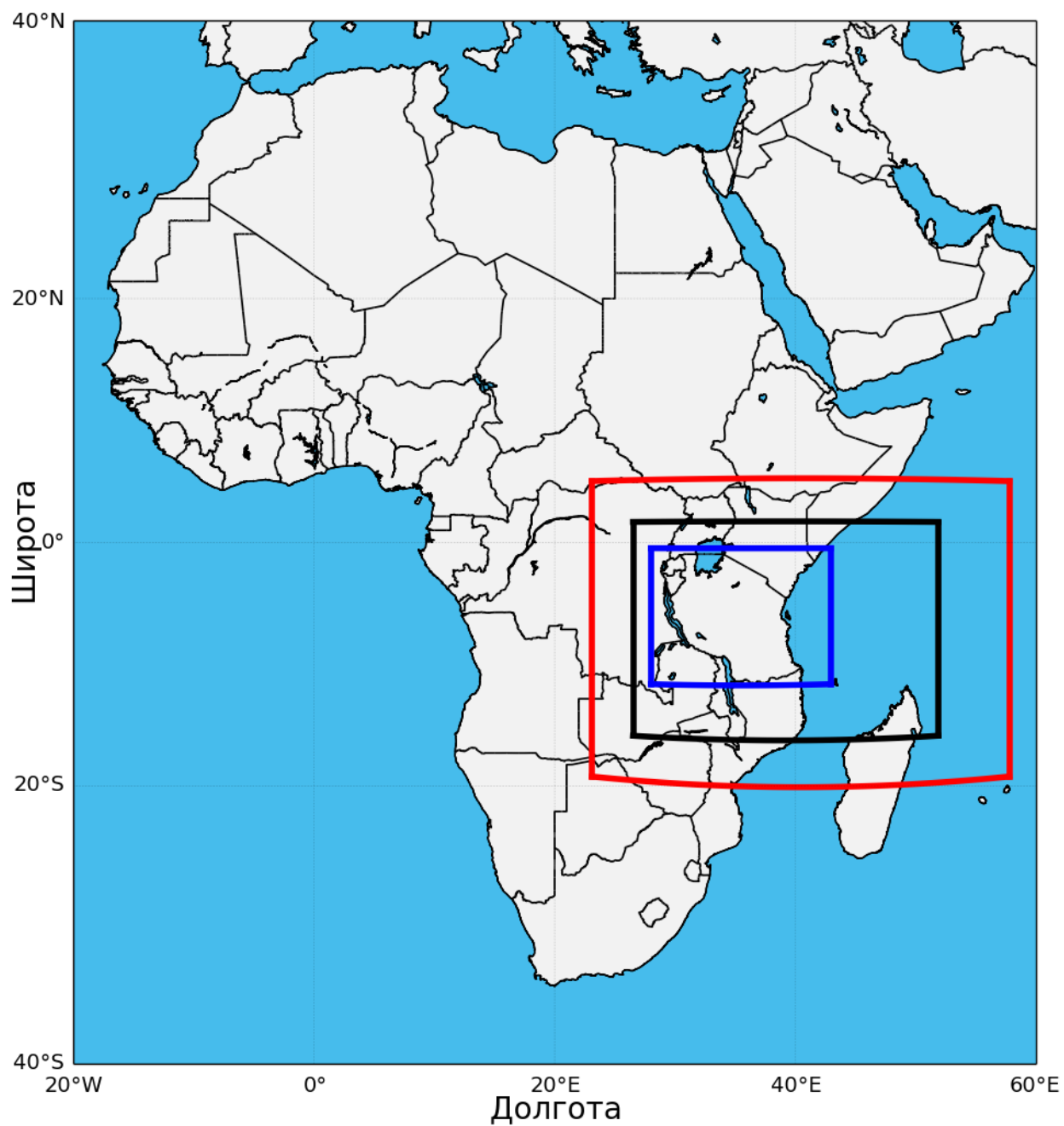


Рисунок 2.3 – Три (красный, черный и синий прямоугольники) вложенные области моделирования, используемые в данной работе

Оценки прогнозов проводились для всех сеток.

Для примера на рисунках 2.4 – 2.5 и в таблицах 2.3 – 2.4 представлены результаты верификации прогнозов на средней и мелкой сетках.

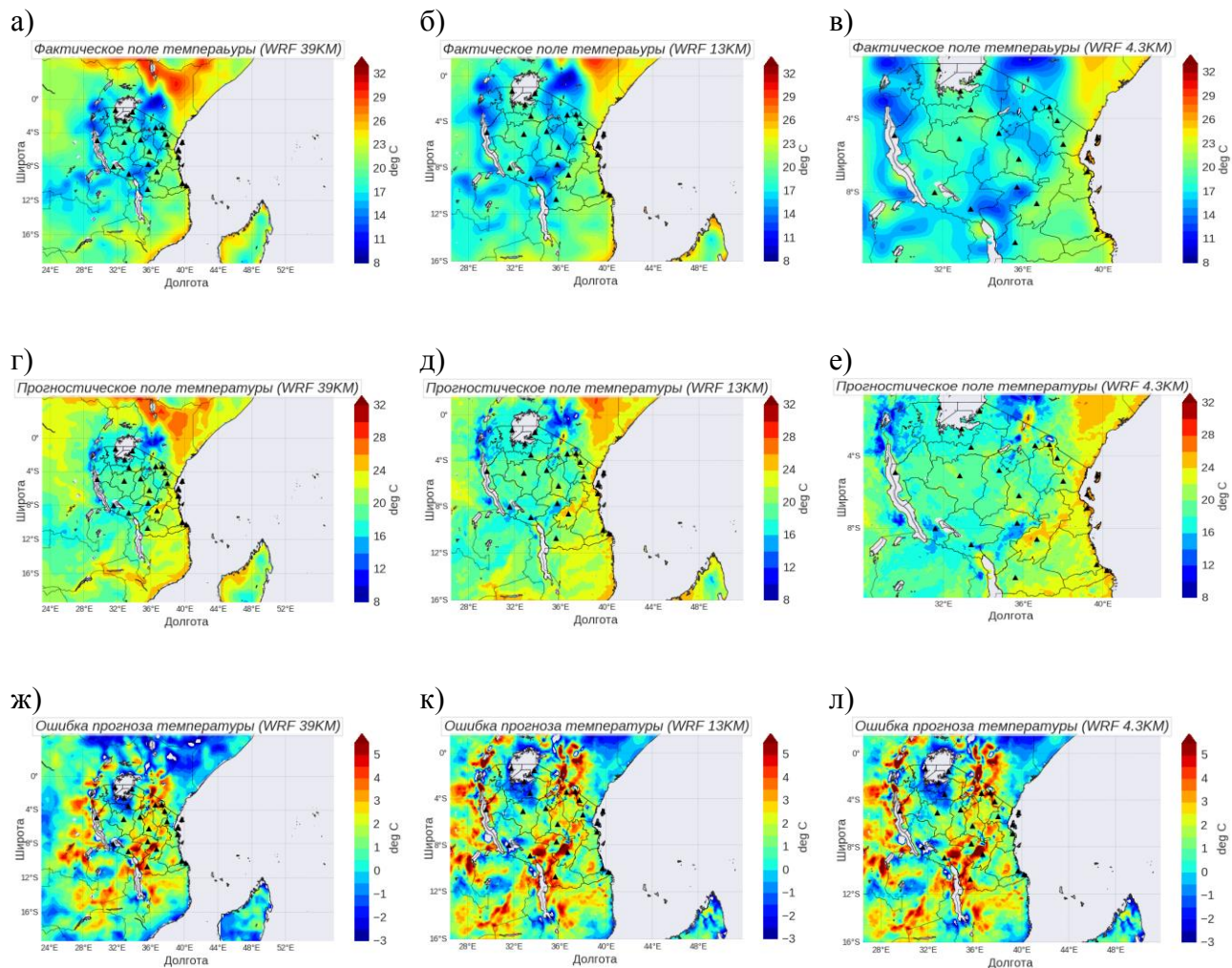


Рисунок 2.4 – Фактические (а, б, в), прогностические (г, д, е) поля температуры и ошибки прогноза (ж, к, л) по модели WRF с разрешением 39 (левый столбец), 13 (средний) и 4.3 (правый) км.

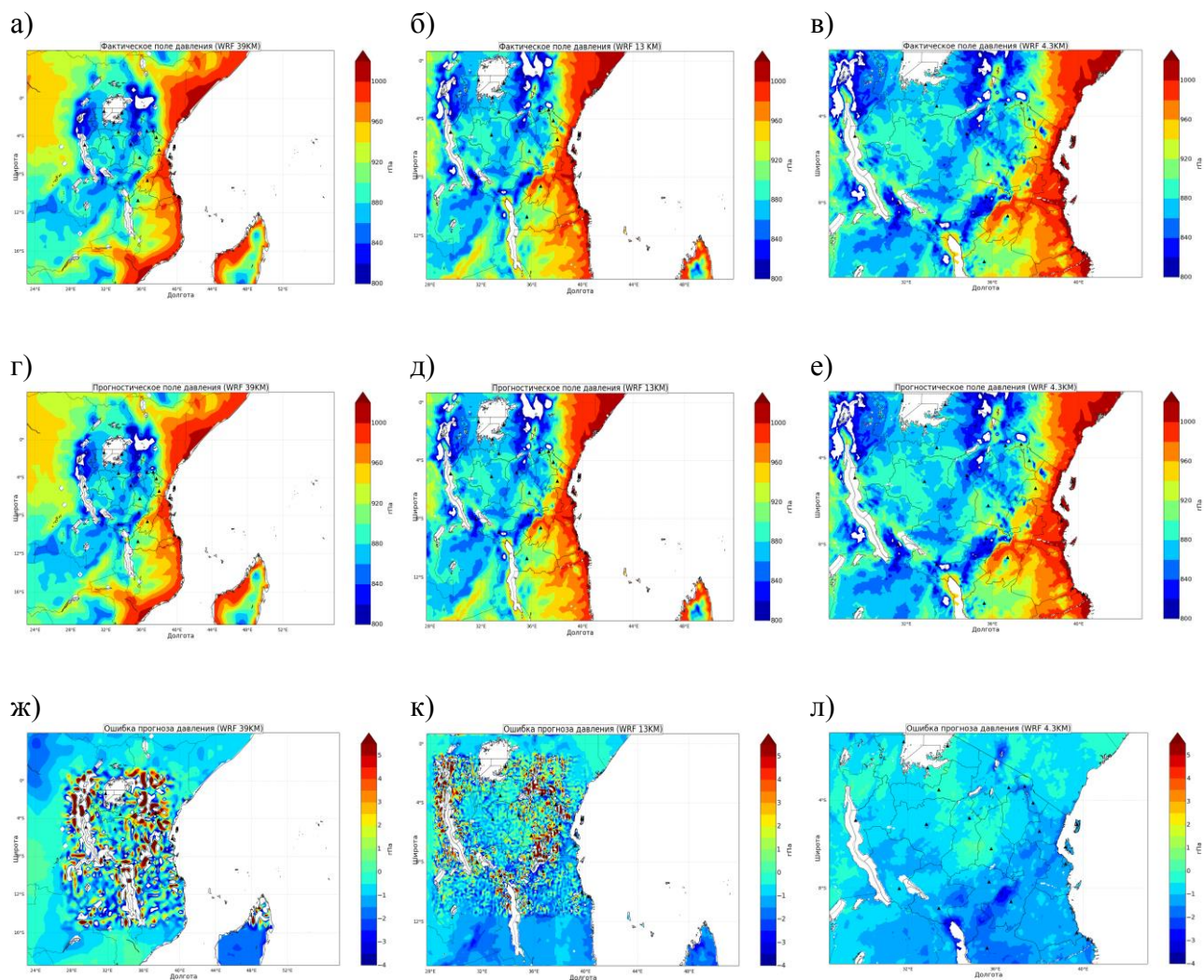


Рисунок 2.5 Фактические (а, б, в), прогностические (г, д, е) поля давления и ошибки прогноза (ж, к, л) по модели WRF с разрешением 39 (левый столбец), 13 (средний) и 4.3 (правый) км.

Таблица 2.3 — Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза максимальной температуры (К) и давления (гПа) в период с 02 по 03 февраля 2014г. по модели WRF с разрешением 4,3 км

Регион	Метеорологическая величина	Ошибка прогноза	
		δ	$\Delta, \%$
Восточный	Температура, К	-2,6	7,6
	Давление, гПа	0,1	0,01
южное высокогорье	Температура, К	-2,6	12,9
	Давление, гПа	2,5	0,24
Южный	Температура, К	-1,6	5,7
	Давление, гПа	1,8	0,2
юверо- западный	Температура, К	-2,3	8,8
	Давление, гПа	5,3	0,5

Анализируя полученные результаты для всех сеток (4,3, 13 и 39 км), можно сделать следующие выводы:

–согласно средней ошибке прогноза, при улучшении разрешения модели с 39 до 13 и до 4,3 км во всех регионах качество прогноза максимальной температуры разное. Например, на востоке качество прогноза максимальной температуры улучшилось с 4,4К (13 км) до 2,8 К (4,3км) . В южном и северо-западном регионах и в южном высокогорье качество прогноза максимальной температуры не однозначно зависит от шага модели по пространству, так как на сетках с шагом 39, 13 и 4,3 км средние ошибки составляют:

на юге — 1,2, 2,2 и 1,6К,

на южном высокогорье — 2,7, 1,5 и 2,6К.

– в южном регионе и южном высокогорье качество прогноза максимальной температуры при использовании модели с разрешением 39 км высокое, так как ошибка прогноза составляет 1,2 и 2,7 К, соответственно, в то время как низкое качество прогноза максимальной температуры получено при использовании модели с разрешением 39 км в восточном (4,4К) и северо-западном (4,7К) регионах.

– в восточном и северо-западном регионах, а также в южном высокогорье относительная ошибка прогноза максимальной температуры ожидаемо зависит от разрешения модели. При улучшении разрешения модели от большой сетки к самой маленькой относительная ошибка прогноза уменьшилась в восточном регионе от 12,9 до 8,1 %, северо-западном от 18,2 до 8,6 % и в южном высокогорье от 13,3 до 7,8 %. При улучшении разрешения модели с 13 до 4,3 км качество прогноза максимальной температуры улучшилась в восточном регионе примерно на 0,5% от 8,1 (13 км) до 7,6% (4,3 км) и ухудшается на северо-западе примерно на 0,2 % от 8,6% (13 км) до 8,8% (4,3 км);

В целом качества прогноза максимальной температуры при использовании модели более высокого разрешения (4,3 и 13км) хорошее, так как ошибка прогноза составляет 1,5 – 2,6К во всех регионах. Что касается моделей с разрешением 39 км, высокая оценка прогноза максимальной температуры получена только на юге и в южном высокогорье – минимальная и максимальная ошибки составляют 1,2 и 2,7К, соответственно.

Таблица 2.4 — Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза максимальной температуры (К) и давления (гПа) в период с 02 по 03 февраля 2014г по модели WRF

Регион	Метеорологическая величина	Ошибка прогноза	
		δ	Δ , %
Разрешение 13 км			
Восточный	Температура, К	-2,8	8,1
	Давление, гПа	-0,1	0,001
Южное высокогорье	Температура, К	1,5	7,8
	Давление, гПа	-0,3	0,03
Южный	Температура, К	-2,2	7,7
	Давление, гПа	2,7	0,3
Северо- западный	Температура, К	-2,2	8,6
	Давление, гПа	4,9	0,5
Разрешение 39км			
Восточный	Температура, К	-4,4	12,9
	Давление, гПа	-0,01	0,001
Южное высокогорье	Температура, К	2,7	13,3
	Давление, гПа	-2,1	0,20
Южный	Температура, К	-1,2	4,6
	Давление, гПа	1,6	0,2
Северо- западный	Температура, К	-4,7	18,2
	Давление, гПа	4,1	0,4

Давление прогнозируется достаточно точно во всех регионах и качество прогноза существенно зависит от разрешения модели. При этом качество прогноза давление несущественно отличаются при прогнозе с разрешением 13 и 4.3 км.

Выводы

В заключении данного этапа исследования стоит отметить, что модели более высокого разрешения (13 и 4.3 км) позволяют 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 сетке 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 точные прогнозы, не внося в решение ложных шумов, как это происходит при использовании более мелких шагов.

Полученные на этом этапе исследований (три сетки) результаты устраивают с точки зрения качества прогноза, но на прогноз заблаговременностью 24 часа требуются 23 часа модельного времени доступной в Метеорологическом Агентстве Танзании компьютерной техники. Такой прогноз не имеет практического значения. Согласно современной точке зрения,

суточные прогнозы должны рассчитываться менее, чем за 10 минут модельного времени [63].



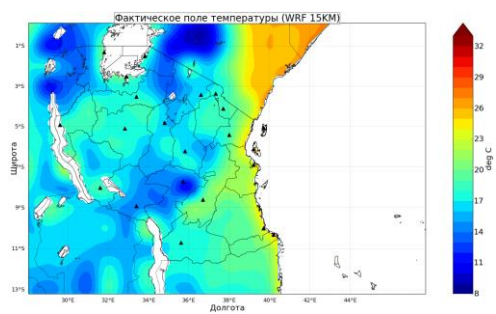
Рисунок 2.6 – Две вложенные области моделирования, используемые в данной работе

Поэтому на третьем этапе численных экспериментов рассматривалась область моделирования с двумя сетками (рисунок 2.6) с горизонтальным разрешением 15 и 5 км и 27 уровнями по вертикали, верхний уровень 50 гПа. Центр модельной области располагается в точке с координатами 5,46° ю.ш. и 39,0° в.д. Внутренняя область моделирования (синий прямоугольник на рисунке 2.6) охватывает всю территорию Танзании, а внешняя (красный прямоугольник) и страны восточной Африки.

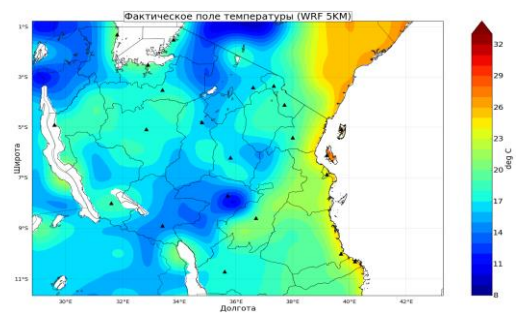
В качестве примера на рисунках 2.7 и 2.8 представлены результаты прогнозов и верификации полей температуры и давления и их разница при разрешении модели 15 и 5 км для 06.00 часов 11 апреля 2014 г.

Из анализа результатов прогноза, приведённых на рисунке 2.7, видно, что поля температуры по модели WRF с разрешением 15 и 5 км практически не отличаются. Пространственное распределение температуры, полученное с использованием модели более высокого разрешения, более детализировано. Такая же тенденция наблюдается в модельных полях давления, пример которых представлен на рисунке 2.8.

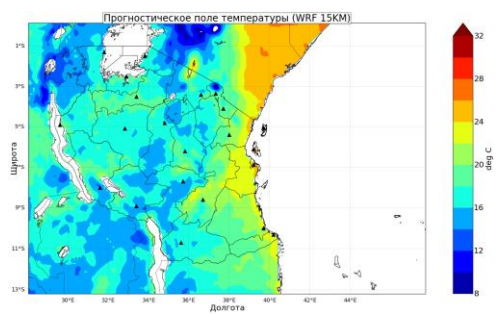
а)



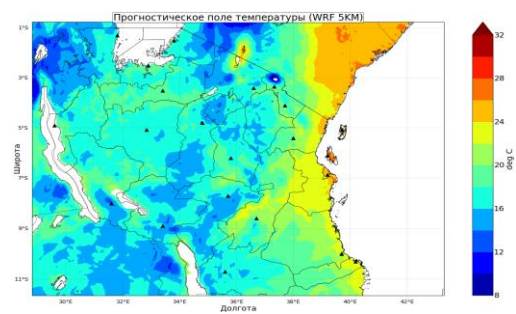
б)



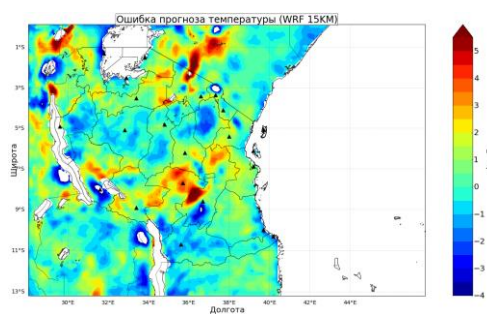
в)



г)



д)



е)

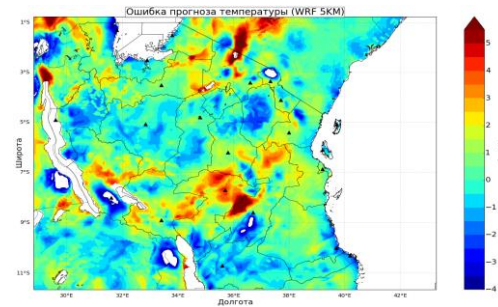
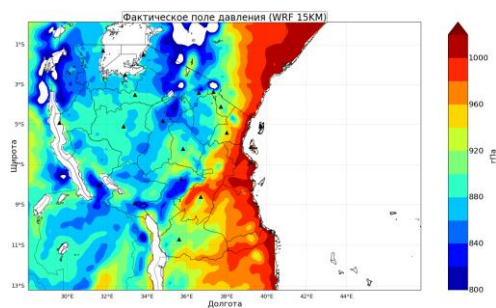
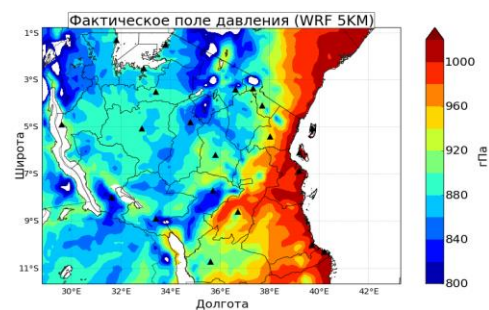


Рисунок 2.7 – Фактические (а, б), прогностические (в, г) поля температуры и ошибки (д, е) прогноза по модели WRF с разрешением 15 (а, в, д) и 5 (б, г, е) км.

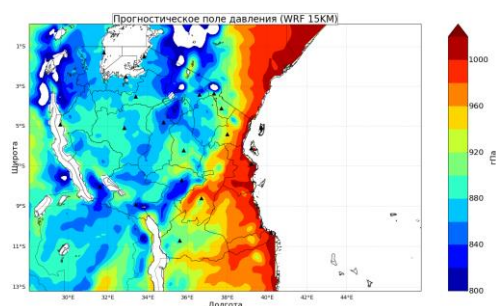
а)



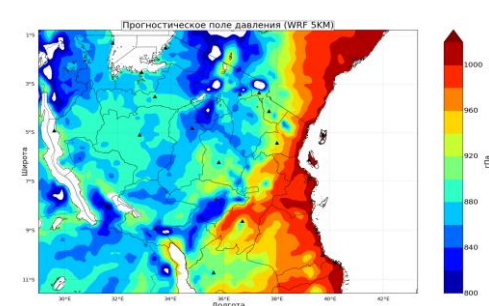
б)



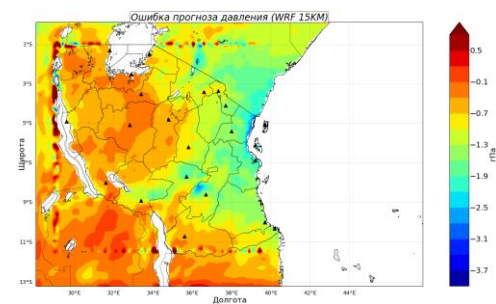
в)



г)



д)



е)

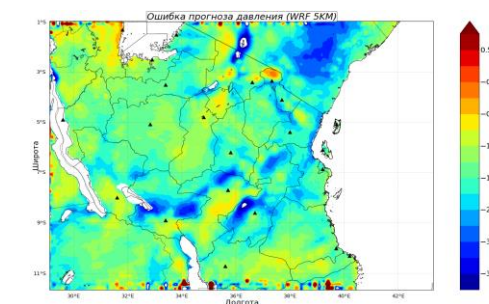


Рисунок 2.8 – Фактические , прогностические поля давления и ошибки прогноза по модели WRF с разрешением 15 (а, в, д) и 5 (б, г, е) км.

Резюмируя все вышесказанное, можно сделать следующие выводы по адаптации модели WRF к территории Танзании:

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. Проведённый анализ позволяет говорить о небольшом влиянии граничных условий на качество моделирования, поэтому в дальнейшем рассматривается одна расчётная область без использования телескопизации. 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;

27 уровней по вертикали;

верхний уровень – 50 гПа.

2.5 Верификация прогноза основных метеорологических величин к набору параметризаций физических процессов

Следующим этапом адаптации гидродинамической модели WRF к решаемым задачам был выбор оптимального набора параметризаций физических процессов. Для этого в прогностической области и на выбранной ранее сетке точек 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 для разных регионов Танзании

отдельно. Верификация проводилась отдельно для двух сезонов: с марта по май и с октября по декабрь, которые были выявлены ранее (глава 1).

Были проведены эксперименты в следующие периоды:

- с 08 по 22 апреля 2014г.,
- с 15 по 24 декабрь 2011г.

Состав комбинаций параметризаций, используемый в численных экспериментах, представлен в таблице 2.6.

Средние абсолютные (δ), среднеквадратичные (σ) и относительные (Δ) ошибки прогнозов основных метеорологических величин с использованием разных схем параметризации физических процессов в модели WRF для различных регионов представлены в таблицах 2.7 – 2.10 (с марта по май) и в таблицах 2.11 – 2.14 (с октября по декабрь).

Таблица 2.6 – Конфигурация схем параметризаций в численных экспериментах

Схемы параметризации			Название эксперимента
Микрофизики облаков	Конвективных процессов	Пограничного слоя атмосферы	
Схема Кесслера (KS)	Схема Каина-Фритша (KF)	Схема Ёнсей (YSU)	KS-KF-YSU
Схема Пурдье-Линь(PL)	Схема Беттса-Миллера-Янича (BMJ)	Схема Меллора-Ямады-Янича (MYJ)	PL-BMJ-MYJ
Схема Пурдье-Линь (PL)	Ансамблевая Грелла-Дэвени (GD)	Схема ACM2	PL-GD-ACM2
Схема WSM6 (WSM6)	Беттса Миллера Янича (BMJ)	Схема Ёнсей (YSU)	WSM6-BMJ-YSU
Схема Томпсона (TH)	Ансамблевая Грелла-Дэвени (GD)	Схема Меллора-Ямады-Янича (MYJ)	TH-GD-MYJ
Схема Томпсона (TH)	трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d (G3d)	Схема ACM2	TH-G3d-ACM2

Далее будет оцениваться качество прогноза максимальной, минимальной и средней температуры воздуха. Под максимальной и минимальной температурой понимается максимальное и минимальная значение температуры воздуха на высоте 2м. Средняя температура – двухметровая суточная средняя температура воздуха.

Из анализа результатов качества прогноза основных метеорологических величины (температура и давление) следует, что:

Качество прогноза максимальной температуры при использовании WRF с разрешением 5 и 15 км высокое на восточном (метеостанция Дар-эс-Салаам) и низкое южном высокогорье (метеостанция Мбея) регионах:

- самая высокая точность прогноза максимальной температуры на побережье Индийского океана и в среднем составляет 1,0 К, а худший прогноз (средняя ошибка 3,5 К) в южном высокогорье.

- при использовании всех схем параметризации максимальная температура занижалась на северо-западе, юге и востоке (кроме комбинации KS-KF-YSU), а завышалась в южном высокогорье;

- максимальная температура лучше всего прогнозируется на востоке (метеостанция Дар-эс-Салаам) при использовании комбинации параметризаций TH- GD- ACM2 со средней и относительной ошибкой прогноза 0,2К и 3,7%;

- низкая точность прогноза максимальной температура получена в южном высокогорье при использовании комбинации WSM6-BMJ-YSU – средняя и относительная ошибка прогноза 3,5К и 18,5%. Это связано с тем, что станция расположена на высоте около 1400 м над уровнем моря. В этот период года в дневное время часто формируется низкая облачность (нижняя граница несколько метров от поверхности земли) с этим связано повышение температуры. Ночью же температура резко падает, иногда переходя через нуль, за счет сильных ветров. Эти сложные условия моделью не описываются. Для повышения качества прогноза в этой местности требуются дополнительные исследования – специальные параметризации, дополнительная телескопизация, даунскайлинг, специальный постпроцессинг.

- качество прогноза максимальной температуры ухудшается при удалении от океана в южном и северо-западном направлениях. Это объясняется тем, что недостаточно хорошо учитываются потоки тепла и влаги от подстилающей

поверхности (со сложной орографией) на нижней границе модельной области, которые формируют низкую облачность, что сильно влияет на температуру. Скорее всего, именно с недостаточно хорошей физической обоснованностью параметризаций и связан тот факт, что лучший прогноз получен при использовании модели худшего разрешения.

- качество прогноза максимальной температуры в север-западном и восточном регионах улучшилась при уменьшении шага.

Характер ошибок прогноза минимальной температуры такой же, как описано выше при анализе прогноза максимальной температуры. Основное отличие заключается в том, что на востоке и северо-западе качество прогноза минимальной температуры несколько выше, чем максимальной. Отличие составляет примерно $0,1-0,2^{\circ}$. Это объясняется тем, что на востоке и северо-западе на температуру большее влияние оказывает Индийский океан и озеро Виктория. Большие водные поверхности регулируют потоки тепла, влаги и количества движения, их влияние больше в дневные часы. Поэтому именно на максимальную температуру водные объекты оказывают сильное влияние, которое хуже описывается из-за сильной изменчивости и сложности подсеточных процессов.

Верификация прогнозов средней температуры (таблица 2.9) показывает, что во всех регионах средняя температуры занижается. Это не связано с прогнозом минимальной или максимальной температуры, а говорит о занижении прогноза срочной температуры, по которой рассчитывается среднесуточная температура.

Таблица 2.7 – Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза максимальной температуры (K) в зависимости от комбинации схем

параметризации физических процессов в период с 08 по 22 апреля 2014г по модели WRF с разрешением 5 и 15 км.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
восточный	δ (K), 5 км	1,0	-0,8	-1,1	-0,7	-0,2	-1,1
	δ (K), 15 км	1,0	-0,8	-1,7	-0,8	-1,0	-1,1
	Δ (%), 5 км	3,5	3,0	5,7	3,0	3,4	6,6
	Δ (%), 15 км	3,2	3,2	5,6	3,1	3,7	6,7
южное высокогорье	δ (K), 5 км	2,8	3,3	2,9	3,5	2,9	2,7
	δ (K), 15 км	2,7	2,8	2,7	3,3	2,6	2,7
	Δ (%), 5 км	14,9	17,4	15,5	18,5	15,3	14,3
	Δ (%), 15 км	14,3	14,5	14,3	17,4	13,8	14,1
южный	δ (K), 5 км	-2,2	-0,8	-2,7	-0,9	-2,3	-2,8
	δ (K), 15 км	-2,1	-0,5	-2,4	-0,6	-2,2	-2,5
	Δ (%), 5 км	8,8	3,1	10,6	3,7	9,0	11,2
	Δ (%), 15 км	8,4	2,1	9,5	2,5	8,8	10,2
северо западный	δ (K), 5 км	-2,1	-2,0	-2,1	-2,4	-2,2	-2,0
	δ (K), 15 км	-3,1	-2,8	-3,1	-3,1	-3,4	-3,1
	Δ (%), 5 км	8,3	8,0	8,3	9,7	8,9	7,9
	Δ (%), 15 км	12,5	11,3	12,5	12,3	13,5	12,5

Таблица 2.8 – Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза минимальной температуры (K) в зависимости от комбинации схем

параметризации физических процессов в период с 08 по 22 апреля 2014г по модели WRF с разрешением 5 и 15 км.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
восточный	δ (K), 5 км	-0,02	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4
	δ (K), 15 км	-0,1	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4
	Δ (%), 5 км	0,1	2,5	2,0	2,5	2,5	2,0
	Δ (%), 15 км	0,4	2,2	1,7	2,2	2,3	1,7
южное высокогорье	δ (K), 5 км	-2,4	-1,8	-2,1	-1,5	-2,4	-1,7
	δ (K), 15 км	-1,9	-1,7	-1,5	-1,4	-1,8	-1,5
	Δ (%), 5 км	15,1	12,0	13,0	10,0	15,0	10,8
	Δ (%), 15 км	12,0	11,0	9,1	9,0	11,5	9,7
южный	δ (K), 5 км	-3,3	-2,3	-2,9	-2,5	-2,3	-2,7
	δ (K), 15 км	-3,3	-2,1	-2,8	-2,4	-2,1	-2,6
	Δ (%), 5 км	18,4	12,6	16,0	14,0	13,0	14,8
	Δ (%), 15 км	18,3	11,6	15,4	13,2	11,7	14,3
северо-западный	δ (K), 5 км	-1,9	-1,5	-2,2	-1,9	-1,5	-2,2
	δ (K), 15 км	-0,5	-1,2	-0,6	-0,5	-1,2	-0,6
	Δ (%), 5 км	8,7	8,7	13,0	11,2	8,8	13,0
	Δ (%), 15 км	7,1	7,1	3,7	2,8	7,0	3,7

Средняя температура, как и максимальная и минимальная, прогнозируется с разной точностью, максимальная и минимальная ошибка составляет около 4 и 0,2K, что соответствует относительной ошибке 18,8 и 1,6% и наблюдается на юге и северо-западе страны, соответственно.

Самая высокая и самая низкая оправдываемость получена при использовании набора схем параметризации TH-G3d-ACM2 и KS-KF-YSU, соответственно.

Таблица 2.9 – Средние (δ) и относительные (Δ) ошибки прогноза средней температуры (K) в зависимости от комбинации схем параметризации физических процессов в период с 08 по 22 апреля 2014г по модели WRF с разрешением 5 и 15 км.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
восточный	δ (K), 5 км	-1,9	-0,7	-1,5	-0,8	-0,9	-1,7
	δ (K), 15 км	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8	-1,0	-1,7
	Δ (%), 5 км	7,5	3,0	5,7	3,0	3,4	6,6
	Δ (%), 15 км	7,7	3,2	5,6	3,1	3,7	6,7
южное высокогорье	δ (K), 5 км	-1,3	-0,6	-0,7	-0,6	-1,3	-0,6
	δ (K), 15 км	-0,9	-0,4	-0,4	-0,3	-0,9	-0,4
	Δ (%), 5 км	7,1	3,6	4,1	3,3	7,2	3,5
	Δ (%), 15 км	5,4	2,3	2,4	1,8	5,2	2,2
южный	δ (K), 5 км	-4,1	-2,8	-3,7	-2,7	-3,3	-3,6
	δ (K), 15 км	-4,0	-2,6	-3,6	-2,6	-3,1	-3,5
	Δ (%), 5 км	18,8	12,6	16,9	12,4	14,8	16,4
	Δ (%), 15 км	18,1	11,8	16,2	11,8	14,2	15,7
северо западный	δ (K), 5 км	-1,5	-1,2	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
	δ (K), 15 км	-0,6	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5	-0,2
	Δ (%), 5 км	7,3	5,7	6,6	6,7	6,8	6,6
	Δ (%), 15 км	2,8	1,2	1,6	1,5	2,5	1,6

Таблица 2.10 – Характеристика точности прогноза давления (гПа) в зависимости от комбинации схем параметризации физических процессов, период с 08 по 22 апреля 2014г.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
Восточный	δ (К)	-1,8	-0,8	-1,3	-1,01	-1,0	-1,4
	Δ ,%	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
южное высокогорье	δ (К)	-1,8	-1,6	-1,6	-1,9	-1,4	-1,7
	Δ ,%	0,17	0,16	0,16	0,18	0,14	0,16
южный	δ (К)	3,2	3,2	3,4	3,1	3,1	3,3
	Δ ,%	0,31	0,31	0,33	0,30	0,31	0,32
северо-западный	δ (К)	4,9	4,6	4,9	4,6	4,7	4,8
	Δ ,%	0,48	0,46	0,48	0,45	0,47	0,48

Из анализа результатов, приведённых в таблице 2.10, следует, что:

- качество прогноза давления очень высокое – относительная ошибка меньше 1 %;
- в восточном регионе и в южном высокогорье давление занижается, на северо-западе и юге давление наоборот завышается;
- по средней ошибке прогноза давления использование всех комбинаций параметризаций приводит к одинаковым результатам – на юге и север-западе–

ошибка составляет около 3 и 5 гПа, а на востоке и в южном высокогорье меньше 2 гПа;

– наибольшая и наименьшая ошибка получена при использовании комбинации параметризаций PL-BMJ-MYJ — ошибка прогноза 0,8 гПа (0,1%) – и KS-KF-YSU — ошибка прогноза 4,9 гПа (0,5%) на востоке и северо-западе, соответственно.

Такая процедура верификации модели была проделана и для второго сезона период с 15 по 24 декабря 2011г.

Результаты верификации полей температуры и давления представлены в таблицах 2.11 – 2.12.

Характер ошибок в этом сезоне такой же, как описано выше. Основное отличие заключается в том, что в этот период года качество прогноза температуры значительно ниже на востоке и выше в других регионах страны. Низкое качество прогноза на востоке в теплый сезон (декабрь) связано с тем, что в этот период года муссоны от Индийского океана больше влияют на погоду данной территории, следовательно, влияют на основные параметры, которые не всегда хорошо воспроизводятся моделью.

- лучший прогноз минимальной (относительная ошибка 5,1%) и средней (относительная ошибка 5,2%) температуры достигается с помощью комбинации схемы параметризации –KS- KF-YSU;

- давление (относительная ошибка 0,06%) и максимальная температура (относительная ошибка 4,3%) лучше прогнозируются при использовании комбинации схем параметризации –ТН- G3d-ACM2 и PL-BMJ- MYJ соответственно.

Таблица 2.11 – Характеристика точности прогнозов максимальной и минимальной температуры (К) с использованием разных схем в модели WRF в регионах Танзании за период с 15 по 24 декабря 2011.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
Максимальная температура, К							
Восточный	δ (К)	2,5	2,8	2,9	2,5	1,5	2,6
	Δ,%	8,4	9,7	9,6	8,3	4,9	8,9
Южное высокогорье	δ (К)	2,3	2,2	4,1	3,8	0,7	1,4
	Δ,%	11,1	10,2	19,5	18,2	9,2	6,6
южный	δ (К)	-0,3	-1,2	-1,3	-1,4	-1,4	-2,1
	Δ,%	1,1	5,2	5,0	5,1	5,1	7,8
северо-западный	δ (К)	-1,5	-0,7	-0,9	-1,7	-2,7	-0,8
	Δ,%	6,0	7,0	3,4	6,7	10,5	3,0
Минимальная температура, К							
Восточный	δ (К)	0,4	0,3	0,9	0,03	0,4	0,2
	Δ,%	1,9	1,7	3,9	0,1	1,8	0,9
южное высокогорье	δ (К)	0,1	0,2	0,1	0,9	1,4	1,5
	Δ,%	0,7	0,6	0,8	6,1	9,2	9,8
Южный	δ (К)	-1,5	-1,2	-1,1	-1,0	-0,3	-0,2
	Δ,%	8,0	5,3	5,8	5,5	1,8	1,3

Таблица 2.12 – Характеристика точности прогнозов средней температуры и давления (гПа) с использованием разных схем в модели WRF за период с 15 по 24 декабря 2011.

Регион	Ошибка прогноза	Комбинация схем параметризации физических процессов					
		KS-KF-YSU	PL-BMJ-MYJ	PL-GD-ACM2	WSM6-BMJ-YSU	TH-GD-ACM2	TH-G3d-ACM2
Средняя температура, К							
Восточный	δ (К)	0,1	1,3	1,2	1,4	1,0	1,1
	Δ ,%	0,4	4,6	4,7	5,5	3,9	4,4
южное высокогорье	δ (К)	0,3	1,2	1,3	1,8	1,5	1,7
	Δ ,%	1,7	7,3	7,8	10,6	8,8	10,2
южный	δ (К)	-3,0	-2,2	-2,1	-1,7	-1,8	-2,0
	Δ ,%	13,2	9,2	9,3	7,3	8,0	8,6
северо западный	δ (К)	0,7	1,3	1,6	1,7	1,5	1,9
	Δ ,%	4,0	8,4	8,9	9,5	8,3	10,7
Давление, гПа							
Восточный	δ	0,82	1,31	0,75	0,99	0,86	0,65
	Δ ,%	0,08	0,13	0,07	0,10	0,08	0,06
южное высокогорье	δ	0,33	0,41	0,28	0,29	0,20	0,23
	Δ ,%	0,13	0,16	0,11	0,11	0,08	0,09
южный	δ	0,30	0,38	0,27	0,30	0,242	0,243
	Δ ,%	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
северо западный	δ	1,31	1,19	1,18	0,80	0,75	1,03
	Δ ,%	0,13	0,12	0,12	0,08	0,07	0,10

Резюмируя все вышесказанное, можно сделать следующие выводы по адаптации модели WRF к территории Танзании:

Качество прогноза полей основных метеорологических величин удовлетворительное. Очевидно, что большее разрешение по горизонтали позволяет лучше описывать 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 392 с запад на восток;

27 уровней по вертикали;

верхний уровень – 50 гПа.

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.

Выбор лучшей комбинации из перечисленных будет осуществлён в дальнейшем при верификации прогноза осадков.

3 Прогноз осадков с использованием гидродинамической мезомасштабной модели WRF

С использованием адаптированной на предыдущих этапах исследования модели прогнозировались осадки, выбиралась лучшая схема параметризации физических процессов, определяющих наличие и количество осадков и проводилась верификация прогноза осадков.

3.1 Исследование влияния схемы параметризации конвективных процессов на качество прогнозов осадков

Конвекция является основным процессом, определяющим наличие осадков в приэкваториальном регионе. Поэтому сначала было исследована 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;
- с 10 по 19 ноября 2011 года.

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

привело к наводнению и огромному материальному ущербу и человеческим жертвам.

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 параметризации конвекции Каина-Фритш (NewEta) (KF);
- Схема параметризации конвекции Беттса-Миллер-Янич (BMJ);
- Ансамблевая схема параметризации конвекции Грелла-Дэвени (GD);
- Трёхмерная (3d) ансамблевая схема параметризации конвекции Грелла (G3d).

В скобках приведено обозначение параметризации, которое будет использовано в дальнейшем.

Рассматривалась только часть доступных схем параметризации, которые могут генерировать сотни комбинаций. Выбор схем был осуществлён после предварительного анализа научной литературы, посвященной моделированию осадков. Именно приведённые схемы часто встречаются в исследованиях и оперативных гидродинамических прогнозах состояния атмосферы, а также

лучше всего подходят для параметризации физических процессов в экваториальном регионе.

Результаты сравнения прогностических полей по пяти разным конфигурациям модели с фактическими значениями количества осадков на метеостанции Дар эс Салаам приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Средние абсолютные (δ), среднеквадратичные (σ) ошибки прогноза осадков и среднее значение на станции Дар-эс-Салаам при использовании разных схем параметризации конвекции

Период прогноза		Месяц и год	Прогноз	Ошибка	Схема параметризации конвекции				
Дата начала	Дата конца		Среднее значение		NC	KF	BMJ	GD	G3d
04	14	май 2006	16,5 мм/10 суток	δ	39,4	11,7	10,4	11,1	10,4
				σ	58,9	20,1	19,8	19,0	19,5
02	11	апреля 2008	18,2 мм/9 суток	δ	41,3	14,9	46,2	15,8	13,5
				σ	39,6	13,3	13,8	13,5	13,1
24	29	апреля 2010	47,4 мм/5 суток	δ	27,4	40,6	42,8	40,1	34,4
				σ	38,8	34,3	35,2	32,8	33,7
10	19	ноября 2011	22,1 мм/9 суток	δ	20,9	18,7	16,7	18,3	18,5
				σ	21,8	21,1	21,1	20,6	20,7

Для иллюстрации качества моделирования в таблице 3.1 выделены минимальные средние, среднеквадратические и средние относительные ошибки.

Анализ полученных результатов (таблица 3.1 и рисунок 3.1) показывает зависимость качества прогноза осадков на станции Дар-эс-Салааме от схемы параметризации конвекции и от сезона года. При использовании разных схем параметризации конвекции в период с 04 по 14 май 2006 модель занижает количество осадков на 5,7 – 7,8 мм за 10 дней, кроме случая моделирования без учёта конвекции, когда количество осадков завышается на 24.1 мм за 10 дней.

Согласно средней абсолютной и среднеквадратической ошибкам без учёта конвекции получен прогноз самого плохого качества – относительная ошибка колеблется от 52 до 96%, что вполне объяснимо большой ролью конвекции в формировании облачности и осадков.

Определение лучшей схемы параметризации конвекции по сравнению абсолютной и среднеквадратической ошибок даёт несколько различающиеся результаты. Этот несколько неожиданный результат объясняется наличием большого разброса значений ошибок. Среднеквадратическая ошибка сильнее реагирует на большие ошибки. При дальнейшем выборе лучшей схемы параметризации в данном исследовании ориентировались на среднюю абсолютную ошибку.

Средняя абсолютная и среднеквадратичная ошибка составляет соответственно 10,4 – 39,4 и 19,0 – 58,9 мм за 10 дней. Согласно среднеквадратической ошибке схема Грелла-Дэвени (GD) обеспечивает минимальную ошибку – 19,0 мм за 10 дней. Без учёта конвекции оправдываемость прогноза количества осадков наихудшая – 58,9 мм за 10 дней. По средней абсолютной ошибке, лучшей является схема Беттса-Миллера-Янича (BMJ) – 10,4 мм за 10 дней.

Примерно такой же вывод можно сделать для другого рассмотренного периода с 10 по 19 ноября 2011г. (таблица 3.1 и рисунок 3.3), так как по средней абсолютной и среднеквадратичной ошибкам прогнозов осадков наилучшие результаты получены при использовании схем параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича (BMJ) и Грелла-Дэвени (GD) и составляет 16,7 и 20,6 мм за 9 дней.

Вместе с тем, относительная ошибка прогноза за весь период моделирования при использовании разных схемы параметризации конвекции и без конвекции очень высокая и составляет больше 50%.

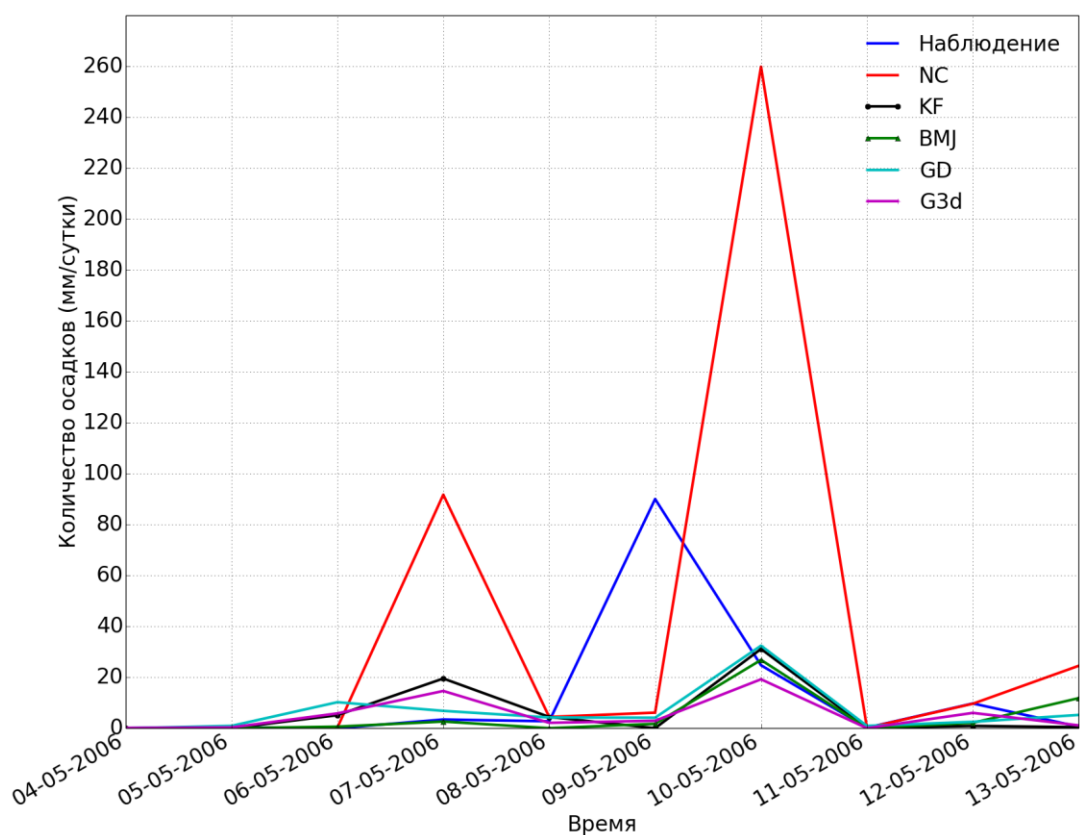


Рисунок 3.1 – Влияние разных схем параметризации конвекции на качество прогноза осадков в Дар-эс-Салааме

Таблица 3.2 — Данные наблюдения и прогноз [мм/сутки] по модели WRF при использовании разных схем параметризации конвекции на станции Дар-эс-Салаам за период с 02 по 11 апреля 2008г.

дата прогноза	Наблюдение	Прогностические значения с использованием схем параметризации конвекции				
		NC	KF	BMJ	GD	G3d
2.04.2008	25,9	36,2	3,0	39,2	3,3	6,3
3.04.2008	29,1	89,0	12,4	101,4	4,8	8,7
4.04.2008	50,7	133,8	15,9	149,7	7,4	23,9
5.04.2008	7,6	57,4	29,2	86,6	22,6	13,1
6.04.2008	13,8	0,0	2,1	2,1	0,0	0,0
7.04.2008	2,7	0,7	4,8	5,5	0,0	15,7
8.04.2008	15,1	3,2	12,8	16,0	11,4	13,0
9.04.2008	32,5	0,0	9,4	9,4	3,3	1,5
10.04.2008	4,4	36,1	0,0	36,1	6,2	6,2
11.04.2008	25,9	36,2	3,0	39,2	3,3	6,3

Для выяснения причины больших относительных ошибок, в таблице 3.2 представлены суточные значения количества осадков по наблюдениям и прогнозам при использовании разных методов описания конвекции за период с 02 по 11 апреля 2008г. Несколько лучшие результаты получены при использовании трехмерной ансамблевой схемы Грелла 3d (14%).

В таблице 3.2 выделяется три дня, 03 – 05 апреля 2008г., когда на станции Дар Эс Салаам, наблюдались осадки интенсивностью меньше 50 мм/сутки, а

схема Беттса-Миллера Янича (BMJ) и без конвекции (NC) прогнозировали осадки большой интенсивностью –101,4, 149,7 и 86,6 мм/сутки (BMJ) и 89,0, 133,8 и 57,4 мм/сутки (NC), соответственно. Также заметна тенденция сильного занижения количества осадков при использовании ансамблевой схемы Грелла-Дэвени (GD) и трехмерной ансамблевой схемы Грелла.

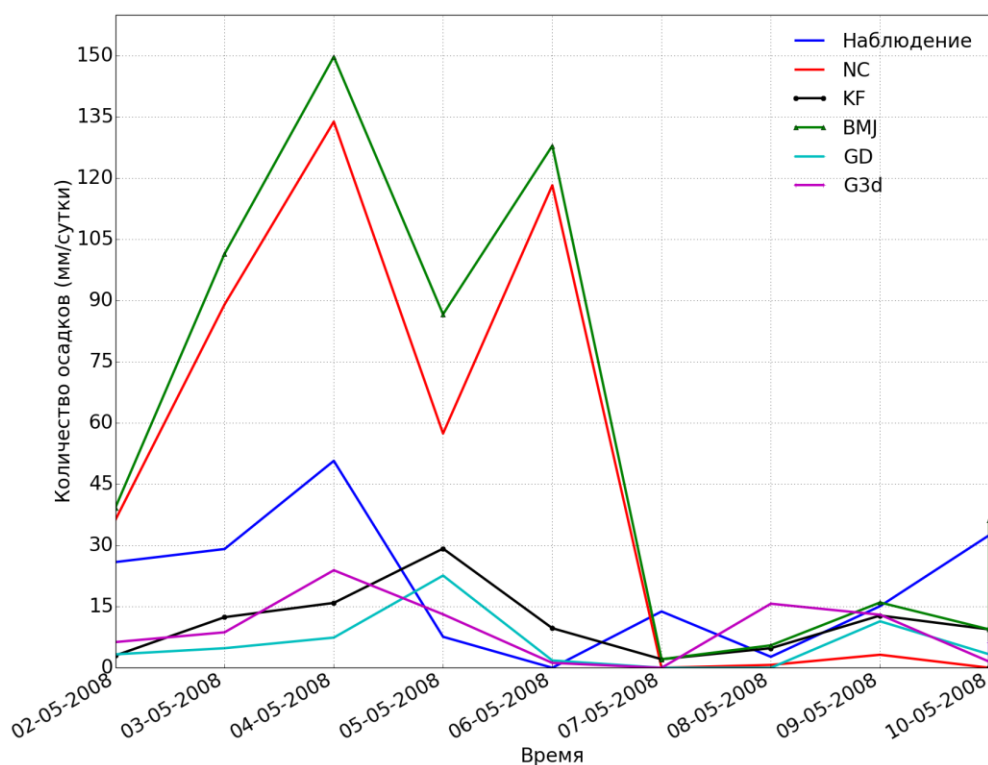


Рисунок 3.2 – Влияние разных схем параметризации конвекции на качество прогноза осадков в Дар-эс-Салааме.

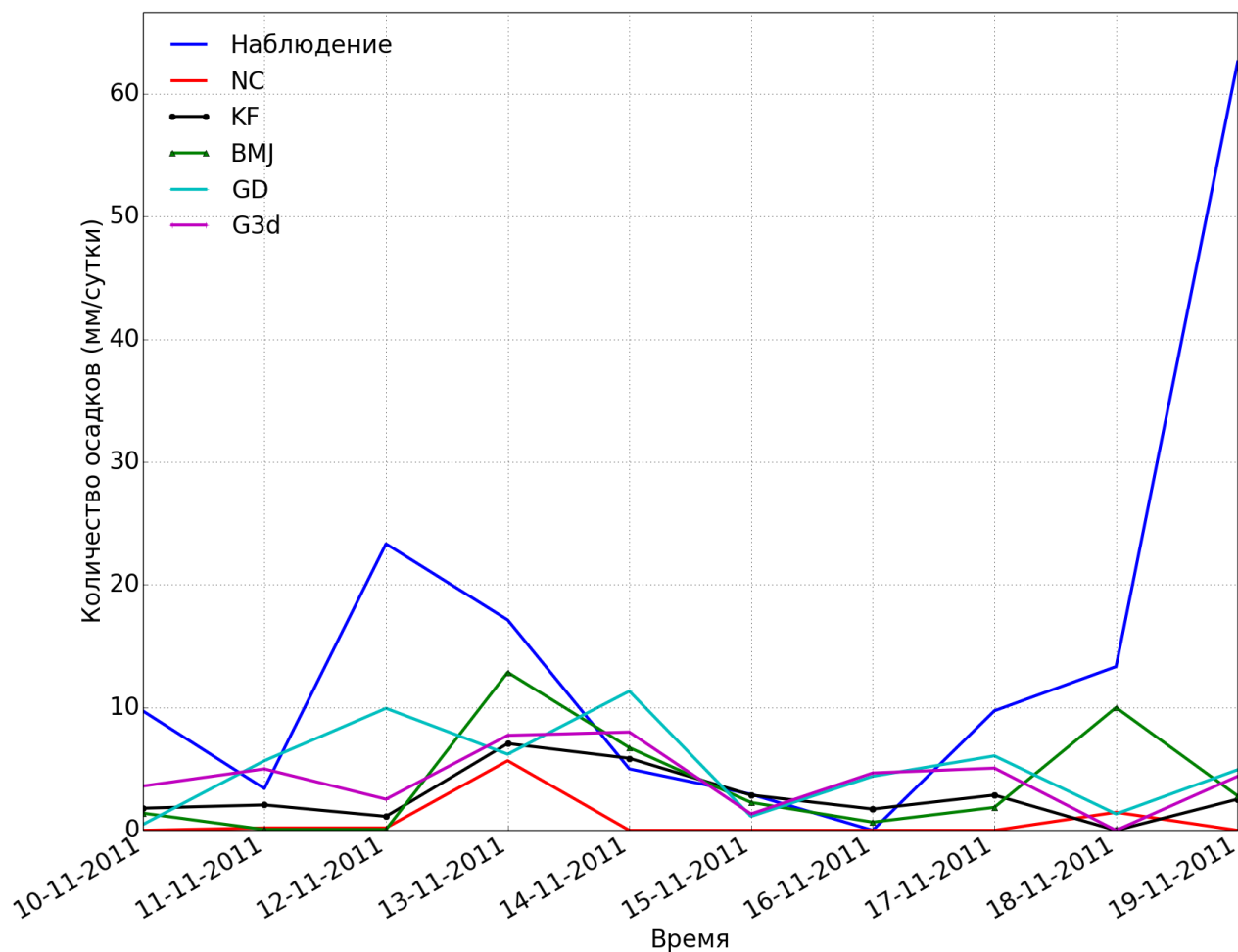


Рисунок 3.3 – Влияние разных схем параметризации конвекции на качество прогноза осадков в Дар-эс-Салааме.

При оценке качества прогноза осадков за период моделирования с 02 по 11 апреля 2008 (таблица 3.1 и рисунок 3.2) получено, что расчеты по всем схемам параметризации конвекции, кроме схемы без конвекции, занижают количество осадков на 3,3 –29,3 мм. Среднеквадратичная ошибка примерно 13 мм, кроме случая без параметризации конвекции, где среднеквадратичная ошибка прогноза осадков составляет около 40 мм. В этом цикле экспериментов наилучшую оправдываемость показала трехмерная схема параметризации конвекции Грелла (G3d) со средней абсолютной и среднеквадратичной ошибкой 13,5 и 13,1 мм за

весь период расчетов. Наименьшие средняя абсолютная, среднеквадратическая и систематическая ошибки за весь период расчетов обеспечили: схема Беттса-Миллера-Янича — 46,2 мм, эксперименты без конвекции — 39,6 и 29,3 мм соответственно.

По сравнению с предыдущими экспериментами, основное отличие качества прогнозов осадков на станции Дар-эс-Салааме в период с 24 по 29 апреля 2010 г. заключается в том, что модель без использования схемы параметризации конвекции показывает наилучшую оценку оправдываемости прогноза осадков со средней абсолютной ошибкой 27,4 мм за 5 дней. Это может быть связано с большим влагозапасом атмосферы, который в отсутствии схемы параметризации конвекции полностью реализовался через параметризацию крупномасштабной конденсации.

Из анализа таблицы 3.1 и рисунков 3.1, 3.2 и 3.3, следует, что

- Если не описывать конвективные процессы, то получается 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.
- В экспериментах без учета конвекции и с использованием схемы Каина-Фритша завышается прогностическое количество осадков в ноябре и май, более чем при использовании схем Беттса-Миллера Янича и трёхмерной ансамблевой Грелла (G3d).
- Эксперименты с использованием схемы Беттса-Миллера Янича показывают большее количество осадков в апреле, чем с ансамблевой схемой Грелла-Дэвени (GD) и трёхмерной ансамблевой схемой Грелла (G3d), кроме апреля 2010, когда прогностическое количество осадков примерно одинаково.

- Использование ансамблевой схемы параметризации конвекции Грелла-Дэвени (GD) приводит к лучшему качеству прогнозов.

Выводы

Обобщая всё вышесказанное, можно сделать вывод о том, что для прогноза осадков в прибрежных районах (Дар-эс-Салаам) конвективные процессы эффективнее описывать с использованием ансамблевой схемы Грелла-Дэвени;

качество прогноза лучше в сезон с октября по декабрь;

отсутствие описания конвективных процессов значительно ухудшает качество математического моделирования атмосферных процессов.

3.2 Влияние разных комбинаций схем параметризации физических процессов на качество прогнозов осадков

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. Состав комбинаций параметризаций и названия экспериментов приведены в таблице 3.2.

Рассмотрим качество прогноза осадков в период с экстремальным количеством осадков – 08 по 24 апреля 2014г.

Как уже отмечалось, в эти дни в Дар-эс-Салааме и на всём побережье Индийского океана (Мтвара, Линди, Морогоро и Танга), включая, острова Занзибар и Пемба, выпало рекордно большое количество осадков. Это привело к наводнению и огромному материальному ущербу и человеческим жертвам.

Таблица 3.2 — Комбинация схем параметризаций физических процессов, используемые в исследовании

Комбинация схемы параметризации			название эксперимента
Микрофизики	Конвекции	ППС	
Схема Кесслера	Схема Каина-Фритша	Схема Ёнсей (YSU)	111
Схема Пурдуге Линь	Схема Беттса-Миллера-Янича	Схема Меллора-Ямады-Янича (MYJ)	222
Схема Пурдуге Линь	Ансамблевая Грелла-Дэвени	Схема ACM2	237
Схема WSM6	Схема Беттса-Миллера-Янича	Схема Ёнсей (YSU)	621
Схема Томпсона	Ансамблевая Грелла-Дэвени	Схема Меллора-Ямады-Янича (MYJ)	832
Схема Томпсона	трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d	Схема ACM2	857

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 на 11 и 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 составило 138 мм/сутки. На территории Танзании экстремальными считаются осадки интенсивностью больше 50 мм/сутки.

При верификации сначала нашли ответ на вопрос: правильно ли прогнозируется факт наличия или отсутствия осадков.

Сначала были оценены ошибки пространственного распределения осадков (мм/72 часов) по данным TRMM и WRF при использовании разных комбинаций в период с 10 апреля 2014гг.

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) [64] это спутниковые данные об осадках для всего земного шара с разрешением 25 км. Эти данные представляют собой ежедневные срочные (через 3 часа) и суммарные месячные суммы количества осадков.

Карты распределения осадков представлены на рисунках 3.4 и 3.5 по данным TRMM и WRF при использовании разных комбинаций параметризаций.

Результаты использования комбинаций параметризаций согласовываются между собой и с данными TRMM в том, что много осадков наблюдалось на побережье Индийского океана. При рассмотрении результатов моделирования в деталях очевидно влияние схемы параметризации конвективных процессов на качество прогнозы осадков. Комбинации состоящие из схем Беттса-Миллера-Янича (BMJ) и ансамблевой Грелла Дэвени (GD), схемы параметризации микрофизических процессов Пурдье Линь (PL), Томпсона (TH) и WSM6 (рисунки 3.4 (в) и 3.5 (д и е)) даёт осадки, охватывающие большую территорию и большей интенсивности относительно других схем параметризации конвективных процессов. Такая тенденция может быть связана с тем, что в данный период времени на побережье Индийского океана наблюдались достаточно высокие значения температуры, а схема Беттса-Миллера-Янича (BMJ) требует большого количество влаги и отсутствия выделения скрытого

тепла на ранней стадии конвективных восходящих движений, поэтому она показала лучшую оправдываемость.

В целом, несмотря на высокое разрешение модели WRF (5 км) по сравнению с 25 км разрешения данных TRMM, структура распределения осадков по данным TRMM достаточно хорошо соответствует модельным результатам при различных комбинациях схем параметризации физических процессов как по площади, так и по количеству.

Далее были рассчитаны ошибки прогнозов осадков за весь период моделирования. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.4 для станций Дар-эс-Салаам и Морогоро, соответственно.

Из анализа результатов, приведённых в таблице 3.3 и на рисунке 3.4, следует, что на востоке модель занижает количество осадков всегда, кроме комбинации Кесслера-Каина-Фритша-YSU. Средняя абсолютная ошибка за 14 дней на станции Дар-эс-Салаам невелика и колеблется от 19,9 до 23,8 мм за 14 дней, что составляет 42 — 74%.

На востоке (станция Дар-эс-Салаам) 11 апреля 2014 наблюдались осадки интенсивностью 138,1 мм/сутки. Это не удалось описать ни в одном из численных экспериментов. Во всех численных экспериментах прогностическое количество осадков меньше 40 мм/сутки, при этом наибольшее значение получено при использовании комбинации PL-BMJ-MYJ (34,4 мм/сутки). 12 апреля 2014, когда наблюдались осадки интенсивностью 106,2 мм/сутки, при использовании всех комбинаций прогностические осадки имели интенсивность больше 20 мм/сутки. Моделирование с использованием комбинация KS-KF-YSU привело к завышению интенсивность осадков (302,9 мм/сутки), во всех остальных случаях прогнозировалось менее 90 мм/сутки.

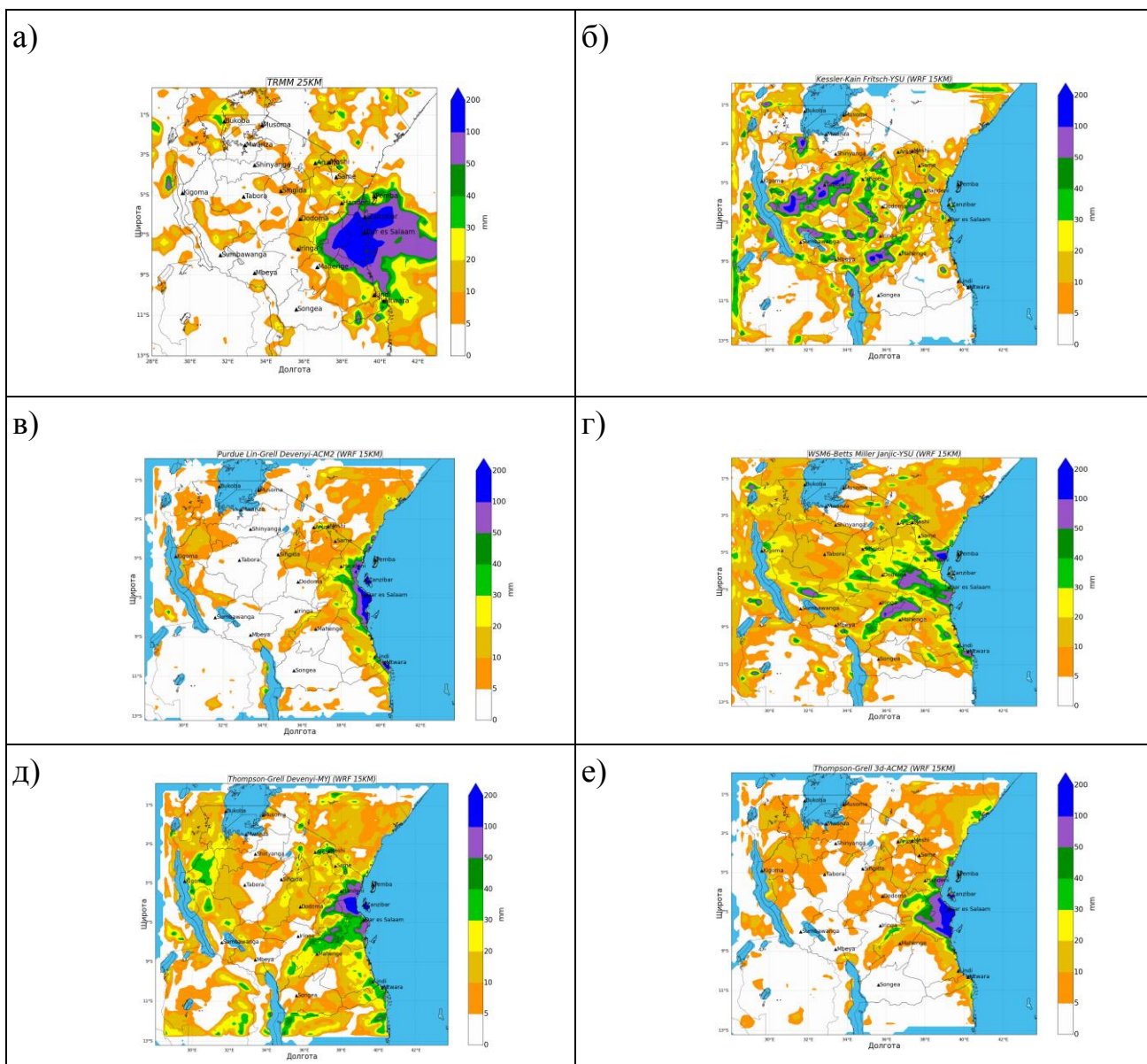


Рисунок 3.4 —Пространственное распределение количества осадков по данным TRMM (а) и при разных комбинациях схем параметризаций (б) Кесслера-Каина-Фритша -YSU, в) Пурдье Линь-Грелл Дэвени -ACM2 г) WSM6-Беттс Миллер Янич-YSU д) Томпсон-Грелл Дэвени -MYJ и е) Томпсон-Грелл 3d-ACM2 за период с 10 по 13 апреля 2014г

Таблица 3.3 — Средние абсолютные (δ), среднеквадратичные (σ) ошибки прогноза осадков и среднее значение в мм за период моделирования с 08 по 24 апреля 2014

Регион	Прогноз	Ошибка	Комбинация схемы параметризации					
	Среднее значение		111	222	237	621	832	857
восточный (Дар-эс-Салаам)	32,2	δ	66,3	20,6	19,9	23,8	22,4	21,3
		σ	110,2	26,0	33,6	39,5	37,6	33,8
восточный (Морогоро)	10,8	δ	6,9	7,7	6,5	5,8	5,7	7,0
		σ	15,08	15,50	15,06	15,1	14,8	14,9
южное высокогорье	1,7	δ	5,2	3,3	0,01	5,0	4,2	0,7
		σ	11,0	7,3	4,3	11,2	9,7	5,4
Южный	1,4	δ	1,3	3,2	1,4	2,0	1,6	1,5
		σ	2,7	8,0	2,8	3,1	2,7	2,9
северо- западный	14,1	δ	15,7	13,3	14,7	11,6	15,7	14,2
		σ	24,9	23,8	24,2	17,8	25,3	23,6

В результате анализа получено, что по среднеквадратичной (26,0 мм) и относительной (33%) ошибки прогноза лучшей комбинацией является схема PL-BMJ-MYJ, а комбинация схем параметризаций KS-KF-YSU дала низкую точность прогноза осадков – относительная ошибка 117%.

Относительная ошибка прогноза осадков в этом регионе изменяется от 33 до 100% и максимальна (117%) для комбинации параметризации KS-KF-YSU.

На станции Морогоро экстремальных осадков в период исследования не было отмечено. Верификация численных экспериментов выявила, что

использование всех комбинаций параметризаций позволяет хорошо прогнозировать осадки со средней ошибкой меньше 8 мм за 14 дней, при этом комбинация TH-GD-MYJ обеспечивает лучшую оправдываемость прогноза осадков со средней абсолютной и среднеквадратической ошибками – 5,7 и 14,8 мм за 14 дней, а комбинация PL-BMJ-ACM2 показала худшую оправдываемость прогноза осадков со средней абсолютной и среднеквадратичной ошибки – 7,7 и 15,5 мм за 14 дней. На этой станции, несмотря на отсутствие осадков большой интенсивности, относительные ошибки большие и изменяются в пределах от 51 до 88 %.

Самое большое количество осадков на станции Морогоро наблюдалось 12.04.2014г. и составляло 34,0 мм/сутки, а все комбинация параметризаций прогнозировали меньше 20 мм/сутки.

Недостаток прогноза объясняется тем, что станция Морогоро находится на высоте 1107 м, в котловане, а вокруг расположены горы, которые сильно влияют на качество прогноза осадков. Кроме этого не очень высокие оценки качества прогнозов могут быть связаны и с качеством проведения измерений на станции и с необходимостью более точной (высокого порядка) интерполяции оцениваемых прогностических величин в точку станции. Это будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

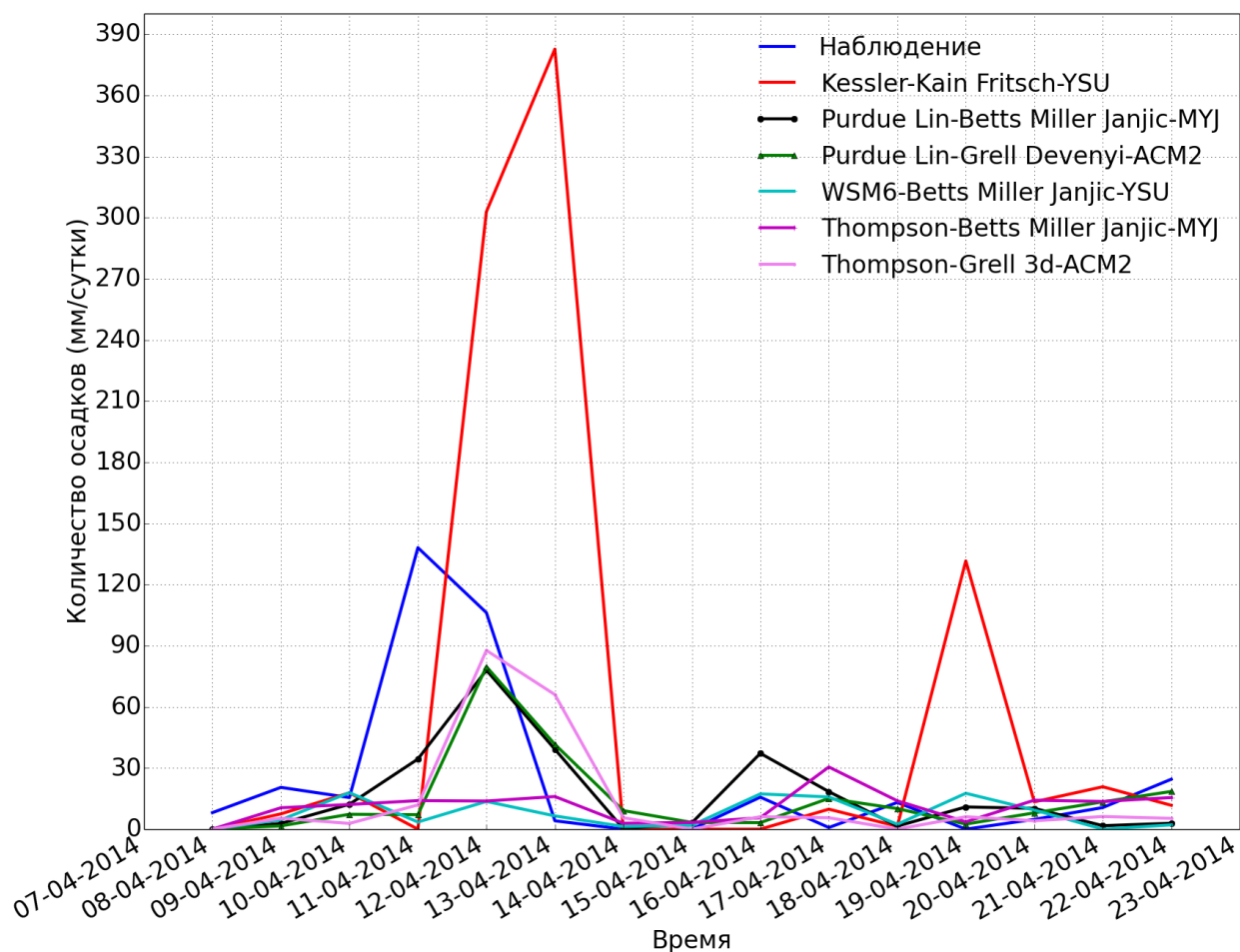


Рисунок 3.4 – Количество осадков при разных комбинациях схем параметризаций на станции Дар-эс-Салаам.

В других регионах качество прогнозов хорошее, в основном ошибка не велика.

На южном высокогорье (Мбея) и юге (Сонгеа) в рассматриваемый период не наблюдалось экстремальных осадков. Наивысшая оправдываемость прогноза на 14 дней на южном высокогорье получена при использовании комбинация PL-GD-ACM2: средняя абсолютная ошибка – 0,01 мм за 14 дней, среднеквадратическая ошибка – 4,3 мм и относительная ошибка – 0,4 %.

Низкая оправдываемость получена с помощью комбинации KS-KF-YSU – средняя абсолютная и систематическая ошибки 5,2 и 7,7 мм/14 дней и относительная ошибка 310%. Относительные ошибки прогноза очень высоки и достигают 310%. По относительным ошибкам прогноза только две комбинации параметризаций позволяют прогнозировать осадки с ошибкой менее 100% – PL-GD-ACM2 (0,4%) и TH-G3d- ACM2 (40%).

Преимущество комбинаций параметризаций, в которые включена одна из ансамблевых схем параметризации конвекции Грелла Дэвени (GD или G3d) связано с тем, что эти схемы используют 144 члена ансамбля и окончательное прогностическое значение получено осреднением всех членов ансамбля по области сетки. Такой подход сказывается положительно (когда осадков много) и отрицательно (когда осадков мало).

Что касается южного района, в этот период исследования самое большое значение (8,0 мм/сутки) наблюдались в 17.04.2014г., при этом все комбинации прогнозировали меньше 20,0 мм/сутки. Средние абсолютные ошибки и средние квадратические отклонения за 14 дней небольшие и варьируются от 1,3 до 3,2 мм и от 3,2 до 8,0 мм. Относительные ошибки, как и в других регионах очень высокие и изменяются от 14 до 127%. Высокая и низкая точность согласно средней абсолютной и среднеквадратической ошибки получена при использовании комбинации схемы параметризации KS-KF-YSU и PL-BMJ-MYJ

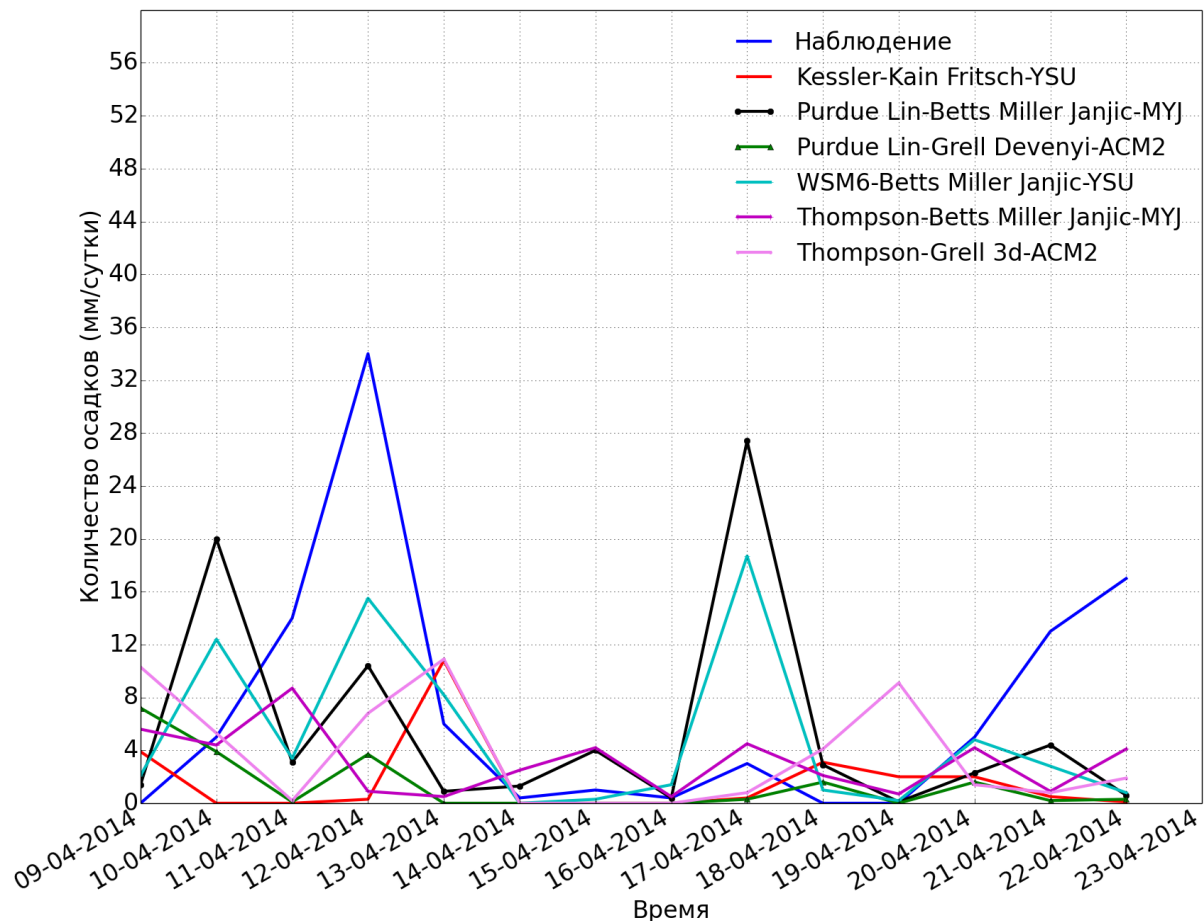


Рисунок 3.5 – Количество осадков при разных комбинациях схем параметризаций на станции Морогооро

В этот период исследования численные эксперименты (таблица 3.3) для северо-западного региона (метеостанция Букоба) показали, что при использовании всех комбинаций параметризаций прогностические значения меньше данных наблюдения. Средние абсолютные и среднеквадратические ошибки не очень значительно отличаются для разных комбинация за весь период моделирования и составляют 11,6 – 15,5 мм и 17,8 – 25,3 мм/14 дней, соответственно. Относительные ошибки за 14 дней очень большие, более 100%.

Большие относительные ошибки при прогнозировании осадков частично основаны на методике оценки результатов моделирования, которая была использована в данной работе, так как станция может быть находится далеко от узла сетки или в горной местности, следовательно, при интерполяции результатов моделирования в точку станции возникает рассогласование между данными моделирования и наблюдениями, так как осадки является негладкой величиной. Эта проблема требует дополнительных исследований.

Лучшие оценки прогнозов осадков получены при использовании комбинации схем параметризаций WSM6-BMJ-YSU, где средняя абсолютная и среднеквадратичная ошибки составляет 11,6 и 17,8 мм/14 дней, соответственно. В этот период исследования результаты численных экспериментов на северо-западе (метеостанции Букоба) показали, что экстремальные осадки наблюдались 16.04.2014г. и составляли 90 мм/сутки, а модель при использовании разных схем параметризации прогнозировала меньше 35,0 мм/сутки.

На этой территории при использовании всех комбинаций параметризаций хорошо прогнозируются осадки, так как средняя ошибка меньше 12,3 мм/сутки, при этом комбинация WSM6-BMJ-YSU обеспечивает наименьшую ошибку 6,3 мм/сутки, а комбинация TH-G3-ACM2 наибольшую ошибку 12,3 мм/сутки.

Результаты моделирования показывают, что если в комбинацию параметризаций входит схема параметризации конвекции Беттса-Миллера-Янича (BMJ), то экстремальные количества осадков прогнозируются более точно. Это может быть связано с тем, что в данной схеме для начала конвекции (триггер) требуется достаточно большое количества влаги и отсутствие выделения скрытого тепла на ранней стадии развития восходящих движений.

Из анализа результатов экспериментов можно снова сделать вывод об основной роли схемы параметризации конвекции и о незначительном влиянии

на качество прогноза осадков в этом регионе схемы параметризации пограничного слоя атмосферы и микрофизики облаков.

Для второго сезона (с 15 по 24 декабря 2011 года), также, как и в первый сезон, прогнозы рассчитывались с заблаговременностью 72 часа ежедневно от 00 часов в период с 15 по 24 декабря 2011 года. Особое внимание уделено прогнозам 19 и 20 декабря, так как в этот период наблюдались осадки очень большой интенсивности, например, на станции Дар-эс-Салаам 19.12.2011гг. интенсивность осадков составила 156 мм/сутки.

В результате анализа процессов в экваториальном регионе в рассматриваемый период, было установлено, что увеличение интенсивности осадков связано с усилением центров действия атмосферы северного полушария (Азорский и Сибирский антициклоны, Аравийский гребень), которое вызвано смещением ВЗК на юг. В южном полушарии южно-атлантический антициклон (антициклон острова Святой Елены) был относительно сильным (1027гПа), а южноиндийский антициклон относительно слабым (1020гПа). В результате этих процессов уменьшилась температура поверхности воды над экваториальной центрально-восточной частью Тихого океана, в то время как температура поверхности воды восточной и центральной экваториальной части Индийского океана увеличивалась. Доминировали на территории страны потоки с запада, что привело к усилению конвергенции в приземном слое атмосферы, развитию конвекции и повсеместным очень сильным дождям. Такая ситуация часто наблюдается в этом регионе.

Была выполнена оценка качества прогноза осадков за весь период (9 дней) моделирования для каждой комбинации. Результаты оценки оправдываемости прогнозов осадков представлены в таблице 3.4.

Как и ранее из-за сильной пространственно-временной изменчивости осадков на территории Танзании в численных экспериментах отдельно рассматривались 4 региона.

Таблица 3.4 — Средние абсолютные (δ), среднеквадратичные (σ) ошибки прогноза осадков и среднее значение количества осадков с 15 по 24 апреля 2011г.

Регион	Прогноз	Ошиб ка	Комбинация схемы параметризации					
	Среднее значение (мм/9 суток)		111	222	237	621	832	857
Восточный	39,0	δ	40,4	38,6	35,2	38,7	35,5	24,8
		σ	52,5	53,1	52,0	53,1	52,4	53,5
южноевысок огорье	25,1	δ	23,4	33,8	26,0	29,2	29,2	32,1
		σ	18,2	21,9	17,3	18,1	18,1	18,4
Южный	7,3	δ	1,6	31,8	8,0	29,4	15,4	9,8
		σ	10,1	30,9	8,6	42,1	18,3	13,8
северо западный	2,1	δ	2,3	2,1	2,0	2,2	1,9	2,1
		σ	8,68	8,40	8,70	8,58	8,53	8,65

Из анализа результатов, приведённых в таблице 3.4, видно, что на востоке модель при использовании всех комбинаций параметризаций занижает количество осадков. В среднем они занижаются приблизительно на 21 — 39 мм/9 суток.

В этом регионе изменчивость осадков не очень велика, так как максимальная и минимальная среднеквадратическая ошибка отличается на 1,5

мм/9 суток (53,5 52,0 мм/9суток) с использованием комбинаций Томпсона-Грелла 3d- АСМ2 и Пурдуге Линь-Беттса-Янича-МҮҖ. Лучший и худший результаты по средней абсолютной ошибки (24,8 и 40,4 мм/9 суток) получены при использовании комбинаций Томпсона-Грелла 3d-АСМ2 и Кесслера-Каина-Фритша-YSU, соответственно. Относительные ошибки прогноза осадков на востоке в этот период находится в диапазоне 53 – 99%.

По сравнению с предыдущим результатам для первого сезона ошибки прогноза на побережье Индийского океана не очень значительны.

По среднеквадратической ошибке прогноза высокая точность на востоке, южном высокогорье и юге получена при использовании комбинация схем Линь-Грелл Дэвени-АСМ2, а на северо-западе – Пурдуге Линь- Беттса Миллера Янича-МҮҖ.

При анализе таблицы 3.4 виден большой диапазон изменения относительной ошибки прогноза осадков в южном регионе – от 4 до 425%. Выделяется только две комбинации с минимальной относительной ошибкой: Кесслера-Каина-Фритша-YSU (4%) и Пурдуге Линь-Грелла Дэвени –АСМ2 (9%). Для южного высокогорья относительная ошибка изменяется от 18 до 69%.

Выводы

Из-за того, что осадки на территории республики Танзания распределяются неравномерно и возникают за счет разных физических механизмов, для хорошего гидродинамического прогноза осадков лучше использовать вложенные сетки и разные наборы параметризаций в разных регионах.

В целом, по результатам экспериментов сделаны выводы о том, что

– осадки экстремальной интенсивности не очень хорошо прогнозируются адаптированной гидродинамической мезомасштабной моделью WRF. Прогнозируется их наличие, но сильно искажается интенсивность.

– лучшей для прогноза осадков на большей части страны (восток, юг) является комбинация схем параметризаций физики — Пурдуге Линь - Грелл Дэвени - ACM2, а на северо-западе — Пурдуге Линь - Беттс Миллер Янич-МҮҖ.

– качество прогноза осадков в основном зависит от схемы параметризации конвекции и несущественно зависит от схемы параметризации микрофизики и ППС.

– Было проведено дополнительное исследование по чувствительности прогноза осадков к схеме параметризации микрофизики и сделан вывод о том, что повысить качество прогноза может использование более точных двухмоментных схем параметризации (см. глава 2). 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-МҮҖ), а ещё и схема Каина-Фритша и трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d.

Далее этапе исследовалось качество прогноза экстремальных осадков в зависимости от схемы параметризации конвекции, конденсации и микрофизики облаков. Для этого проводилось 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 и все комбинации описаны в таблице 3.5. Так как схемы параметризации конвекции и микрофизических процессов активируются в каждом столбе атмосферы, где есть вероятность возникновения осадков, то гидродинамическая модель атмосферы

рассматривает возможность осадков в каждой точке пространства и выдается прогноз отсутствия или наличия (с интенсивностью) осадков.

Таблица 3.5 — Схемы параметризации микрофизики облаков и конвективных процессов, используемые в исследовании

Схемы параметризации	
микрофизики облаков	конвективных процессов
Схема Кесслера	
Схема Пурдье Линь	Схема Каина-Фритша
WRF (WSM6)	Схема Беттса-Миллера-Янича
Схема Томпсона (двухмоментная схема)	Ансамблевая Грелла-Дэвени
Схема Моррисона Double Moment	трехмерная ансамблевая схема Грелла 3d
WRF Double Moment (WDM5)	
WRF Double Moment (WDM6)	

Для верификации моделирования осадков использовалось их суммарное значение по области моделирования. Далее был проанализирован временной ход накопленного количества осадков в зависимости от комбинации схем параметризации. Особое внимание уделялось изучению влияния одномоментных и двухмоментных схем параметризации микрофизики (см. глава 2.2).

Как уже отмечалось ранее на большей части территории Танзании два сезона дождей в зависимости от положения ВЗК и один сухой сезон, поэтому целью исследования был выбор наилучшей комбинации параметризаций, которая, в идеальной случае, позволяла бы хорошо моделировать осадки в оба

периода. В связи с этим при проведении численных экспериментов опять рассматривались два месяца: апрель и декабрь.

В качестве примера рассмотрим результаты 48 часового прогноза с 10 по 12 апреля 2014 года и с 14 по 16 декабря 2015 года, которые представлены на рисунках 3.7 – 3.8 и 3.9 – 3.10, соответственно.

На всех рисунках сохраняются следующие обозначения:

Красный цвет – параметризации конвекции Грелла Дэвени ;

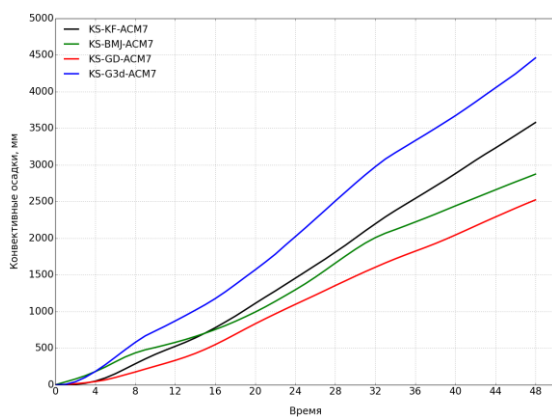
Синий цвет – параметризации конвекции Грелла 3d;

Черный цвет – параметризации Каина-Фритша;

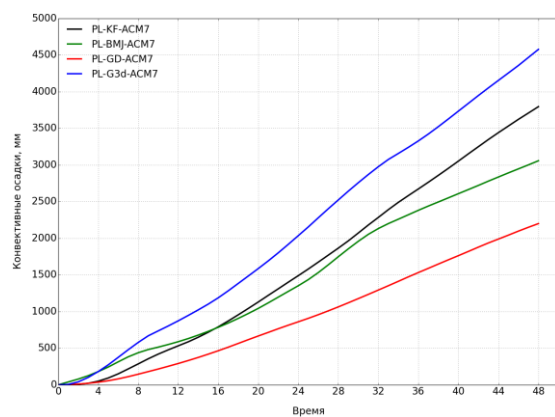
Зеленый цвет – параметризации Беттса Миллера Янича.

Видно, что при моделировании (рисунок 3.7) большое количество осадков получено при использовании трехмерной ансамблевой схемы Грелла 3d и малое при использовании ансамблевой схемы Грелла Дэвени. Если проранжировать модельное количество осадков от наибольшего да наименьшего в зависимости от схемы параметризации конвекции, то этот ряд будет следующим Грелла 3d, Каина-Фритша, Беттса Миллера Янича и Грелла Дэвени .

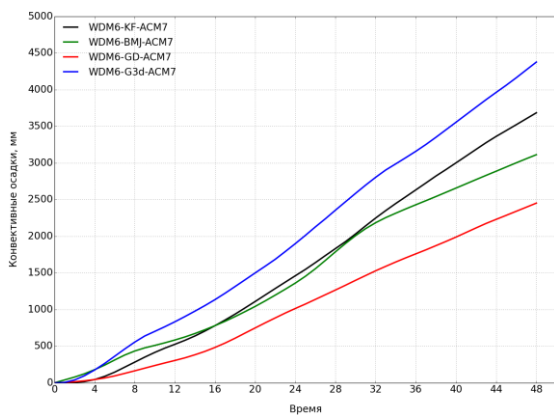
а)



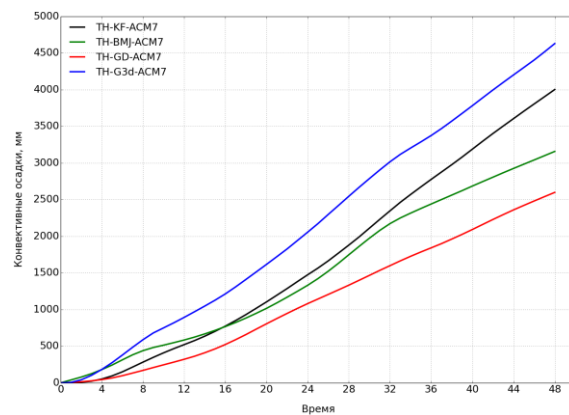
б)



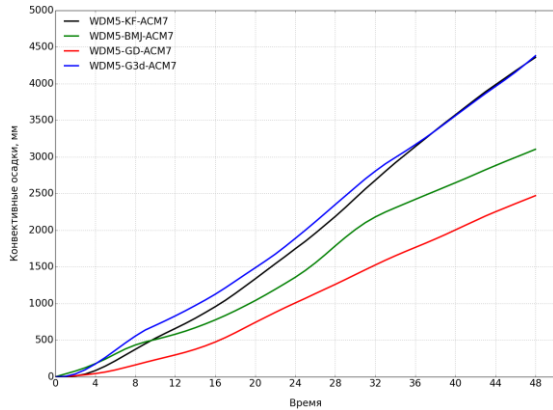
в)



г)



д)



е)

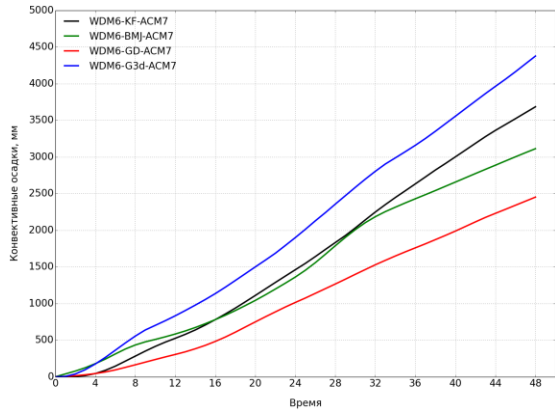
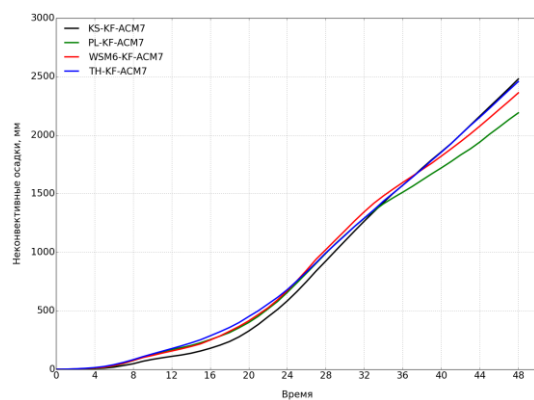
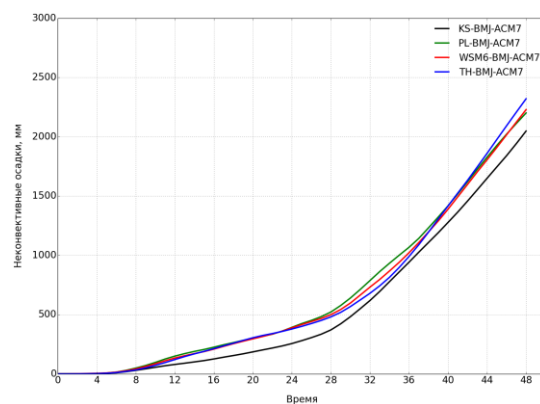


Рисунок 3.7 – Временной ход накопленного количества суммарных конвективных осадков в период с 10 по 12 апреля 2014г при использовании одномоментных (а, б, в) и двухмоментных (г, д, е) схем.

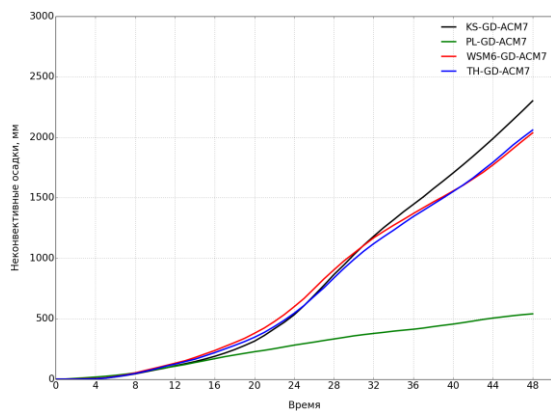
а)



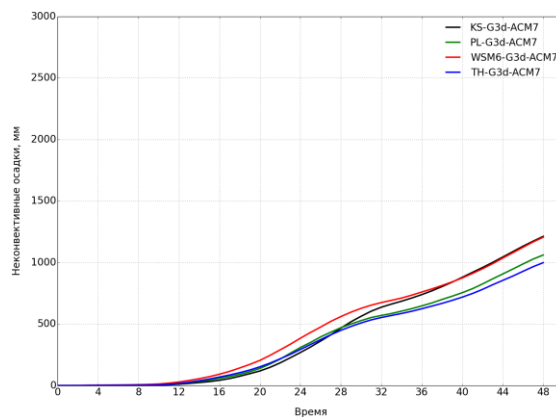
б)



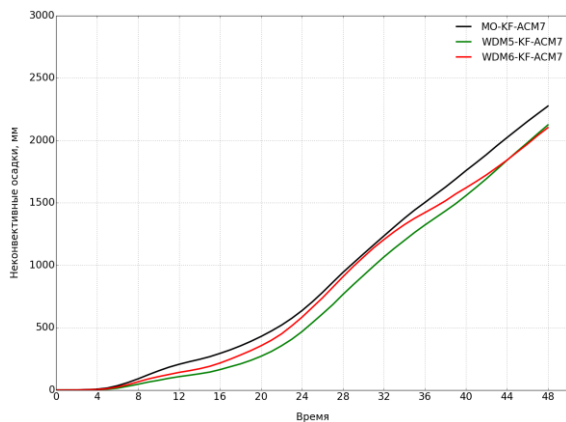
в)



г)



д)



е)

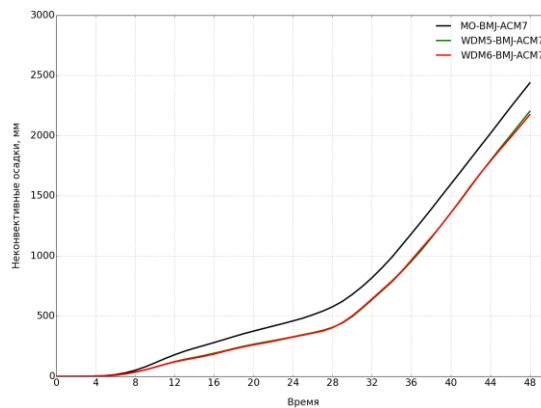


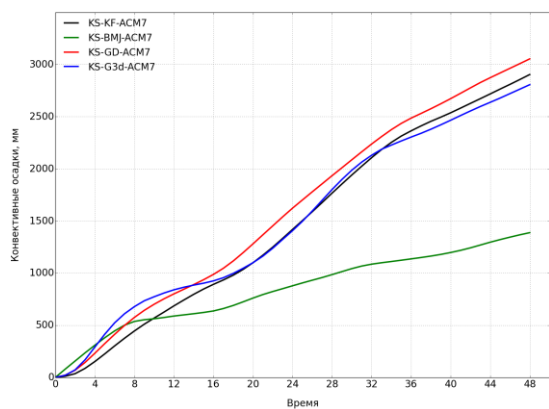
Рисунок 3.8 – Временной ход накопленного количества суммарных неконвективных осадков в период с 10 по 12 апреля 2014г при использовании одномоментных (а, б, в, г) и двухмоментных (д, е) схем.

Однако, при анализе результатов приведенных на рисунке 3.8 видно, что большое количество осадков прогнозируется при использовании любой схемы параметризации микрофизики совместно со схемой параметризации конвекции Каина-Фритша. Большее количество осадков прогнозируется только при использовании комбинации двухмоментной схемы параметризации микрофизики WDM5 и схемы параметризации конвекции Грелла Дэвени.

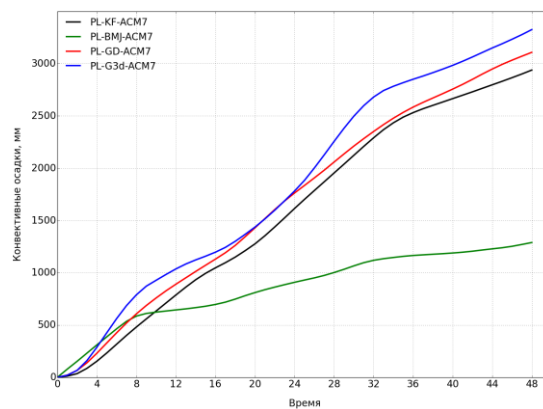
Графики для 48 часового прогноза осадков в период с 14 по 16 декабрь 2015 представлены на рисунки 3.9 и 3.10 для различных комбинаций схем параметризации микрофизики облаков и конвективных процессов. Для этого период, графики временного изменения показали, что количество осадков существенно зависит от конвективных и конденсационных процессов.

Графики количества осадков в зависимости от схемы параметризации конвективных процессов выявили, что малое количество осадков в этом цикле исследования связано с использованием схемы параметризации конвекции Бетса Миллера Янича, а максимальное количество осадков прогнозируется при использовании ансамблевых схем Грелла Дэвени и Грелла 3d.

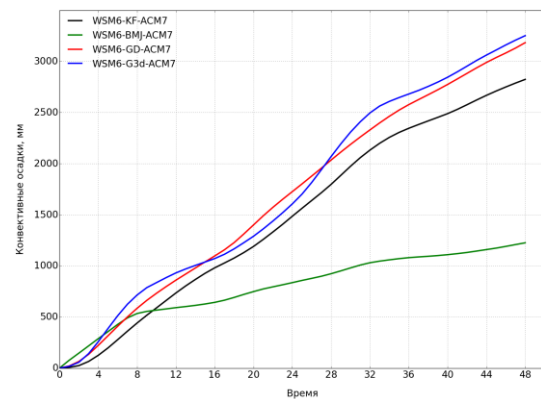
а)



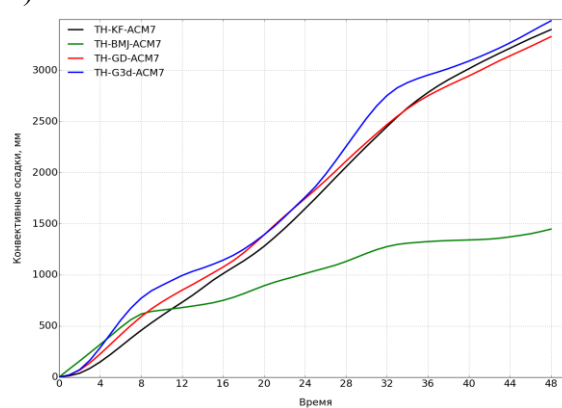
б)



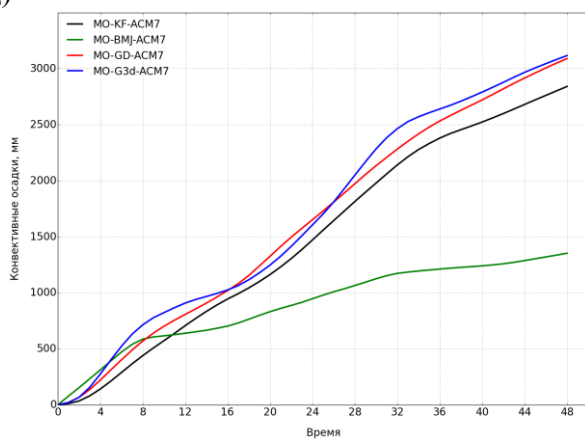
в)



г)



д)



е)

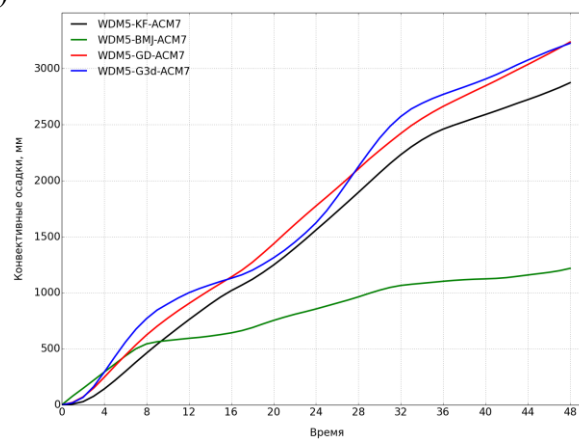
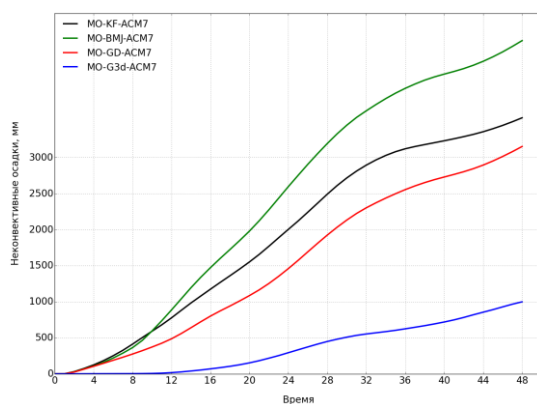
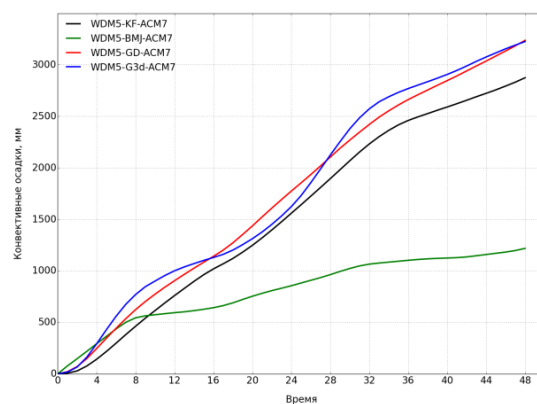


Рисунок 3.9 – Временной ход накопленного количества суммарных конвективных осадков в период с 14 по 16 декабря 2015г при использовании одномоментных (а, б, в) и двухмоментных (г, д, е) схем.

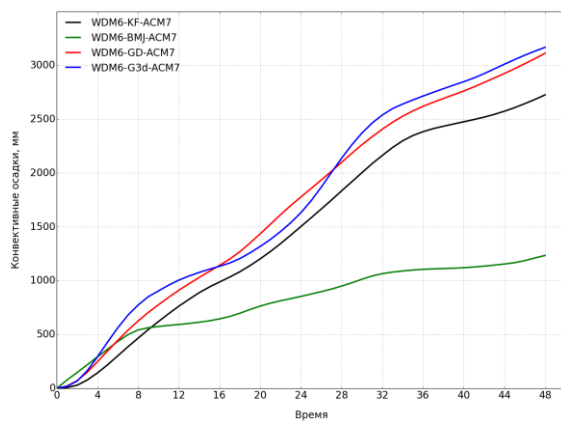
а)



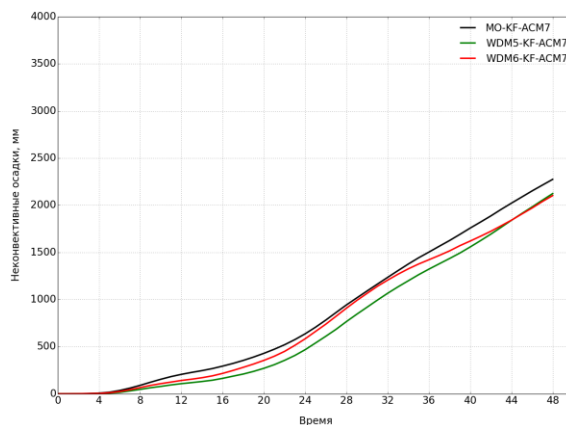
б)



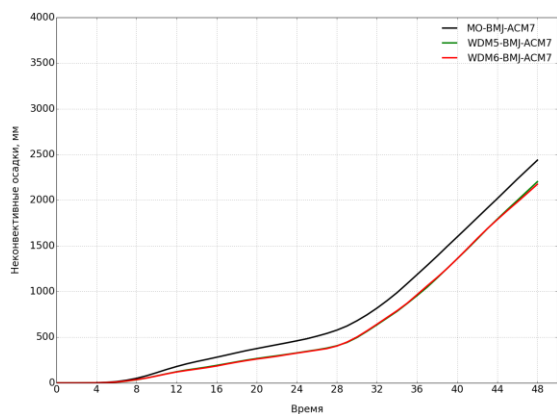
в)



г)



д)



е)

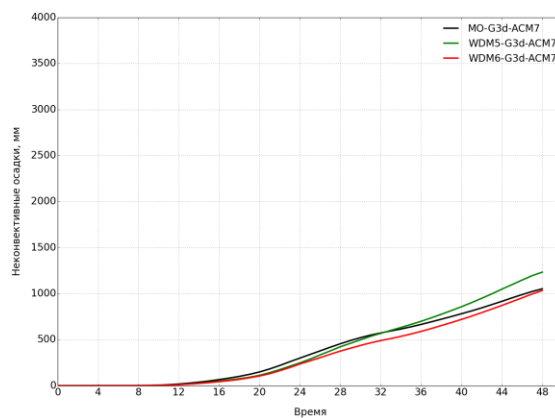


Рисунок 3.10 – Временной ход накопленного количества суммарных конвективных осадков в период с 14 по 16 декабря 2015г при использовании одномоментных (а, б, в) и двухмоментных (г, д, е) схем.

Вывод

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) Грелла 3d, Каина-Фритша, Беттса Миллера Янича и Грелла Дэвени.

При моделировании конденсации количественные оценки показали, что много осадков выпадают, когда в модели использованы одномоментная схема Пурдье-Линь, большое количество осадков моделируется когда используется схема Грелла 3d.

Во втором сезоне получены при использовании ансамблевой схемы Грелла 3d и Грелла Дэвени, а мало осадков при использовании схемы Беттса Миллера Янича.

4. Ансамблевые прогнозы

В связи с развитием вычислительной техники в конце 1980-х – начале 1990-х гг метеослужбы развитых стран для повышения точности прогноза погоды и климата начали использовать системы ансамблевого прогнозирования [65]. В России система ансамблевого долгосрочного прогноза с помощью мезомасштабной негидростатической атмосферной модели COSMO-RU была разработана в 2000-х годах [66, 67, 68]. Схема ансамблевого прогноза используется сегодня в глобальной и региональной климатических моделях ГГО им. А.И.Воейкова [69, 70] .

Ансамблевый прогноз представляет собой полный набор прогнозов, полученных после того, как численная модель проводит расчёты несколько раз при различных условиях. Например, с различным набором схем параметризаций физических процессов или от разных начальных условий.

Для повышения качества прогноза осадков в Восточной Африке в данной работе была разработана схема ансамблевого прогноза. При разработке схемы ансамблевого прогноза осадков полагалось, что каждый член ансамбля должен быть согласован с неопределенностью в наблюдениях. Это означает, что если наблюдаемое значение осадков намного (более чем на 50 мм/сутки) отличается от прогностического, то такой член ансамбля исключается из рассмотрения.

При создании модельных ансамблей и их интерпретации важную роль играет точность описания (параметризации) неадиабатических процессов в разных регионах земного шара в различные сезоны года. Поэтому был построен ансамбль прогностических полей осадков на основе разных параметризаций основных физических процессов, влияющих на качество прогноза.

Для создания ансамбля 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. Использовались комбинации, описанные в таблице 3.5 (раздел 3.2). Итого первоначально был создан ансамбль, состоящий из 28 членов. На первом этапе была оценена корректность данного ансамбля.

4.1 Оценка ансамбля с использованием ранговых диаграммы

Существует несколько методов оценки качества вероятностных прогнозов, такие как диаграммы Талаграна [71,72], ROC-кривые [73] и диаграммы надежности [74].

В данной работе для оценки качества ансамбля были построены ранговые гистограммы или диаграммы Талаграна, целью которых является оценка степени разброса членов ансамбля, а, следовательно, и степени доверия к ансамблю.

Диаграммы Талаграна представляют собой гистограммы, которые показывают, в какой интервал прогнозируемых ансамблем значений попадает наблюдение.

Ранговая гистограмма позволяет быстро оценить качество ансамблевого прогноза. Например, если аппроксимирующая диаграмму Талаграна прямая линия возрастает/убывает, это означает, что прогностические значения занижаются/завышаются. В случае правильного формирования ансамбля, то есть, при совпадении распределения ансамбля с распределением наблюдений, столбики ранговой гистограммы будут иметь одинаковую высоту. Если аппроксимирующая линия имеет вогнутую или выпуклую форму, это значит, что ансамбль построен неправильно прогностические значения распределены

неравномерно, наиболее вероятны значения, приходящиеся на границах/центре отрезка оси абсцисс. В этом случае невозможно сделать правильный вывод из результатов ансамблевого прогноза.

В качестве примера рассмотрим результаты прогноза количества осадков с заблаговременностью 48 чаксов для разных комбинаций параметризации для станции Дар-эс-Салаам. Рассмотрим два случая:

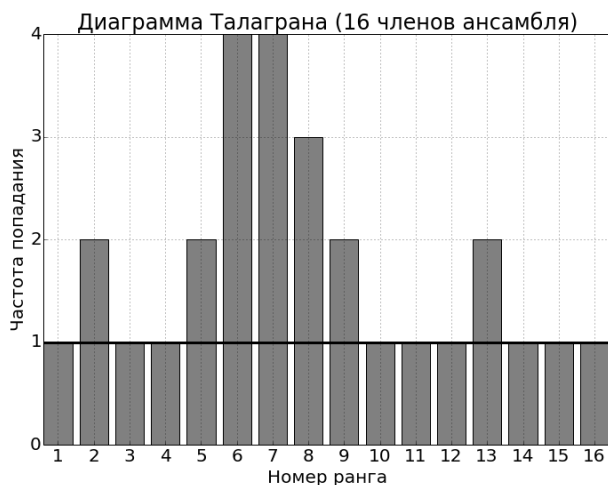
осадки с небольшой (меньше 50 мм/два дня) интенсивностью за период с 08 по 10 апрель 2014гг в 06Z;

осадки с большой интенсивностью (больше 50 мм/два дня) за период с 10 по 12 апрель 2014гг в 06Z.

Сначала были использованы прогностические значения 16 членов ансамбля и наблюдение, по которым построены диаграммы Талаграна. Весь диапазон прогностических значений разделён на 17 интервалов.

Ранговые диаграммы для 48 часовых прогнозов в периоде с 08 по 10 апреля (мало осадков) и с 10 по 12 апреля (интенсивные осадки) 2014 г представлены на рисунке 4.6.

а)



б)

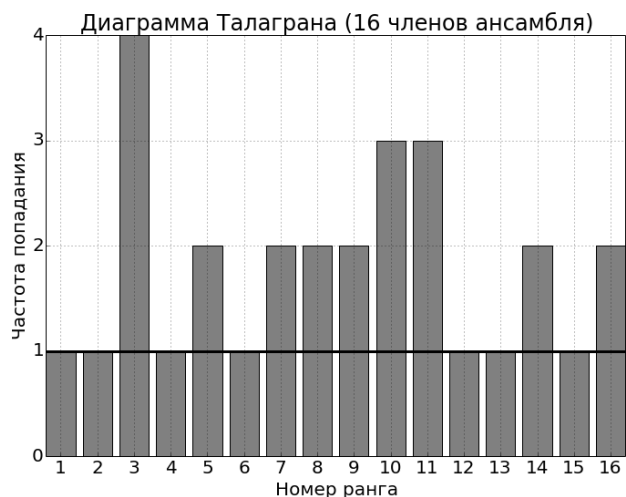


Рисунок 4.6 – Диаграмма Талагрana для ансамблевых прогнозов, построенных на основе разных схем параметризации для 48 часового прогноза осадков на станции Дар-эс-Салаам с 08 по 10 апрель 2014гг (а) и с 10 по 12 апрель 2014гг (б).

Черная горизонтальная линия на диаграммах рисунка 4.6 показывает, какая должна быть высота столбиков в случае идеального распределения ансамбля.

По результатам, представленных на рисунке 4.6 (а) и (б) можно видеть, что результаты моделирования не полностью отражают наблюдения, так как в идеальной ситуации высота столбиков должна быть равной и аппроксимироваться горизонтальной линией.

Ранговая гистограмма (рисунок 4.6 (а)) показывает, что в 10 из 16 случаев (примерно 63%), модель точно прогнозируется слабые осадки. Что же касается качества прогноза экстремальных осадков (рисунок 4.6(б)), то можно видеть, что многие (9 из 16) членов ансамбля (около 56%) завышают количество осадков,

следовательно, качество прогноза осадков большой интенсивности не высокое (44%).

В заключении, можно сделать вывод о том, что в оперативном прогнозировании осадков, схема ансамблевого осадков, состоящая из 16 членов ансамбля может быть использована при прогнозе слабых осадков. Осадки большой интенсивности прогнозируются только качественно – наличие/отсутствие.

4.2 Создание схема ансамблевого моделирования осадков

По результатам численных эксперименты была создана схема ансамблевого моделирования осадков, состоящая из 16 (таблица 4.1) комбинаций схем параметризации микрофизики и конвекции. Из первоначально составленного из 28 членов ансамбля после предварительного анализа было удалено 12 членов.

Для верификации результатов ансамблевого моделирования, прогнозы каждого члена ансамбля и всего ансамбля были интерполированными в точки расположения метеорологических станции Дар-эс-Салаам, Занзибар, Мтвага и Морогоро. Эти станции были выбраны потому, что они находятся недалеко от Индийского океана, включая остров Занзибар, и на этой территории страны в часто выпадают осадки большой интенсивности, наносящие сильный ущерб.

Затем было рассчитаны суммарное количество осадков и среднеквадратическая ошибка прогноза, как для всех членов ансамбля, так и для каждого члена за период с 11 по 12 апрель 2014гг. Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Статистические оценки качества прогнозов осадков на станции Дар-эс-Салаам за период с 11 по 12 апрель 2014гг.

Условия прогнозов	Результаты прогноза осадков (мм/сутки)		
	RMSE	сумма осадков	Ошибка
Наблюдение	–	106,2	
Ансамбль (16членов)	8,0	81,8	24,4
Кесслер–Каин-Фритш –АСМ2	5,4	124,1	-17,9
Кесслер – Беттс - Миллер - Янич – АСМ2	15,7	202,6	-96,4
Кесслер –Грелл - Дэвени –АСМ2	7,1	97,6	8,6
Кесслер –Грелл 3d –АСМ2	6,7	108,2	-2,0
Пурдье- Линь – Беттс -Миллер-Янич – АСМ2	9,1	152,7	-46,5
WSM6 – Беттс -Миллер -Янич– АСМ2	8,9	136,2	-30,0
WSM6–Грелл 3d –АСМ2	2,0	90,5	15,7
Моррисон – Каин-Фритш – АСМ2	15,5	296,5	-190,3
Моррисон – Беттс -Миллер -Янич – АСМ2	8,1	135,4	-29,2
Моррисон – Грелл- Дэвени – АСМ2	6,1	80,5	25,7
Томпсон – Каин-Фритш – АСМ2	6,0	107,8	-1,6
Томсон – Беттс- Миллер- Янич – АСМ2	12,6	234,3	-128,1
Томпсон – Грелл- Дэвени – АСМ2	5,8	98,5	7,7
WDM5 – Каин-Фритш – АСМ2	4,9	171,4	-65,2
WDM5 – Беттс -Миллер -Янич – АСМ2	8,3	170,5	-64,3
WDM5 – Грелл 3d – АСМ2	5,8	83,9	22,3

Из анализа таблицы 4.1 следует, что комбинации параметризаций, включающие схемы параметризации конвективных процессов Грелла Дэвени и Грелла 3d, в данном цикле исследования позволили прогнозировать количество осадков близкое к наблюдаемому значению (106,2 мм/сутки), в то время как комбинация, состоящих из схемы параметризации конвективных процессов Каина-Фритша и Бетсса-Миллера-Янича, сильно завышала количество осадков. Более того, моделирование с использованием комбинации Моррисона - Беттса Миллера Янича - ACM2 практически точно прогнозировала сумму осадков.

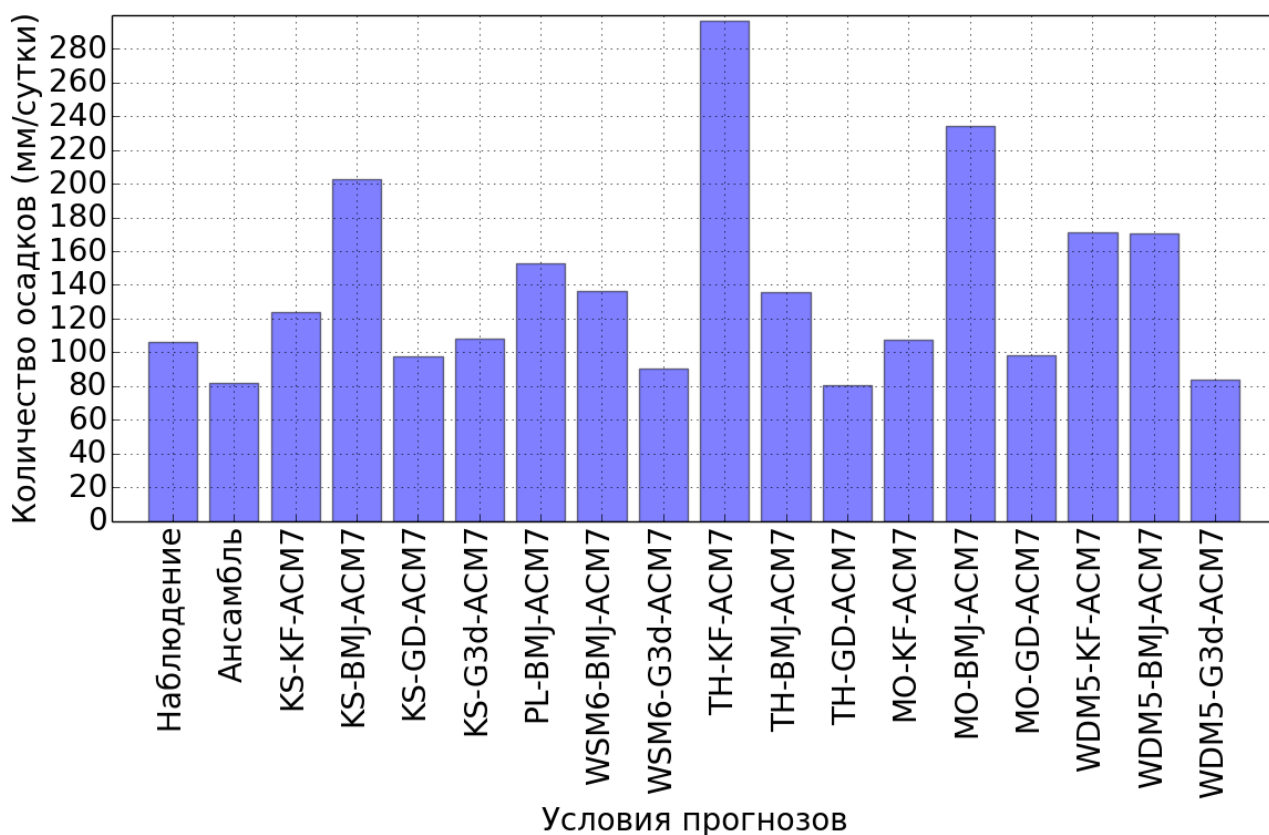


Рисунок 4.7 – Прогностические количества осадков при использовании разных схем параметризаций на станции Дар-эс-Салаам с 10.04.2014, обозначения комбинаций параметризаций в таблице 3.2.

Все комбинации параметризаций, включающие схемы параметризаций конвективных процессов Грелла Дэвени (GD) и особенно ансамблевую схему Грелла 3d (Grell 3d), на метеостанции Дар-эс-Салаам (см. таблица 4.1 и рисунки 4.7 и 4.8) занижали суммарное количество осадков.

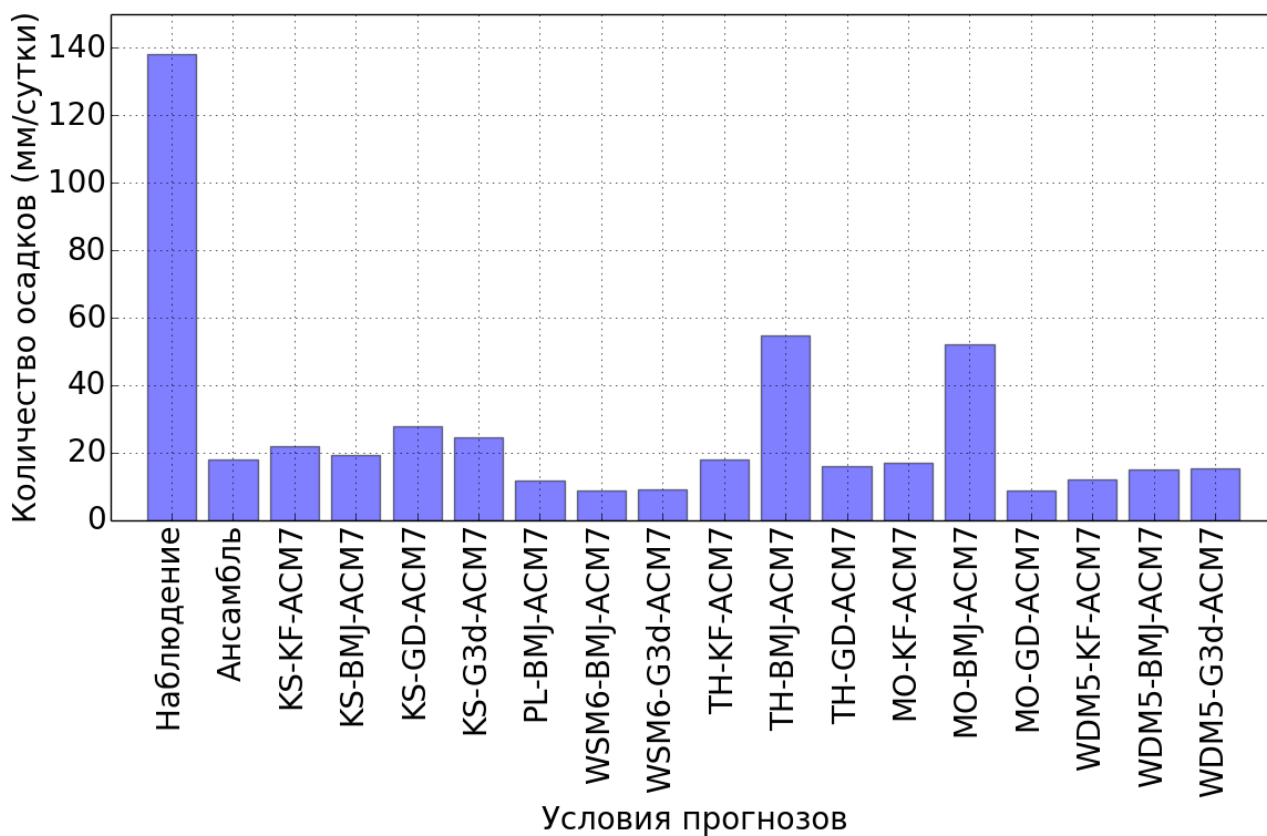


Рисунок 4.8 – Прогностические количества осадков при использовании разных схем параметризаций на станции Дар-эс-Салаам с 11.04.2014 , обозначения комбинации в таблице 3.2.

На основе проведенного анализа далее в данном исследовании из системы ансамблевого прогноза осадков были исключены все комбинации, которые прогнозировали количество осадков меньше 50 мм во время сильных дождей. Таким образом, схема ансамблевого прогноза осадков на станции Дар-эс-Салаам состоит из 16 членов ансамбля, так как следующие двенадцать комбинаций схем параметризации были исключены: Пурдье-Линь-Каин-Фритш-ACM2, Пурдье-Линь – Грелл-Дэвени – ACM2, Пурдье-Линь– Грелл 3d – ACM2, WSM6 – Каин-Фритш – ACM2, WSM6 – Грелл-Дэвени – ACM2, Томпсон-Грелл 3d-ACM2, Моррисон – Грелл 3d – ACM2, WDM5 – Грелл-Дэвени – ACM2, WDM6 – Каин-Фритш – ACM2, WDM6 – Беттс- Миллер- Янич – ACM2, WDM6 – Грелл Дэвени – ACM2 и WDM6 – Грелл 3d – ACM2.

В результате проведенных исследований получено, что на станции Дар-эс-Салаам система ансамблевого моделирования осадков, состоящая из 16 членов ансамбля, не получила наилучшую оценку качества прогноза осадков в этот период исследования. Лучшая оценка получена при использовании комбинации схемы параметризации Томпсон – Каин-Фритш – ACM2 затем Кесслер – Грелл 3d – ACM2 с ошибкой прогноза около 2 мм/сутки. Таким образом для прогнозирования осадков на побережье Индийского океана лучше всего использовать несколько областей моделирования с разными комбинациями параметризации.

Далее были проведены и верифицированы численные эксперименты по оценке качества прогноза осадков на 144 часа в период с 08 по 12 апрель 2014 в 06Z.

Среднеквадратические ошибки прогноза количество осадков на станциях Дар-эс-Салаам, Морогоро и Занзибар представлены на рисунке 4.9.

Из рисунка 4.9 видно , что в длинный влажный сезон для станции Дар-эс-Салаам схема ансамблевого прогноза не показала наилучшую оправдываемость прогноза

осадков. На станциях Морогоро и Занзибар наблюдаются такая же картина, как и на станции Дар-эс-Салаам — сравнивая результаты моделирования осадков полученные с помощью схемы ансамблевого прогноза и каждой комбинацией схем параметризации отдельно, можно видеть, что комбинации, состоящие из схемы параметризации конвекции Грелла 3d и ансамблевой Грелла - Дэвени имеют минимальную среднеквадратическую ошибку по сравнению с схемой ансамблевого прогноза, несмотря на тот факт, что на этой станции осадков не очень много было по отношению к количеству осадков на станции Дар-эс-Салаам.

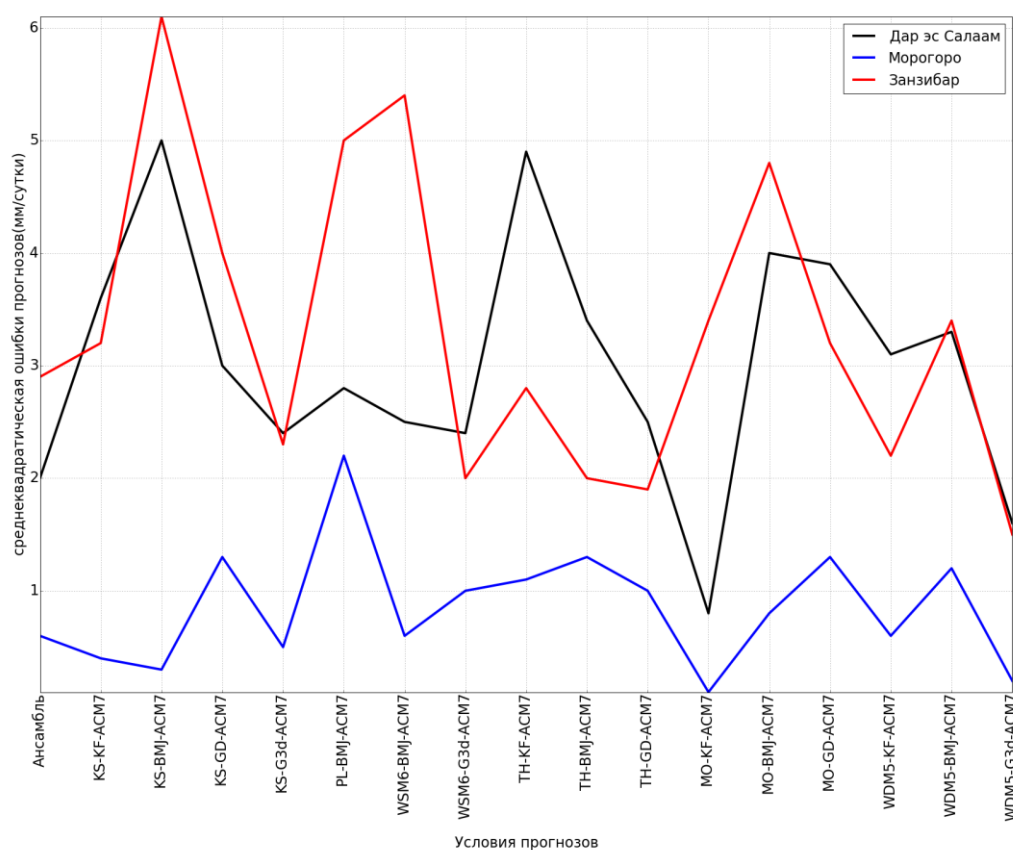


Рисунок 4.9 – Среднеквадратическая ошибки прогноза количество осадков (мм/сутки) при использовании разных комбинации параметризаций и их ансамбля на станциях Дар-эс-Салаам, Морого и Занзибар.

Резюмируя результаты этого этапа исследований, можно сделать вывод о том, что если целью является прогноз экстремального количества осадков, то ансамблевый прогноз не позволяет прогнозировать выпадения экстремального количества осадков. Позволяет прогнозировать только наличие или отсутствие экстремальных осадков. Следовательно, для цели прогнозирования погоды на территории Танзании схему ансамблевого создана путем варьирования схемы параметризации физики лучше не использовать. В дальнейшей будет создана схема ансамблевого осадков путем изменения стартовых точки начальных данных. Таким образом, для учета неточности модели при прогнозировании осадков на этой территории, особенно на побережье Индийского океана, лучше создавать несколько модельных областей и в каждой использовать разные комбинации схем параметризации.

5. Применение фильтр Калмана для уточнения прогноза осадков

Прогнозы с помощью гидродинамической мезомасштабной модели, как правило, имеют систематические и случайные ошибки особенно при прогнозировании такой сложной величины, как осадки. Систематические ошибки в значительной степени, возникают за счет недостаточного разрешения модели, недостаточно точных параметризаций физических процессов, неопределенности в описании взаимодействия с подстилающей поверхностью. Случайные ошибки ещё более трудно преодолеть из-за сложности определения первоначальную причину неточности [76].

В ряде мировых центров прогноза погоды, для повышения точности прогнозов используется статистическая обработка результатов гидродинамического прогноза. Для этого в настоящее время существует разные статистические процедуры в оперативной прогностической практике. Часто используется регрессионный анализ, но они для уменьшения систематических ошибок требуют очень больших объёмов данных [77]. Одним из наиболее успешных методов постпроцессинга является использование статистических подходов, основанных на методах фильтрации Калмана. Разные исследовательские работы рассматривали использование фильтра Калмана для улучшения качества прогнозы температуры и ветра [78-80].

Основываясь на современных подходах, для уточнения прогноза осадков в данном исследовании был применён фильтр Калмана.

Фильтр Калман представляет собой адаптивный метод, который предлагает альтернативное применение стандартных моделей линейной регрессии [81].

Целью данного этапа исследования является улучшение качество прогнозов осадков на территории Танзании, полученных гидродинамическим моделированием, с помощью фильтрации Калмана.

5.1 Системы уравнений фильтра Калмана

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 и результатов прогноза и результатов измерений.

В классическом фильтре Калмана прогностические уравнения это традиционные линейные уравнения регрессии, которые приспособляются к лучшей взаимосвязи между предикторами и предиктатами. Наиболее важной характеристикой фильтра является его рекурсивный характер, то есть процесс повторяется на каждом шаге по времени, используя последнюю апостериорно построенную ковариационную матрицу для того, чтобы генерировать новые оценки моделируемой величины [82].

В отличие от обычного линейной регрессии коэффициенты уравнения фильтра Калмана меняются во времени [83]. Это позволяет рекурсивно

обновлять коэффициенты регрессии, которые адаптируются к изменениям в модели и прогностических величинах. Преимущество использования фильтрации Калмана заключается в том, что при использовании процедуры корректировки прогностических полей не требуется больших объёмов данных.

5.1.1 Прогностические уравнения фильтра Калмана

Известно, что дискретная стохастическая система может быть описана динамической моделью и измерениями. Предположим, что x_k вектор состояния динамической системы, которая является случайным процессом – это прогностическая переменная, которую надо модифицировать с использованием фильтра. z_k – результаты измерений в момент времени t_k . Ошибки (шум) модели системы (ε_k) и результатов измерений (η_k) также являются случайными с нулевым математическим ожиданием.

Цель фильтрации состоит в том, чтобы найти оценку вектора состояния системы x_k , которую обозначают x_k^{opt} , являющуюся функцией ошибочных измерений $z_1 \dots z_k$ и которая минимизирует среднеквадратическую ошибку

$$x_{k+1} = x_k + bx_k + \varepsilon_k = x_k + u_k + \varepsilon_k \quad (5.1)$$

Измерение z_k содержит ошибки η_k .

$$z_k = x_k + \eta_k, \quad (5.2)$$

где ε_k и η_k – случайные ошибки модели и измерения. Они не зависят от времени (от номера итерации k) и друг друга.

u_k — известная величина, которая контролирует эволюцию системы.

$$\overline{E(\varepsilon_k)} = \overline{E(\eta_k)} = \theta \quad \text{среднее значение ошибки}$$

Также известна дисперсия ошибок σ_ε^2 и σ_η^2 , при этом дисперсия не зависит от времени.

На шаге $k+1$, можно предположить, что система описывается согласно 5.1, а измерение $x_k^{opt} + u_k$.

$$x_{k+1}^{opt} = K_{k+1} z_{k+1} + (1 - K_{k+1})(x_{k+1}^{opt} + u_k) \quad (5.3)$$

где K_k — коэффициент Калмана

Коэффициент Калмана выбирается таким образом, что

$$x_{k+1}^{opt} \approx x_{k+1}. \quad (5.4)$$

Из формулы (5.3) следует, что если наблюдения более точные, то больший вклад в результат будет у слагаемого z_{k+1} , в обратном случае большее значение у слагаемого $x_{k+1}^{opt} + u_k$.

Для того чтобы найти K надо минимизировать ошибку

$$e_{k+1} = x_{k+1} - x_{k+1}^{opt} \quad (5.5)$$

Из формул (5.1), (5.2) и (5.3) следует

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= x_{k+1} - K z_{k+1} - (1 - K)(x_k^{opt} + u_k) \\ &= (1 - K)(e_k + \varepsilon_k) - K \eta_{k+1}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

Минимизируя $(5.6) e_{k+1} \rightarrow \min$, используют обычно метод наименьших квадратов

$E(e_{k+1}^2) \rightarrow \min$ и получают

$$E(e_{k+1}^2) = (1-K)^2 (E(e_k^2 + \sigma_\varepsilon^2) + K\sigma_\eta^2), \quad (5.7)$$

но

$$E(\eta_{k+1}) = E(\varepsilon_k) \quad (5.8)$$

следовательно

$$E(\varepsilon_k \eta_{k+1}) = E(e_k \varepsilon_k) = E(e_k \eta_{k+1}) = 0. \quad (5.9)$$

Вводя обозначения

$$\sigma_\varepsilon^2 = E(\varepsilon_k^2), \quad (5.10)$$

$$\sigma_\eta^2 = E(\eta_{k+1}^2),$$

$$E(\eta_{k+1}) = E(\varepsilon_k) = 0$$

Получим окончательную формулу

$$K_{k+1} = \frac{E(e_k^2 + \sigma_\varepsilon^2)}{E(e_k^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\eta^2)} = \frac{E(e_{k+1}^2)}{\sigma_\eta^2} \quad (5.11)$$

Для учёта ошибок прогноза используется следующая процедура фильтрации Калмана:

Известна оценка вектора состояния системы в момент времени t_{k-1} — x_{k-1} . Необходимо получить оценку в момент t_k .

Для этого рассчитывается вектор состояния $x_k^{(-)}$ (априорная оценка) и, базируясь на x_{k-1} и результатах измерений z_k , корректируют оценку в момент t_k , и получают окончательную оценку вектора состояния $x_k^{(+)}$ (апостериорная оценка).

Как правило, фильтр адаптируется к предыдущим значениям для того чтобы вычислить следующие. Предыдущие значения не изменяются.

В матричном виде с использованием ковариационных матриц алгоритм фильтрации формулируется следующим образом:

а) Прогностические уравнения

1. Прогностические уравнения для вектора состояния системы

$$x_k^- = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (5.12)$$

2. Прогностические уравнения для ковариационной матрицы вектора ошибки

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (5.13)$$

б) Система уравнений коррекции

3. Вычисление коэффициента Калмана

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5.14)$$

4. Обновление оценки вектора состояния системы с учетом измерения z_k

$$x_k = x_k^- + K_k(Z_k - Hx_k^-) \quad (5.15)$$

5. Обновление ковариационной матрицы вектора ошибки

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (5.16)$$

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 воздействия,
- H – матрица, определяющая отношение между измерениями и состоянием системы,
- R – ковариационная матрица ошибок измерения, которая определена испытанием измерительных приборов и определением погрешности их измерения,
- Q – матрица ошибок, определение шума процесса является более сложной задачей, так как требуется определить дисперсию процесса, что не всегда возможно. В любом случае, можно подобрать этот параметр для обеспечения требуемого уровня фильтрации,

5.2 Применение фильтра Калмана для улучшения качества прогнозов осадков

Целью данного этапа исследования является применением фильтра Кальмана для улучшения качества прогнозов осадков в Танзании. По этой причине использовалось одномерный линейный фильтр Калмана для корректировки результатов моделирования WRF.

Для решения поставленной цели были проведены численные эксперименты для тех же условий, которые были описаны ранее в главе 2 – в

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 решения системы уравнения 5.12 – 5.16. Самой сложной задачей при использовании одномерно линейной фильтра Калмана является определение ковариационных матриц ошибок измерений и моделирования. Существует два способа определения этих матриц:

- ковариационные матрицы ошибок измерений (R) и моделирования осадков (Q) определяются через дисперсию данных измерений и результатов моделирования,

- второй способ используется в случае недостаточной информации про систему, которую используют для описания процессов. В этой ситуации для определения ковариационной матрицы процесса можно задавать самое большое значения и оценить работу фильтра [84].

В данной работе были использована дисперсия измерений и моделирования в качестве ковариационной матрицы измерений и моделирования, соответственно. Ковариационная матрица рассчитывалась отдельно для короткого и длинного влажного сезонов на станции Дар-эс-Салаам.

- далее были рассчитаны коэффициент Калман, и затем новые измерения добавляются в предыдущие результаты моделирования, что приводит к более точному моделированию количества осадков с учетом ошибки данных измерения;

- зная *a priori* и *a posteriori* приближения количество осадков процедура повторяется с помощью прогностического уравнения или уравнения коррекции.

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

В качестве примера, в таблицах 5.1-5.2 и на рисунке 5.1 представлены результаты расчетов для периода с 08 по 24 апреля 2014 г. и с 15 по 24 декабря 2011г.

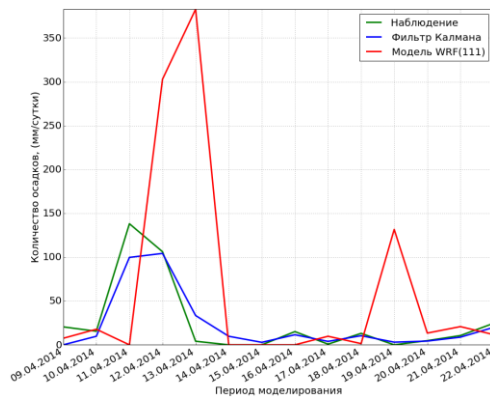
Использование фильтра Калмана во всех численных экспериментах улучшило качество прогноза.

Из таблицы 5.1 следует, что среднеквадратическая ошибка количества осадков на станции Дар эс Салааа при использовании комбинации параметризаций Кесслера – Каина-Фритш – Ёнсей уменьшилось на 88% при использовании фильтра Калмана, а для комбинации Пурдуге -Линь – Беттса - Миллера - Янича – Миллера - Ямады - Янича на 34%. Численные эксперименты пронумерованы согласно таблице 3.2 главы 3.

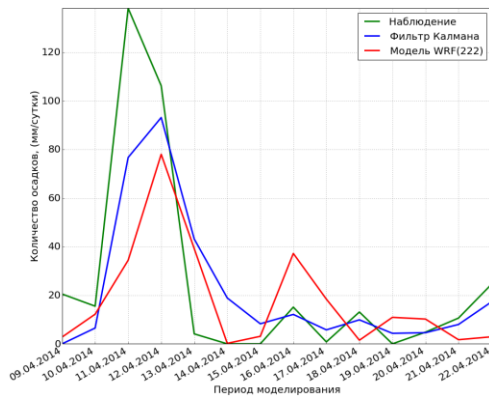
Таблица 5.1 – Среднеквадратическая ошибка и коэффициент детерминации количества осадков при моделировании без фильтра и с фильтром Калмана на станции Дар-эс-Салаам за период с 08 по 24 апреля 2014 г.

Условия прогноза	Эксперименты					
	111	222	237	621	832	857
среднеквадратическая ошибка 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

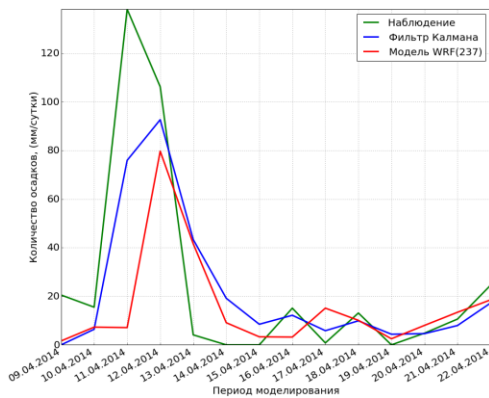
а)



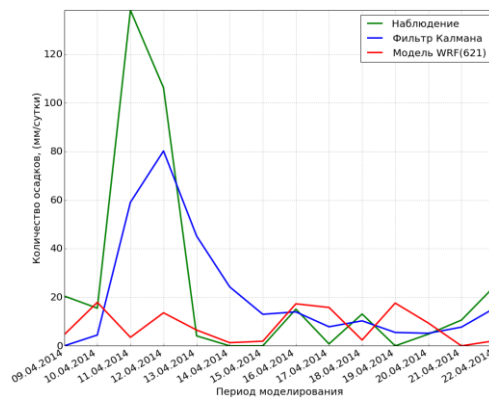
б)



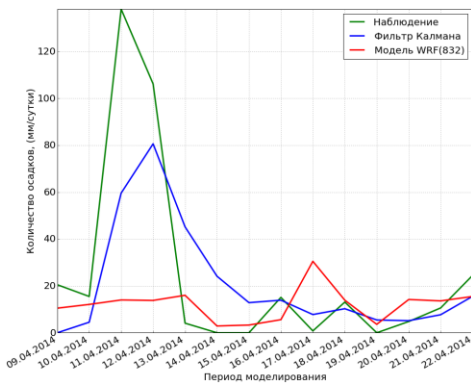
в)



г)



д)



е)

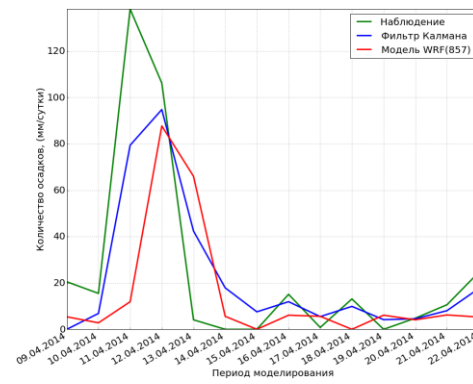


Рисунок 5.1 – Временной ход количества осадков на станции Дар-эс-Салаам по данным наблюдения (зеленый), с использованием фильтра Калмана (синий) и без фильтра Калмана (красный)

Улучшение качества прогноза на 88% было ожидаемо. Из предыдущего анализа был сделан вывод о том, что комбинация параметризаций Кесслера – Каина-Фритш – Ёнсей, а также все комбинации, в которые входит схема параметризации конвекции Каина-Фритша систематически завышают количество осадков и применение фильтрации позволило улучшить результаты моделирования.

Результаты численных экспериментов для второго сезона (таблица 5.2), 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 Пурдье - Линь – Беттса - Миллера - Янича – Миллера - Ямады - Янича (2%), а наименьшее для комбинации Томпсона – Грелла - Девени – Миллера - Ямады - Янича (0.08%).

Таблица 5.2 – Среднеквадратическая ошибка и коэффициент детерминации прогностического количества осадков без фильтра и с фильтром Калмана на станции Дар-эс-Салаам за период с 15 по 24 декабря 2011г.

Условия прогноза	Эксперименты					
	111	222	237	621	832	857
среднеквадратическая ошибка количества осадков						
Без фильтра Калмана	76,1	75,3	67,0	75,6	69,0	46,0
С фильтром Калмана	48,5	60,3	44,0	63,3	46,1	35,3
Коэффициент детерминация, %						
Без фильтра Калмана	31	97	74	52	97	97
С фильтром Калмана	0,99	99	76	99	98	99

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.

Выводы

Были разработаны методы использования нестандартного фильтра Калмана для учета неточности модели и улучшения качества прогноза осадков.

В данной работе принято, что ковариационная матрица ошибки измерений и ковариационные матрицы не постоянна, а была определена отдельно в зависимости от схемы параметризаций.

Применение фильтра Калмана улучшило качество прогнозов осадков.

Для дальнейшего усиления эффекта от фильтрации Калман следует перейти к двумерному фильтру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами диссертационной исследования являются:

Результаты статистического анализа пространственно- временной структуры полей осадков показывают, что осадки на территории Танзания распределяются неравномерно и возникают за счет разных физических механизмов.

Результаты процедуры кластеризации территории Танзании по данным месячных и сезонных сумм осадков, при $K=4$ и также при $K=6$ показали, что четко выделение не произошло, но с учетом климатических и географические особенности Танзании выделяется 4 регионы.

Были проведены численные эксперименты с различной комбинацией схем параметризации физических процессов и сделаны выводы об основной роли схем параметризации конвекции, и о не существенном влиянии на качество прогноза осадков в этом регионе Танзании схемы параметризации пограничного слоя атмосферы и микрофизики облаков.

Было установлено, что для хорошего гидродинамического прогноза осадков на территории Танзании лучше использовать вложенные сетки и разные наборы параметризации в разных регионах.

Были установлено, что на данной территории лучше использовать схему ансамблевого прогноза осадков; члены ансамбля основанные на использования схемы Беттса Миллера Янича (BMJ) дают прогноз осадков близкий к наблюдениям.

Можно улучшить качество прогноза с использованием двухмерного фильтра Калмана.

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 — Пурдуге Линь - Грелла Дэвени -АСМ2.

В период с октября по декабрь; в первом регионе -комбинация параметризаций Пурдуге Линь - Беттса Миллера Янича - Миллера Ямады Янича; в втором и четвертом регионах -комбинация параметризации — Пурдуге Линь - Грелла Дэвени -АСМ2; в третьем -комбинация параметризации Томпсона -G3d-АСМ2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kumar S, Routray A, Chauhan R and Panda J (2007). Impact of parameterization schemes and 3DVAR data assimilation for simulation of heavy rainfall events along West Coast of India with WRF modeling system. *International Journal of Earth and Atmospheric Science*, 01(1): 18-34.
2. Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi SB, Rao TN, Radhakrishna B and Rajasekhar M (2010). Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over southeast India. *Annales Geophysicae*, 28: 603-619.
3. Skamarock, W. C., and J. B. Klemp (2008), A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather and forecasting applications, *J. Comput. Phys.*, 227, 3465 – 3485, doi: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
4. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers (2005), A description of the Advanced Research WRF version 2, Tech. Note TN-468+STR, 88 pp., Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
5. Morrison, H., Milbrandt, J., 2011. Comparison of two-moment bulk microphysics schemes in idealized supercell thunderstorm simulations. *Mon. Weather Rev.* 139, 1103–1130.
6. Ogallo, L.J. (1982) The Statistical Prediction of East African Rainfalls Using Quasi-Biennial Oscillation Phases Information. *Kenya Journal of Science and Technology*, A3, 43-54.
7. Ntale, H.E. (2003) Prediction of East Africa Seasonal Rainfall Using Simplex Canonical Correlation Analysis. *Journal of Climate*, 16, 2105-2112. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2105:POEASR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2105:POEASR>2.0.CO;2).
8. Ваниха, П.Ф. Моделирование эволюции тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана с использованием ассимиляции данных

[Текст] // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30, СПб., РГГМУ, 2009.

9. Хабелва Х.А. Исследование влияние параметров подстилающей поверхности на качество гидродинамического прогноза на примере Восточной Африки [Текст] // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30, СПб., РГГМУ, 2008.

10. Барашкова, К. К. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование [Текст]/К. К. Барашкова, Л.И. Кижнер, И.В. Кужевская— Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – с. 170-174.

11. Zhang X (2007) Adapting the Weather Research and Forecasting model for simulations of regional climate of East Africa. PhD Thesis, North CarolinaStateUniversity.

12. Hohenegger, C., Schaer, C., 2007. Atmospheric predictability at synoptic versus cloud resolving scales. Bull. Am. Meteorol. Soc. 88, 1783–1793.

13. Davolio, S., Mastrangelo, D., Miglietta, M.M., Drofa, O., Buzzi, A., Malguzzi, P., 2009. High resolution simulations of a flash flood near Venice. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1671–1678.

14. Weisman, M.L., Davies, C., Wang, W., Manning, K.W., Klemp, J.B., 2008. Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. Weather Forecast. 23, 407–437.

15. Miglietta, M.M., Rotunno, R., 2012. Application of theory to observed cases of orographically forced convective rainfall. Mon. Weather Rev. 140, 3039–3053.

16. Moore N, Torbick N, Lofgren B, Wang J, Pijanowski B, Andresen J, Kim DY, Olson J (2010) Adapting MODIS-derived LAI and fractional cover into the RAMS in East Africa. Int J Climatol 30:1954–1969. doi:10.1002/joc.2011.

17. Kain. J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 43. 170-181. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
18. Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 1779-1800.
19. Anyah RO, Semazzi FHM, Xie L (2006) Simulated physical mechanisms associated with multiscale climate variability over Lake Victoria Basin in East Africa. *Mon Weather Rev* 134:3588–3609.
20. Anyah RO, Semazzi FHM (2004) Simulation of the sensitivity of Lake VictoriaBasin climate to lake surface temperature. *Theor Appl Climatol* 79:55–69. doi:10.1007/s00704-004-0057-4.
21. Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, Development of a second generation regional climate model (RegCM2), I, Boundary-layer and radiative transfer processes, *Mon. Weather Rev.*, 121, 2794-2813, 1993b.
22. Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, Development of a secondgeneration regional climate model (RegCM2), II, Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, *Mort. Weather Rev.*, 121, 2814-2832, 1993c.
23. Anyah RO, Semazzi FHM (2007) Variability of East African rainfall based on multiyear RegCM3 simulations. *Int J Climatol* 27:357–371.
24. Sun LQ, Semazzi F, Giorgi F, Ogallo L (1999a) Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa, 1. Simulation of the short rains of 1988. *J Geophys Res* 104:6529–6548.
25. Sun LQ, Semazzi F, Giorgi F, Ogallo L (1999b) Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa, 2. Simulation of interannual variability of short rains. *J Geophys Res* 104:6549–6562.

26. Grell. G.A. (1993) Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. Monthly Weather Re-view. 121. 764-787.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2).
27. Emanuel, K. A., 2001: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. J. Atmos. Sci., 48, 2313-2335.
28. Ogallo L. J. The persistence of the monthly rainfall over East Africa. Institute for meteorological training and research Nairobi// Research Report—1982.-№ 3/82, august.
29. Okoola, R. E. (1998). Spatial evolutions of the active convective patterns across the equatorial eastern Africa region during northern hemisphere spring season using Outgoing Longwave Radiation records. Meteorology and Atmospheric Physics, 66, 51-63.
30. Nicholson, S. E. (2008). A revised view of the West African monsoon: in the ITCZ really necessary? Presentation at the Conference on African Droughts, 2nd -6 th June 2008, ICTP, Trieste, Italy.
31. Odiyo J. O. Application of principal component analysis in delineation of Tanzania into homogeneous rainfall regions: M.Sc. Thesis-University of Dar es salaam, 1994.-155p.
32. Ogallo L. J. Interannual variability of East African Monsoon wind system and their impacts on East African climate// WMO/TD-No. 619.-1994.-P. 99 104.
33. Vinay V. Mistry., Declan Conway. Remote sensing of East African rainfall and relationships with fluctuations in levels of Lake Victoria// J. Climatol.-2003 .-23 .-P. 67-89.
34. The Global Historical Climatology Network. [Электронныйресурс] // Режимдоступа:<https://www.ncdc.noaa.gov/dataaccess/land-based-station-data/land->

[based-Zatasets/global-historical-climatology-etwork-ghcn](#).(датаобращения11.09.2014).

35. Tryon, R. (1939). Cluster analysis. New York: McGraw Hill.
37. Skamarock, C. W., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+SR, 113 pp.
38. Wang, W., C. Bruyere, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, X. Zang, J. Beezley, J. Coen, and J. Mandel, 2011: ARW Version Modeling System's User Guide. NCAR, 202 pp.
39. Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, Mon. Wea. Rev., 130, 2088–2097.
40. Arakawa, A. and Lamb, V. R., 1977: Computational design of basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. Meth. Comp. Phys., 17, 173–265.
41. Белов, П. Н. Численные методы прогноза погоды [Текст]/П. Н. Белов, Е.П. Борисенков, Б.Д. Панин. – СПб. Гидрометиздат, 1989. – 376 с.
42. Kessler, E. (1969), On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation, Meteor. Monogr., No. 32, 84 pp., Am. Meteorol. Soc., Boston, Massachussetts.
43. Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville (1983), Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, J. Appl. Meteorol., 22, 1065 – 1092.
44. Hong. S.Y. and Lim. J.O.J. (2006) The WRF Single-Moment Microphysics Scheme (WSM6). Journal of the Korean Meteorological Society. 42. 129-151.
45. Thompson, G., R. M. Rasmussen, and K. Manning (2004), Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part I: Description and sensitivity analysis, Mon. Weather Rev., 132, 519 – 542.

46. Morrison H. et al. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description. // J. Atmos. Sci., 2005, Vol. 62, No. 6. P. 1665—1677.
47. Morrison H. and Pinto J.O. Intercomparison of bulk microphysics schemes in mesoscale simulations of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds. // Mon. Wea. Rev., 2006, Vol. 134, No. 7. P. 1880—1900.
48. Lim KSS, Hong SY (2010) Development of an effective doublemoment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models. Mon Weather Rev 138:1587–1612.
49. K.-S. S. Lim and S.-Y. Hong, Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models, Monthly Weather Review, vol. 138, pp. 1587–1612, 2010.
50. Kain. J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. Journal of Climate and Applied Meteor-ology. 43. 170-181.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
51. Betts. A.K. and Miller. M.J. (1993) The Betts-Miller Scheme. In: Emmanuel. K.A. and Raymonds. D.J.. Eds.. Repre-sentation of Cumulus Convection in Numerical. American Meteorological Society. Boston. 246.
52. Grell. G.A. and Devenyi. D.A. (2002) Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques. Geophysical Research Letters. 29. 38-1-38-4.
53. Grell. G.A. (1993) Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. Monthly Weather Re-view. 121. 764-787.
[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2).

54. Hong, S.-Y., Noh, Y. and Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341. <http://dx.doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
55. Mellor G.L. and Yamada T.A. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Atmos. Sci.*, 1974, Vol. 31, No. 31. P. 1791—1806.
56. Pleim, J.E. (2007) A Combined Local and Non-Local Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1383-1395. <http://dx.doi.org/10.1175/JAM2539.1>.
57. Tewari, M.F., Chen, W., Wang, J., Dudhia, M.A., LeMone, K., Mitchell, M.E., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca, R.H. (2004) Implementation and Verification of the Unified NOAA Land Surface Model in the WRF Model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting. 16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 11-15.
58. Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Meso- scale Two-Dimensional Model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3104. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2).
59. Mlawer E, Taubman S, Brown P, Iacono M and Clough S (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *Journal of Geophysical Research*, 102: 16663-16682.
62. National Centers for Atmospheric Research's (NCAR) (2014) CSIL Research Data Archive. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/?hash=access/>.
63. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития// Институт вычислительной математики РАН. – 2016. – С. 5–32.

64. TheTRMMdataset[Электронный ресурс] // Режим доступа:http://daac.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM/01_Data_Products/02_Gridded/index.html. (дата обращения 02.05.2015).
65. Ситников И.Г., Полякова И.В. Практическое применение ансамблей гидродинамических прогнозов метеорологических полей // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 8. – С. 113–118.
66. Мулавьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Кизначеева В.Д. Использование ансамблей в прогнозе метеорологических полей // Метеорология и гидрология –2005. –С.5–17.
67. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU// Метеорология и гидрология. – 2010. – №1. – С. 5–17.
68. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.
69. Муравьев А.В, Круглова Е.Н, Куликова И.А. Ансамблевый долгосрочный прогноз метеорологических условий с недельной дискретизацией: технология и методологические вопросы //Гидрометцентр России. – 2012.
70. Shkolnik, I., Pavlova, T., Efimov, S. et al. Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario// Clim. Dyn. – 2017. – pp.1-16 – doi:10.1007/00382-017-3600-6.
71. Talagrand O., Vautraud R., Strauss B. Evaluation of probabilistic prediction systems // Proceedings of the workshop on predictability. – ECMWF, 1998. –P.1–25.

72. Stanski, H.R., Wilson, L.J., Burrows, R., 1989: Survey of common verification methods in meteorology. World Weather Watch Tech. Rep. 8, WMO/TD No. 358, WMO, Geneva, Switzerland, 114 pp.
73. Wilks, D.S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Chapter 7.4. Academic Press, San Diego. 467 pp.
74. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24–34.
75. Hsu W.-R., Murphy A.H. The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts // Int. J. Forecasting. – 1986. – Vol. 2, Iss. 3. – P. 285–293.
76. Jung, T., Tompkins, A.M., Rodwell, M.J., 2005. Some aspects of systematic error in the ECMWF model. Atmos. Sci. Let. 6, 133–139.
77. Kalman, R.E., 1960: A new approach to linear filtering and prediction problems, Trans. ASME, Ser. D, 82, 35-45.
78. Kalnay, E., 2002: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 341.
79. Kalman, R.E., and R.S. Bucy, 1961: New results in linear filtering and prediction problems, Trans. ASME, Ser. D, 83, 95-108.
80. Kalnay, E., 2002: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 341.
81. Persson, A., 1990: Kalman filtering a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts. ECMWF Newsletter June 1990.
49. Priestley, M.B., 1981. Spectral Analysis and Time Series. Academic Press, pp. 807–815.

82. Dragulanescu, L., 1993: Application des filtres Kalman pour ajuster les temperatures prognosees avec un modele numerique, Meteor. Hydrol., 23, 11-14.
83. Simonsen, C., 1991. Self adaptive model output statistics based on Kalman filtering. Lectures and papers presented at the WMO Training Workshop on the Interpretation of NWP Products in Terms of Local Weather Phenomena and their Verification, Wageningen, the Netherlands, WMO TD 421. XX-33–XX-37.
84. G. Welch and G. Bishop. 1995. "An Introduction to the Kalman Filter," University of North Carolina, Department of Computer Science, TR 95-041. [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (дата обращения 18.07.2016).