

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра метеорологических прогнозов ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (магистерская работа) На тему «Сравнительные исследования моделей WRF и GFS для прогноза осадков в Йемене» Исполнитель <u>Аль Хемяри Салах Аддин Галеб Ахмед , МАП-М19-1</u> (фамилия, имя, отчество)

> (ученая степень, ученое звание) Ольга Георгиевна Анискина (фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент

Ольга Георгиевна Анискина (фамилия, имя, отчество)

«<u>&</u>» июня 2021г.

Санкт-Петербург 2021

СокращенияЗ
Введение4
Глава 1 Климат Йемена6
1.1 Географическое положение Йемена6
1.2 Орография7
1.3 Климат Йемена 8
1.3.1 Температура воздуха 10
1.3.2 Ветер 11
1.3.3 Осадки 11
2 Мезомасштабная гидродинамическая модель WRF-ARW 19
2.1 Исходные уравнения, используемые в модели WRF-ARW 30
2.2 Метод численного решения уравнений в модели WRF-ARW 33
3 Гидродинамической прогноз осадков в Йемене 35
3.1 Описание область исследования 35
3.2 Использование данных для верификации 37
3.3 Описание и анализ различных параметров
3.4 Использование вложенной сетки 69
4. Глобальная система прогнозирования (GFS) 88
4.1 Описание модели GFS 88
4.2 Использование GFS модель для прогноза осадков
Рекомендации 103
Список использованных источников 104
Приложение А 106
Приложение В 106
Приложение С 107
Приложение D 108
Приложение Е 109
Приложение F 111
Приложение G 113

Содержание

Сокращения

C.III.	Северная Широта
В.Д.	Восточная Долгота
МΦ	Микрофизика
ЧПП	Численный Прогноз Погоды
ПК	Параметризация конвекции
ARW	Advanced Research
WRF	Weather Research & Forecasting Model
WRF-DA	Data Assimilation
GFS	Глобальная система прогнозирования
NOAA	National Center for Atmospheric Research
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	Национальный центр прогнозирования
ra_lw_physics	Длинноволновая радиация
ra_sw_physics	Коротковолновая радиация
sf_sfclay_physic	Поверхностный слой
sf_surface_physics	Процессы на подстилающей поверхности
bl_pbl_physics	Планетарный пограничный слой
cu_physics	Конвекция
FSL	Forecast System Laboratory
AFWA	Air Force Weather Agency
NRL	Naval Research Laboratory

Введение

Одним из важных явлений в Йемене, являются проливные дожди, вызывающие наводнения и ливневые потоки, уносящие жизни многих людей и приводящие к сносу зданий и собственности. Сильные дожди нанесли ущерб домам, сельскохозяйственным культурам, скоту, продовольствию и частным лицам.

Согласно отчетам Организации Объединенных Наций [https://news.un.org/ar/story/2020/08/1060162], в прошлом 2020 году и всего за 3 месяца более 300000 человек были перемещены в Йемене из-за проливных дождей и наводнений, которые нанесли ущерб домам, сельскохозяйственным культурам, скоту, продовольственным товарам и частной собственности.

На сельскохозяйственный сектор приходится около 16,5% общего национального дохода страны, так как пахотная площадь в Йеменской Республике составляет 1539006 га, а посевная площадь составляет около 1241387 га [https://yemen-nic.info/agri/agrin_yemen/], тем более что инфраструктура страны слабая и из этого следует важность прогнозирования осадков для:

- Для защиты жизни и имущества от опасностей внезапных наводнений.

- Принятия мер предосторожности для фермеров в

сельскохозяйственных районах, для защиты урожая от повреждений.

- Предварительное планирование для оптимального использования воды в результате ожидаемых осадков и и правильного управления.

Целью диссертационной работы является - улучшение качество прогноза осадков в Йемене.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы следующие задачи:

- исследование осадков Иемена, в том числе по реальным данным, полученных с метеорологических станций.

- создание версии модели WRF-ARW для региона Йемена, проведение численных экспериментов, верификация модели.

- исследование результатов прогноза осадков моделью GFS.

- сравнение, анализ и изучение результатов, полученных с помощью моделей WRF-ARW и GFS.

- выработка рекомендаций для повышение точности будущих прогнозов осадков в Йемене.

Диссертация состоит из четырех глав:

В первой главе этого исследования описано географические характеристики Йемена, осадки и факторы, влияющие на осадки, а также проанализированы данные об осадках за предыдущие годы.

Во второй главе была представлена Мезомасштабная гидродинамическая модель WRF-ARW и использованные уравнения.

В третьей главе описаны проведённые численные эксперименты с использованием модели WRF-ARW. Все расчеты производились на компьютере Российского Государственного Гидрометеорологического университета (РГГМУ).

В четвертой главе был проведены данные о модели GFS, осуществлён анализ результатов моделирования осадков и сравнение прогнозов с результатами наблюдаемых осадков на станциях и сравнении с результатами модели WRF-ARW.

В заключении сформулированы выводы и рекомендации.

1 Климат Йемена

В этой главе дается краткое описание климата Йемена в целом, с акцентом на осадки и факторы, влияющие на них.

Факторы, которые определяют количество осадков, пространственно различаются из-за разнообразия ландшафтов в Йемене. В Йемене присутствуют регионы пустынь с большими перепадами температуры воздуха зимой и летом и малым количеством осадков, относительно холодные горные регионы и теплые прибрежные районы.

1.1 Географическое положение Йемена

Йемен расположен на юго-западе азиатского континента на южной оконечности Аравийского полуострова между 12-19⁰ с.ш. и 42-53⁰ в. д. Тропический регион, в котором расположен Йемен, характеризуется сухим климатом и без присутствия контрастов в ландшафте и окружающих бы водоемов OH превратился В пустыню, окруженную жаркими тропическими пустынями, как большинство стран Аравийского полуострова. Два раза в год солнце перпендикулярно йеменским землям. Первый раз - с видимым движением солнца к Тропику Рака - это происходит в мае. И второй раз - во время возвращения солнца к экватору - и это происходит в конце июля. В период с мая по июль температура воздуха в Йемене значительно повышается.

Площадь Йемена 527,970 км². Йемен имеет границы: на севере с Королевством Саудовская Аравия (1458 км), на северо-востоке с Оманом (288 км). Йемен омывается морями и имеет протяжённую береговую линию вдоль Аденского залива на северо-востоке, Аравийского моря на юге и Красного моря на западе.

1.2 Орография

Йемен отличается наличием различного ландшафта, включая горы, плато, побережья, пустыни и острова, и в соответствии с этим разнообразием Йемен был разделен на три основных географических региона, а именно

• Район прибрежных равнин и островов: он простирается вдоль побережья Йемена на юге и западе страны, где его пересекают горы и плато, которые непосредственно выходят к морю .Прибрежный равнинный регион характеризуется жарким климатом в течение всего года с небольшими дождями (50-100 мм в год), но в этом районе есть много долин, в которых наблюдаются бурные горные потоки, возникающие в результате выпадения дождя в горах .В территориальных водах Йемена более 180 островов со своим ландшафтом, климатом и окружающей средой, и они расположены между Красным и Аравийским морями.

• Горный регион нагорья простирается от крайних северных границ Йемена до крайнего юга. Этот регион подвергся тектоническим движениям, которые привели к крупным и незначительным трещинам, некоторые из которых параллельны Красному морю, а другие – параллельны Аденскому заливу. В результате образовались плато, ограниченные горными бассейнами, которые называются низинами или полями. Горы этого региона являются самыми высокими на Аравийском полуострове, поскольку их средняя высота превышает 2000 метров, а их вершины достигают более 3500 метров, а самая высокая вершина (3666 метров) находится в Джабаль ан-Наби Шуайб и является самой высокой вершиной на Аравийском полуострове. Водораздел проходит в этих горах, где вода спускается через ряд долин на востоке, западе и юге и впадает в Красное море, Аденский залив и Аравийское море.

• Пустынный регион (Руб эль-Хали): это район песчаных пустынь, практически лишенный растительности, за исключением участков, на которые попадает вода, стекающая с прилегающих гор. Высоты поверхности

здесь колеблется от 500 до 1000 метров над уровнем моря и непрерывно спускается вниз. Климат здесь суровый, характеризуется высокой температурой, большим температурным диапазоном, редкими дождями и низкой влажностью, и влияет на восточные регионы с песчаными ветрами.



5 1

[https://www.nationsonline.org/oneworld/map/yemen-topographic-map.htm]

1.3 Климат Йемена

Йемен выходит на два моря: Красное море и Арабское море, но климат Йемена не сильно выиграл от морских характеристик, за исключением повышения уровня влажности воздуха на побережьях и модификаций некоторых характеристик ветра.

Осадки выпадают в Йемене в два сезона: первый сезон весной (март апрель) и второй сезон летом (июль - август), который является более дождливым сезоном, чем весенний, и количество осадков, выпадающих в Йемене, соответственно варьируется. В пространственном отношении самое большое количество осадков выпадает на юго-западных высокогорьях, где количество выпадающих здесь осадков колеблется между 600-1500 мм/год.

На западном побережье осадков меньше, несмотря на то, что на него воздействует юго-западный муссон Индийского океана, пересекающего Красное море, из-за отсутствия влияния рельефа. Среднегодовое количество осадков увеличивается с высотой от 50 мм на побережье до примерно 1000 мм на склонах гор, обращенных к Красному морю.

Положение на южном и восточном побережьях страны не отличается от западного по количеству осадков, которое составляет около 50 мм в год. Причина этого заключается в нескольких факторах, наиболее важными из которых являются то, что направление движения влажных ветров происходит вдоль побережья, не проникая вглубь суши. Следовательно, его влияние очень мало и поэтому осадки не имеют большого экономического значения.

Что касается температуры, то восточная и западная равнины характеризуются высокими температурами воздуха, которые летом достигают 42 ° C и опускаются до 25 ° C. Значения температуры постепенно снижаются с увеличением высоты, так что температура достигает максимум 33 °C и минимум 20 °C. Зимой самые низкие значения температуры воздуха на высокогорье достигают почти нуля градусов, а зимой 1986 года нашей эры температура в Дхамаре упала до -12 ° C.

Что касается влажности, она высока на прибрежных равнинах, достигая 80% и более, в то время как при продвижении вглубь страны (в район пустынь) достигает самого низкого уровня 15%.

Зимой господствуют сухие северо-восточные ветры, а летом - дождливый юго-западный муссон.

Климат летом:

Солнце перпендикулярно тропику Рака, и температура повышается, но температура варьируется от одного региона к другому.

Средняя температура на морских побережьях достигает 35 °C, на высоте 3500 метров над уровнем моря достигает 19 °C, а во внутренних регионах страны - 40 °C.

Относительная влажность увеличивается в прибрежных районах с 60% до 70%, например, в провинциях Аден и Ходейда.

В высокогорьях (в районе столицы Сана) влажность от 35% до 60%.

Во внутренних регионах, таких как Сэйюн, относительная влажность меняется от 50% до 77%.

Область низкого давления сосредоточена над Аравийским полуостровом, а область высокого давления преобладает над водоемами (Индийский океан).

Юго-западный муссон поставляет влагу (водяной пар) из Красного моря и с муссоном связаны осадки в горных регионах станы.

Климат зимой:

Солнце перемещается вдоль тропика Козерога и температура воздуха уменьшается. В прибрежных районах она достигает 25 °C, в высокогорьях – отрицательных значений, а во внутренних районах 11 °C.

Область высокого давления сосредоточена над Аравийским полуостровом.

Северо-восточные ветры преобладают на востоке страны (провинции Аль-Махра и Хадрамаут) после того, как эти воздушные массы пересекают Арабский залив, они насыщаются водяным паром и осадки выпадают в восточных регионах, но выпадение этих осадков характеризуется неравномерностью.

1.3.1 Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха на берегу Красного моря составляет 29 °C и уменьшается к востоку, достигая значений 18-19 °C на высоте 2500, в то время как в Марибе она на высоте 1000 метров поднимается до 30°C.

Средняя годовая температура в Адене составляет 28,8 ° C, а в Райане - 27 ° C.

1.3.2 Ветер

Сухие северо-восточные ветра преобладают зимой, а юго-западные муссоны дождливым летом. Источник муссонов в южных океанах, особенно в Индийском.

Летом над Йеменом господствуют муссоны, приходящие из Западной Африки. Проходя через Судан и плато Абиссиния (Эфиопия), воздушные массы спускаются с горных склонов, происходит конденсация и наблюдаются значительные осадки. При своём дальнейшем движении эти воздушные массы практически сухие, но, пересекая Красное море, воздушные массы снова набирают влагу, которая приносит дожди в районы городов Ибб и Таиз, в которых выпадает наибольшее в Йемене количество осадков и очень часты грозы. Вглубь Аравийского полуострова влажные воздушные массы не проникают из-за высоких горных преград.

Сильные дожди, связанные с муссонами, продолжаются с июня по сентябрь. По окончанию летнего сезона (зимой) ветры меняют свое направление – с внутренних районов к побережью, принося холодные воздушные массы – возможен град и снег.

1.3.3 Осадки

В Йемене отмечают два сезона:

Первый - в апреле (весна), когда количество осадков небольшое.

Второй - июль и август (лето), самый дождливый сезон.

Что касается засушливого периода, то это поздняя осень и зима, но иногда небольшой зимний дождь выпадает на прибрежной полосе Красного моря от Аль-Худайды на юге до Саудовской Аравии на севере. Из-за повышения температуры, а также встречи северных воздушных масс с более холодными южными воздушными массами увеличивается вероятность конденсации и выпадения дождя.

Дождь также иногда выпадает зимой из-за северо-восточных муссонов. Немногочисленные и ограниченные дожди выпадают в виде местных ливней, но в исключительных случаях сильные дожди могут наблюдаться в конце сезона зимних муссонов.

Географическое распределение дождя и факторов, это определяющих.

Согласно географическому распределению выделяют три основных зоны осадков:

Первый регион - это районы на севере Йемена к западу от города Саада, где находится высокогорный кластер, но там нет необходимых станций мониторинга, а количество осадков составляет не менее 400 мм в год и может увеличиться до 600 мм

Вторая зона - это районы, которые сосредоточены в центральном Йемене (города Хаджа и Аль-Махвит), где годовое количество осадков составляет 800 мм. Осадки в этом регионе связаны с влиянием гор, с которых спускаются воздушные массы к морскому побережью.

Третий регион выделяют на юге Йемена (мухафазы Таиз и Ибб) и здесь количество осадков колеблется от 600 до 1200 мм, а в мухафазе Ибб оно повышается до 2400 мм и редко опускается до 1000 мм. Направление воздушного потока в сторону Красного и Арабского морей, наличие больших долин и высота орографии - всё это факторы, которые способствуют увеличению количества осадков. Дожди в этих районах представляют собой самые сильные дожди в Йемене, в то время как в остальных частях Йемена дождей мало и их количество не превышает 500 мм/год, а обычно и намного меньше 300 мм. В прибрежных районах количество осадков меньше 50 мм, а в восточной пустыне не превышает 100 мм.

В районе Сана - Саада количество осадков обычно не превышает 300-400 мм. Причина этого снижения связана с относительной удаленностью от

морей и наличием высоких горных преград, окружающих регион с запада и юга.

Причины засухи в зимний сезон.

Одна из этих причин - отступление внутритропической зоны конвергенции с видимым движением Солнца к югу от экватора, поэтому его влияние отступает от Йемена и соседних регионов.

Кроме того, центры высокого давления усиливаются на севере экватора, посылая сухие пустынные воздушные массы к центрам низкого давления, расположенным в центральной Африке и на юге к экватору.

В Йемене локальные центры высокого давления сконцентрированы из-за подъема и сильнейшего холода в соседних регионах, что снижает вероятность дождя.

Из данных об осадках, которые были получили из Национального центра метеорологии в Йемене, для четырех метеорологических станций в четырех разных городах, а именно Сана, Таиз, Ибб и Махвит) ясно, что количество осадков варьируется от одного города к другому в зависимости от географического положения города и других факторов, влияющих на осадки, о которых говорили ранее, но все они согласны с небольшими различиями в дате выпадения осадков, поскольку среднемесячное количество осадков, которое было рассчитано в августе (летом) является самым высоким на всех четырех станциях и почти отсутствует в январе и декабре (зимой), и годовой ход количества осадков, представленный на рисунках 1.2-1.5, иллюстрируют это.



Рисунок 1.2 – Среднемесячное количество осадков в г.Ибб за период 2003-2013 гг.



Рисунок 1.3 – Среднемесячное количество осадков в г.Таиз за период 2003-2013 гг.



Рисунок 1.4 – Среднемесячное количество осадков в г.Сана за период 2003-

2013 гг



Рисунок 1.5 – Среднемесячное количество осадков в г.Махвит за период 2003-2013 гг

В таблицах 1.1 – 1.4 показано суммарное количество осадков за месяц на каждой станции за несколько лет.

Таблица 1.1 – Месячные суммы количества осадков в г. Ибб за период 2003-2013 гг.

Station:	IBB									Latitude:		14 00\	N
WMO Index:	41452									Longitude	2:	44 20\	E
Year:	2013-2003	Sum	nmary of M	lonthly Tot	al Precipit	ation 2003-	-2013			Elevation		1929	m
Element													
	январ	Февраль	марта	апрель	Май	июнь	июль	август	сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
2003	0	19,1	34,5	118,8	34,8	254,8	126	255,1	100,3	30,7	1	3,4	
2004	22,6	0	14	209,3	64,6	108,1	202,2	269,7	117,2	39,7	26,9	0	
2005	0	0	38,1	72,1	138,2	213,4	230,7	305,2	126,6	24,7	0	0	
2006	0	0	11,1	92,6	220	214,3	206,5	260,3	174	24,8	59,4	16,2	
2007	0,3	34,2	46,4	113,7	160,4	227,9	309,2	244,1	219,6	47,2	0,01	0	
2008	9,4	0	46,4	16,3	197,8	104,7	200,2	216,3	82,7	139,2	5,8	0,1	
2009	0	0	8,2	77,6	108,5	261,7	189,9	317,91	65,5	33,61	0	26,6	
2010	5,2	27,1	52,9	125,3	151,6	163	301	311,3	155,7	41,2	0	3	
2011	2,2	0	16,2	116,7	247,1	228,9	146	219,4	157,5	2,6	40,4	0	
2012	0	0	20,2	101,5	62,8	169,3	171,6	129,5	115,1	14,5	0	0	
2013	0	0	56,4	67,7	286,4	73,9	69,6	213,7	152,2	91,6	49,7	0	

Таблица 1.2 – Месячные суммы количества осадков в г. Таиз за период 2003-

2013 гг.

Station:	TAIZ									Latitude:		13 41N	
WMO Index:	41466									Longitude	2	44 8E	
Year:	2003-2013		Su	mmary of I	Monthly To	otal Precipi	tation 200	3-2013		Elevation		1385	m
Element													
	январ	Февраль	марта	апрель	Май	июнь	июль	август	сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
2003	0	3	25,6	46,1	118,3	114,9	57,9	149,3	164,6	8	22,6	26,8	
2004	0	0	54,3	160	65,3	83,1	106,1	114,9	150	51	0	0,2	
2005	1,4	0	36,4	38,9	116,8	28,9	72,2	264,3	85,8	0,5	16,4	0	
2006	0	36,2	40,3	27,8	81,4	66,8	40,2	115	54,7	15,5	5,3	10,7	
2007	2,1	4,6	23,1	30,9	95	63,3	80,2	78,5	49,1	14,6	6,2	0	
2008	0	0	0	0	61,8	63,4	65,9	58,4	74,4	49,9	7,3	0,4	
2009	0	0	3, 2	42,3	38	99,6	38,9	116	57	59,9	6,3	23,3	
2010	0	50,7	85,2	54,1	181,9	43,5	38,7	109,4	27,4	69,6	0	0	
2011	0,2	0	0	43,4	103,6	66,9	36,2	65,4	70	19,8	26,2	0	
2012	0	0	4	74,5	50,5	98,7	68,7	105,4	39,6	8,3	26,22	0	
2013	0	0,4	42,8	8,1	105,2	62,3	31,7	87,1	115,9	24,6	26,22	0	

	Station:		SANA'A									Latitude:		15 31N	
	WMO Index: 41404											Longitude		44 11E	
	Year:		2003-2013	303-2013 Summary of Monthly Total Precipitation 2003-2013										2190	m
		январ	Февраль	марта	апрель	Май	июнь	июль	август	сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь		
2003		0	5,5	59,3	59,4	0	0,9	9,8	35,1	0	0	0	0		
2004		0,9	0	1,2	42,1	0	1,1	21	20,5	0	17,2	7,6	0		
2005		0	8,1	53,8	50,3	9,9	0	36,8	16,9	0,6	0	0	0		
2006		0	1,4	8,1	14,2	6,5	0	39,8	80,1	0	0	0,5	0		
2007		0	2,8	8,6	15,4	22,3	0	43,7	33,6	0	0	0	0		
2008		0	0	0	0	52,7	0	14,8	17,8	0,2	23,8	0	0		
2009		0,4	0	2,5	7,3	0	1,1	4,5	51,6	0	0	0,7	4,1		
2010		0	1,6	15,8	67,3	35,4	0	71,9	48,4	1,8	23,5	0	0		
2011		0	0	1,7	30,1	12,2	0,7	25,41	84	3,6	0	8,4	0		
2012		0	0	6,7	53,6	0	14,4	41,4	44,3	0	0	0	0		
2013		0	0	21,8	32,9	14,4	3,2	25,9	57,2	1,6	0	16,8	0		

Таблица 1.3 – Месячные суммы количества осадков в г. Сана за период 2003-2013 гг.

Таблица 1.4 – Месячные суммы количества осадков в г. Махвит за период 2003-2013 гг.

	Station:		AL-MAHW	VET .								Latitude:		15 27\	N
	WMO Ind	lex:	41390									Longitud	2:	43 30\	E
	Year:		2008-2013	}	Summary of Monthly Total Precipitation 2003-2013							Elevation	:	2078	m
		январ	Февраль	марта	апрель	Май	июнь	июль	август	сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь		
2008		0	0	0	0	26,9	51,3	22	22,6	9,4	0	1	0		
2009		0	0	9	63,6	1,8	20,4	27,3	173	19	62	0,2	0,4		
2010		0,3	19	27,3	126,1	61,6	70,8	160,7	105,1	69,9	0	2	0		
2011		0	0	0,6	43,2	79,2	40	53,7	134,9	92.0	7,2	51,3	0		
2012		0	0	6,4	92,4	0	2	85,9	0	41,3	0,6	0	0		
2013		0	0	20,4	32,8	38,7	43,5	47,5	91,1	31,2	34,4	10,8	3		
2008 2009 2010 2011 2012 2013		0 0,3 0 0 0	0 19 0 0 0	9 27,3 0,6 6,4 20,4	63,6 126,1 43,2 92,4 32,8	20,9 1,8 61,6 79,2 0 38,7	20,4 70,8 40 2 43,5	22 27,3 160,7 53,7 85,9 47,5	173 105,1 134,9 0 91,1	19 69,9 92.0 41,3 31,2	62 0 7,2 0,6 34,4	0,2 2 51,3 0 10,8	0,4 0 0 0 3		

На основании представленных данных об осадках за август будут проанализированы результаты гидродинамического прогноза осадков в Йемене.

2. Мезомасштабная гидродинамическая модель WRF-ARW

Модель The Weather Research & Forecasting Model (WRF) – это современная система моделирования атмосферы, предназначенная как для метеорологических исследований, так и для численного прогнозирования погоды.

Она была принята для исследований в университетах и правительственных лабораториях, для оперативного прогнозирования государственными и частными организациями, а также для коммерческого применения в промышленности.

Разработка WRF началась во второй половине 1990 - х годов с целью создания системы, общей для исследований и операций, а также для создания модели численного прогноза погоды (ЧПП) следующего поколения и более широкими возможностями прогнозирования.

Система WRF была разработана в партнерстве с Национальным центром атмосферных исследований.

Модель WRF является свободно распространяемой и открытой для общего пользования системой численного прогноза погоды. Она была создана в результате сотрудничества целого ряда организаций и исследователей: NCAR MMM (National Center for Atmospheric Research, Mesoscale & Microscale Meteorology laboratory; 4 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) NCEP (National Centers for Environmental Predictions) FSL (Forecast System Laboratory) AFWA (Air Force Weather Agency) NRL (Naval Research Laboratory) etc.

Модель WRF представляет собой динамическое ядро и набор параметризаций. NMM и ARW - два динамических ядра WRF, каждое из которых представляет собой отдельную вычислительную систему. Каждая вычислительная система требует отдельной установки и настройки. Модель реализована в виде программного кода, который написан на различных

языках программирования (в основном – на фортране и устанавливаемого на OC Linux). (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Структурная схема системы моделирования WRF-ARW [1]

Модель допускает параллельные вычисления, значительно более быстрые по времени. В модели WRF возможно использования вложенных сеток, с некоторыми ограничениями. Вложение осуществляется в горизонтальной плоскости, а в вертикальной плоскости модельные области должны целиком и полностью соответствовать друг другу. Соотношение шагов по горизонтальным координатам областей должно выражаться целым числом (по умолчанию – 3).

Могут использоваться подвижные вложенные сетки. WRF состоит из двух динамических ядер и целого семейства модулей и дополнений к модели.

Основные программные дополнения к WRF (The Weather Research & Forecasting Model):

- описание химических процессов WRF Chemistry (NCAR, UCAR: WRF-Chem);

- моделирование ураганов Hurricane WRF [2];

- полярная версия Polar WRF [3];

- моделирование городской атмосферы Urban WRF [4];

- глобальная версия Global WRF ARW[5].

Функции ARW версии 4 предлагают метеорологическому модельному сообществу современную численную погоду модель прогнозирования, отражающую современные достижения в области метеорологии, вычислительной техники и ассимиляции данных.

Программный код модели распространяется свободно и устанавливается на ОС Linux. Непосредственно после установки модель может использоваться.

Модель WRF – это современная и гибкая система моделирования атмосферы. Она является эффективной для высокопроизводительных вычислительных кластерных систем, так как учитывает конфигурацию многих компьютерных систем.

Область применения системы WRF обширна:

- прогноз погоды;

- моделирование текущего и будущего климата;

- моделирование загрязнения окружающей среды;

- моделирование реальных и идеализированных процессов в масштабах от сотен метров до тысяч километров.

Модель WRF является одной наиболее ИЗ универсальных И современных систем моделирования атмосферы. Она широко и успешно используется для метеорологического прогнозирования в научных центрах и метеорологических службах различных стран (предполагается использование этой модели в Национальном центре метеорологии Йемена), является свободно распространяемым программным продуктом. Модель WRF непрерывно развивается.

Программный комплекс WRF состоит из следующих систем:

- Система предварительной обработки данных WPS (WRF Preprocessing System)

- Система вариационной ассимиляции данных WRF-DA (Data Assimilation)

- Модель WRF-ARW (Weather Research & Forecast - Advanced Research WRF)

- Средства постобработки и визуализации данных.

Модель WRF-ARW является одним из двух вариантов мезомасштабной модели WRF. Модель основана на упругих негидростатических уравнениях движения для сжимаемой жидкости. Вертикальной координатой модели является σ. Поверхности равных значений σ у нижней границы области моделирования следуют за рельефом, при приближении к верхней границе становятся близкими к поверхностям равного давления.

Основные характеристики системы ARW, версия 4, которая используется в данной ВКР магистра.

ARW Dynamics Solver

Уравнения: полностью сжимаемые негидростатические уравнения Эйлера. Доступен гидростатический вариант.

Уравнения Эйлера в потоковой форме записаны как

$$\partial_t U + (\nabla V_u) + \mu_d \alpha \ \partial_x p + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right) \partial_\eta p \ \partial_x \phi = F_U$$
 (2.1)

$$\partial_t V + (\nabla V_v) + \mu_d \alpha \ \partial_y p + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right) \partial_\eta p \ \partial_y \phi = F_V$$
(2.2)

$$\partial_t w + (\nabla . V_w) - g[\left(\frac{\alpha}{\alpha_d}\right) \partial_\eta p - \mu_d] = F_W$$
 (2.3)

$$\partial_t \Theta_m + (\nabla . V \Theta_m) = F \Theta_m \tag{2.4}$$

$$\partial_t \mu_d + (\nabla . V) = 0 \tag{2.5}$$

$$\partial_t \phi + \mu_d^{-1} [\left(V \cdot \nabla_\phi \right) - g W] = 0$$
(2.6)

$$\partial_t Q_m + (\nabla . V q_m) = F Q_m \tag{2.7}$$

В (2.1) - (2.7) индексы (х, у и η) обозначают дифференцирование,

$$\nabla V A = \partial_x (Ua) + \partial_y (Va) + \partial_\eta (\Omega a)$$

$$V.\nabla a = U\partial_x a + V\partial_y a + \Omega\partial_\eta a$$

где а представляет универсальную переменную.

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$$
 отношение теплоемкостей для сухого воздуха,

*R*_d газовая постоянная для сухого воздуха,

а p_o - эталонное давление на поверхности (обычно 10⁵ Па). Слагаемые в правых частях уравнений (F_U , F_V , F_W и $F\Theta_m$) представляют собой внешние неадабатические источники и стоки, вынуждающие члены, возникающие из модельной физики, турбулентного перемешивания, сферических проекций и вращения Земли.

В гидростатическом аналоге негидростатических уравнений полное гидростатическое уравнение

$$\partial_{\eta} p = \frac{\mu_d \alpha_d}{\alpha}$$

заменяет уравнение вертикального импульса (2.3) и накладывает гидростатическое ограничение на решение.

В предыдущих версиях ARW прогностическое термодинамическое уравнение выражалось в слагаемые Θ вместо Θ_m в (2.4).

Однако в недавнем исследовании Xiao et al. (2015) обнаружили, что в

LES высокого разрешения с резкими вертикальными вариациями водяного WRF пара, моделирование показало сильную чувствительность К временному шагу, используемому для адаптации акустических мод. Использование Θ_m В качестве прогностической термодинамической переменной также в соответствии с формулировкой, использованной в модели для прогнозирования в разных масштабах, которая использует аналогичные числовые значения с явным разделением.

Прогностические переменные: горизонтальные компоненты скорости (*u* и *v*) в декартовых координатах, вертикальная скорость (*w*), флуктуации виртуальной потенциальной температуры, флуктуации геопотенциала и приземного давления сухого воздуха.

Хотя геопотенциал $\varphi = gz$ также является прогностической переменной в управляющих уравнениях ARW, он не записывается в форме потока, поскольку $\mu_d \varphi$ не является сохраняющейся величиной.

Вертикальная координата: вертикальная координата учитывает рельеф, массовая, гибридная сигма-давление на основе сухого гидростатического давления, допускается использование расшатанной по вертикали сетки. Верхняя граница модельной атмосферы – поверхность постоянного давления.

В предыдущих версиях ARW η определялся как

$$\eta = \frac{p_d - p_t}{p_s - p_t} \tag{2.8}$$

где *p*_{*d*}_гидростатическая составляющая давления сухого воздуха,

 p_s и p_t относятся к значениям p_d вдоль поверхности и сверху границ соответственно.

Определение координат, предложенное Лапризом [6] для использования с негидростатическими уравнениями, является традиционной сигма-координатой, используемой во многих гидростатических моделях атмосферы.

η изменяется от значения 1 на поверхности до 0 на верхней границе модельной области.

В четвёртой версии ARW вертикальная координата была обобщена, чтобы позволить более быстрое устранение влияния местности на координатные поверхности с увеличением высоты над поверхностью.

Гибридная вертикальная координата сигма-давление аналогична координате, которая используется в модели атмосферы сообщества (САМ) Национального центра атмосферных исследований (NCAR), как описано в Техническом примечании NCAR CAM3.0 [7]:

$$p_{d} = \beta (\eta) (p_{s} - p_{t}) + [\eta - \beta (\eta)] (p_{o} - p_{t}) + p_{t}, \qquad (2.9)$$

где p_o - эталонное давление на уровне моря.

Это представление координат несколько отличается тем, что оно основано на сухом давлении, а не на полном давлении, и нормализовано с использованием p_t таким образом, что $\eta = 0$ при $p_d = p_t$.

Здесь $B(\eta)$ определяется относительными весами между сигмакоординатой, которая повторяет рельеф, и координатой «чистого» давления. Вес выбирается таким образом, что η полностью соответствует сигмакоординате для $\beta(\eta) = \eta$ и возвращается к координате гидростатического давления при $\beta(\eta) = 0$. Для плавного перехода от сигма-координаты около поверхности к координате давления на верхних уровнях, $B(\eta)$ определяется полиномом третьего порядка

$$\beta(\eta) = c_1 + c_2 \eta + c_3 \eta^2 + c_4 \eta^3$$
(2.10)

где нижний индекс *η* обозначает дифференцирование. Используются граничные условия

$$\beta(1) = 1, \quad \beta_{\eta}(1) = 1, \quad \beta(\eta_{c}) = 0, \quad \beta_{\eta}(\eta_{c}) = 0$$
 (2.11)

такие что

$$c_1 = \frac{2\eta_c^2}{(1 - \eta_c)^3} \tag{2.12}$$

$$c_2 = \frac{-\eta_c (4+\eta_c+\eta_c^2)}{(1-\eta_c)^3}$$

$$c_3 = \frac{2(1+\eta_c + \eta_c^2)}{(1-\eta_c)^3}$$

$$c_4 = \frac{-(1+\eta_c)}{(1-\eta_c)^3}$$

где η_c - заданное значение (η), при котором координата принимает значение «чистого» давления.

Например, в модельной области, имеющей глубину 30 км, для $\eta_c = 0,2$ вертикальная координата становится «чистой» координатой давления на высоте около 12 км. Метрика вертикальных координат определяется как

$$\mu_{d} = \frac{\partial P_{d}}{\partial \eta} = \beta_{\eta}(\eta) (p_{s} - p_{t}) + [1 - \beta_{\eta}(\eta)] (p_{o} - p_{t})$$
(2.13)

Горизонтальная сетка: расшатанная сетка С Аракавы.

Интегрирование по времени: с использованием расщепления по физическим процессам с использованием схемы Рунге-Кутты 2-го или 3-го порядка с меньшим шагом по времени для акустических и гравитационных мод. Предусмотрена возможность изменения шага по времени. Пространственная дискретизация: возможен выбор описания адвективных слагаемых скалярных величин с использованием схем от 2 до 6го порядка точности по горизонтали и вертикали.

Турбулентное перемешивание и модельные фильтры: формулировка подсеточной турбулентности в горизонтальных и вертикальной координатах и физическом пространстве. Демпфирование дивергенции, фильтрация внешних мод, предусмотрена возможность явного фильтра.

Начальные условия: трехмерные для реальных данных и одно-, двух- и трехмерные для идеализированнных данных. Доступна возможность инициализации цифровой фильтрации (случаи с реальными данными).

Боковые граничные условия: доступны периодические, открытые, симметричные и заданные параметры.

Верхние граничные условия: поглощение гравитационных волн (диффузия, демпфирование Рэлея или неявное демпфирование Рэлея для вертикальной скорости).

Нижние граничные условия: трение или свободное скольжение.

Вращение Земли: включены полные слагаемые Кориолиса.

Проекции на сферу: при моделирования с использованием реальных данных поддерживаются четыре картографические проекции: полярная стереографическая, конформная Ламберта, Меркатора и широтно-долготная сетка (возможен учет повернутого полюса) [8].

Поддерживаются анизотропные проекции, в данном случае широтнодолготная сетка, а вместе с ней глобальная модель. ARW реализует проекции с использованием масштабных множителей и обобщение на анизотропные преобразования, введенное в ARW V3, требует присутствие коэффициентов отображения как для *x*, так и для *y*-компонентов преобразования от вычислительного пространства к физическому пространство для компенсации анизотропии.

В вычислительном пространстве ARW координаты *x* и *y* являются константами. Ортогональные проекции на сферу требует, чтобы физические

расстояния между точками сетки в проекции менялись в зависимости от положения на сетке. Для преобразования основных уравнений используются масштабные множители m_x и m_y . Они определяются как отношение расстояния в вычислительном пространстве к соответствующему расстоянию на поверхность Земли:

$$(m_x, m_y) = \frac{\Delta_x, \Delta_y}{\text{distance on the earth}}$$
 (2.14)

Динамическое ядро ARW включает масштабные множители в управляющие уравнения путем переопределения

составляющие скорости как

$$U = \frac{\mu_d U}{m_y} \quad , V = \frac{\mu_d V}{m_X} \quad , W = \frac{\mu_d W}{m_y} \quad , \Omega = \frac{\mu_d \omega}{m_y} \quad ,$$

Используя эти переопределенные переменные, определяющие прогностические уравнения (2.1)-(2.7), включая масштабные множители можно записать как

$$\partial_{t}U + m_{x} \left[\partial_{x}(U_{u}) + \partial_{y}(v_{u})\right] + \partial_{\eta}(\Omega_{u}) + \left(\frac{m_{x}}{m_{y}}\right) \left[\mu_{d}\alpha \partial_{x} + \left(\frac{\alpha}{\alpha_{d}}\right) \partial_{\eta}p \partial_{x}\phi\right] = F_{U}$$
(2.15)

$$\partial_{t}V + m_{y} \left[\partial_{x}(U_{v}) + \partial_{y}(V_{v})\right] + \left(\frac{m_{y}}{m_{x}}\right)\partial_{\eta}(\Omega_{v}) + \left(\frac{m_{x}}{m_{y}}\right) \left[\mu_{d}\alpha \partial_{y}p + \left(\frac{\alpha}{\alpha_{d}}\right)\partial_{\eta}p \partial_{y}\phi\right] = F_{V}$$
(2.16)

$$\partial_{t}W + m_{X} \left[\partial_{x} (U_{W}) + \partial_{y} (V_{W}) \right] + \partial_{\eta} (\Omega_{W})$$
$$-m_{y}^{-1} g \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha_{d}} \right) \partial_{\eta} p - \mu_{d} \right] = F_{w}$$
(2.17)

$$\partial_{t}\Theta_{m} + m_{x} m_{y} \left[\partial_{x} (U\theta_{m}) + \partial_{y} (V\theta_{m}) \right] + m_{y} \partial_{\eta} (\Omega\theta_{m}) = F\theta_{m}$$
(2.18)

$$\partial_t \mu_d + m_x \, m_y [U_X + V_Y] + m_y \, \partial_\eta (\Omega) = 0 \tag{2.19}$$

$$\partial_{t}\phi + \mu_{d}^{-1}[m_{x} m_{y}(U \partial_{x}\phi + V \partial_{y}\phi) + m_{y} \Omega \partial_{\eta}\phi - m_{y}gW] = 0$$
(2.20)

$$\partial_{t} Q_{m} + m_{x} m_{y} \partial_{x} (Uq_{m}) + \partial_{y} (Vq_{m}) + m_{y} \partial_{\eta} (\Omega q_{m}) = FQ_{m}$$
(2.21)

которые решаются вместе с диагностическими уравнениями.

Правые члены уравнений импульса (2.15) - (2.17) содержат кориолисовы слагаемые и условия кривизны вместе с условиями перемешивания и физическими воздействиями. Включая масштабные множители (2.14), члены, учитывающие ускорение Кориолиса и кривизну земли, имеют следующий вид:

$$FU_{cor} = +\frac{m_x}{m_y} \left(f + u \frac{m_y}{m_x} \frac{\partial m_x}{\partial_y} - v \frac{\partial m_y}{\partial_x} \right) V - \left(\frac{u}{r_e} + e \cos \alpha_r \right) W \quad (2.22)$$

$$FV_{cor} = -\frac{m_y}{m_x} \left[\left(f + u \frac{m_y}{m_x} \frac{\partial m_x}{\partial y} - v \frac{\partial m_y}{\partial x} \right) U - \left(\frac{u}{r_e} + e \sin \alpha_r \right) W \right] \quad (2.23)$$

$$FW_{cor} = +e\left(U\cos\alpha_r - \frac{m_x}{m_y}V\sin\alpha_r\right) + \frac{1}{r_e}(uU + \frac{m_x}{m_y}vV)$$
(2.24)

где α_r - местный угол поворота между осью у и меридианами,

 ψ - широта, $f = 2 \Omega_e \sin \psi$, $e = 2 \Omega_e \cos \psi$,

 Ω_e - угловая скорость вращения Земли,

*r*_e – радиус Земли.

В этой формулировке аппроксимируют радиальное расстояние от центра Земли в качестве среднего радиуса Земли r_e , и не учитывают зависимость горизонтального шага сетки как функция радиуса Земли.

Для изотропных проекций (конформной проекции Ламберта, полярной стереографической и проекции Меркатора) величина масштабных множителей одинаковы в обоих горизонтальных направлениях, так что $m_x = m_y = m$, где *m* обычно зависит только от широты.

Для анизотропной широтно-долготной сетки $m_x = \sec \psi$ и $m_y = 1$, так что $\frac{\partial m_x}{\partial_x} = (\frac{1}{r_e}) \sec \psi \tan \psi$ и $\frac{\partial m_y}{\partial_x} = 0$, при условии, что $\frac{\partial}{\partial_y} = (\frac{1}{r_e}) \frac{\partial}{\partial_{\psi}}$

Для идеализированных случаев на декартовой сетке масштабные множители $m_x = m_y = 1$, *е* должен быть равен нулю, чтобы удалить слагаемые, связанные с кривизной Земли.

Вложение: одностороннее интерактивное, двустороннее интерактивное и подвижная сетка. Несколько уровней вложения и целочисленные отношения для шагов сеток различного уровня вложения.

Глобальная сетка: возможность глобального моделирования с использованием фильтра Фурье у полюсов и периодического восточнозападного граничного условия.

Уравнения движения дискретизируются на пространственной сетке Аракавы класса С и интегрируется по времени методами Рунге-Кутта третьего и второго порядка с использованием метода расщепления.

2.1 Исходные уравнения, используемые в модели WRF-ARW

Основное отличие модели WRF-ARW от модели MM5, которая была предшествующей, состоит в том, что в WRF-ARW используется несколько отличная вертикальная координата, примененная впервые в работе Лаприза

[5], исходя из предложения Касахары относительно возможности записи уравнения сохранения массы в дивергентной форме при наложении на вертикальную координату определенных ограничений.

В оригинальной работе Лаприза она была названа координатой (π). Эта координата приводит уравнение сохранения массы к дивергентному виду, что заметно упрощает запись уравнений движения в дивергентной (потоковой) форме. Эта координата обладает замечательным свойством:

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\rho g,$$

то есть имеет точно такую же зависимость от высоты, как и гидростатическое давление ($P_{\rm h}$).

Модель WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты (η), которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что она определяется не через полное давление (*P*), а через его гидростатическую составляющую (*P*_h)

$$\eta = \frac{P_{\rm h} - P_{\rm ht}}{\mu}, \quad \mu = P_{\rm hs} - P_{\rm ht}$$

где *P*_{hs} и *P*_{ht} — гидростатическое давление на нижней и верхней границах модельной области, соответственно.

Прогностические уравнения дополняются диагностическими, вытекающими из условия гидростатичности вертикальной координаты:

$$\frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial \eta} = - \,\overline{\mu} \overline{\alpha}$$

представляющей собой уравнение гидростатики, и уравнением с введением возмущенных значений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = -\bar{\mu}\dot{\alpha} - \dot{\mu}\alpha$$

а также уравнением состояния. Использованы следующие обозначения: *и*, *v* и *w* — компоненты скорости,

$$U=\frac{\mu_d u}{m},$$

$$V=\frac{\mu_d v}{m},$$

$$\Omega = \frac{\mu_d \eta}{m},$$

 μ_d определяет массу сухого воздуха в столбе атмосферы, так как орографическая координата η определяется относительно сухого воздуха,

т — масштабный множитель карты,

η' — вертикальная скорость в орографических координатах,

 α — удельный объем, содержащий помимо сухого воздуха водяной пар и гидрометеоры: $\alpha = \alpha_d (1 + q_v + q_c + q_r + q_i +)^{-1}$,

*q*_{*} — отношения смеси водяного пара, облачности, дождя, льда и т.д.

 $\alpha_d = (1/\rho_d)$ — удельный объем сухого воздуха.

Термодинамические переменные представлены в виде суммы возмущенного (флуктуации) и фонового гидростатического значения:

$$p = \overline{p}(z) + p',$$

$$\Phi = \overline{\Phi}(z) + \Phi',$$

$$\mu_d = \mu_d(x, y) + \mu'_d.$$

р —давление,

Так как координатные поверхности (η) не горизонтальны, то (\overline{p} , $\overline{\Phi}$ и $\overline{\alpha}$) являются функциями координат (x, y и η), но это не принимается во внимание.

$$\Theta = \mu_{d} \theta_{m}$$
,
 Θ — потенциальная температура окружающей среды,
 $\theta_{m} = \theta (1+1, 61q_{v})$ — виртуальная потенциальная температура,
 $Q_{m} = \mu_{d} q_{m}$,
 $q_{m} = q_{v}, q_{c}, q_{r}, q_{i},...$

Отличительная особенность исходной системы WRF-ARW состоит в том, что прогностические уравнения написаны в дивергентной (консервативной) форме.

2.2 Метод численного решения уравнений в модели WRF-ARW

Расчеты в модели WRF-ARW производятся в параллелепипеде, основание которого касается сферической Земли, а оси декартовых координат в точке касания ориентированы по меридиану и кругу широты. Расчеты могут производиться на серии вложенных сеток. Вложения могут выполняться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна быть одинаковой на всех сетках. Вложения должны быть ориентированы точно так же, как и материнская сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке.

Так же, как и в модели MM5, в WRF-ARW используется подход с расщеплением по времени. Медленные или низкочастотные моды, связанные с процессом переноса, интегрируются с использованием схемы Рунге-Кутта третьего порядка по времени (RK3), а высокочастотные акустические моды,

связанные с процессом адаптации полей давления и скорости, интегрируются с меньшим шагом по времени для сохранения вычислительной устойчивости.

В WRF-ARW схема RK3 модифицирована применительно к координате η и потоковой форме уравнений, а также с учетом записи переменных в форме возмущений для акустического компонента при расщеплении по времени. Интегрирование акустической моды сделано в виде коррекции к интегрированию методом Рунге-Кутта.

3 Гидродинамической прогноз осадков в Йемене

3.1 Описание области исследования

Что касается Йемена, то количество дождя является одним из самых важных и трудно предсказуемых метеорологических элементов. Это определяет актуальность данного исследования, посвященного прогнозированию осадков на основе гидродинамической масштабной модели WRF-ARW.

Одна из особенностей, затрудняющая моделирование атмосферных процессов в Йемене, – сильная пространственная и временная неоднородность процессов. Есть районы с незначительным количеством осадков и другие районы с очень большим количеством осадков, о чём было подробно написано в первой главе этого исследования.

Для проведения численных экспериментов по гидродинамическому прогнозу осадков для Йемена была использована гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW, которая подробно описана в главе 2.

Для проведения численных экспериментов выбран 2013 год.

Для настройки модели использована область, заключённая между 11-19 455с.ш. и 42 Пв.д. область соответствует территории Йемена и её территориальным водам. По

горизонтали использовалась декартовая система координат (проекция Меркатора).

Было проведено несколько серий численных эксперименто с разными характеристиками сетки и с разными параметризациями физических процессов.

- в двух первых циклах использовался один набор параметризаций физических процессов и одинаковые характеристики модельной области.

Шаг по горизонтали 5 км, шаг по времени – 30 секунд. По вертикали использовалась гибридная о-Р система координат, учитывающая рельеф.

- в третьем и четвертом численных экспериментах использовались вложенные сетки и разные параметризации. Шаги использованных сеток: 18, 6, 2 км и согласно условию Куранта - Фридрихса - Леви шаг по времени во вложенной области на трёх сетках составил 120, 40, 13 секунд, соответсвенно.

В первоначальных численных экспериментах использовались параметризации физических процессов представленные в таблице 3.1 [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html#PBL].

Таблица 3.1– Параметризации, используемые в численных экспериментах

Физический процесс	Опция в	Схема параметризации
	namelist.input	(номер в namelist.input и
		название)
Микрофизика облаков	mp_physics	8, схема Томпсона
		(Thompson Scheme)
Длинноволновая радиация	ra_lw_physics	1, схема RRTM
		Longwave
Коротковолновая радиация	ra_sw_physics	1, схема Dudhia
		Shortwave
Поверхностный слой	sf_sfclay_physic	2, схема Eta Similarity
Процессы на подстилающей	sf_surface_physics	2, Unified Noah Land
поверхности		Surface
Планетарный пограничный	bl_pbl_physics	2, схема Mellor-
слой		Yamada–Janjic (MYJ)
Конвекция	cu_physics	1, Kain–Fritsch Схема


Рисунок 3.1 – Область моделирования

3.2 Использование данных для верификации

Как уже было описано ранее для верификации результатов моделирования использовались данные о количестве осадков на четырёх станциях Сана, Ибб, Аль-Махвит и Тайз. Географическое расположение станций представлено на рисунке 3.2. Одна из первых проблем, с которой столкнулись при выполнении исследований, связана с координатами станций.



Рисунок 3.2 – Географическое положение станций, данные которых используются при верификации

Хорошо известно, что при численном моделировании с использованием метода сеток, получаемое прогностическое значение в узле сетке определяет среднее значение по ячейке сетки. Для получения значения в конкретную точку необходимо произвести интерполяцию и некоторую корректировку значения метеорологической величины для перехода от среднего по ячейке к значению в точке, то есть произвести, так называемый, downscaling.

В данном исследовании обнаружилось, что в различных источниках определяются различные координаты четырех метеорологических станций, данные которых используются в исследовании (Ибб, Тайз, Сана и Аль-Махвит). Этими источниками являются:

1. Точные пространственные координаты расположения метеостанций pecypca Google Earth.

2. Координаты, утвержденные Метеорологическим бюро Йемена и записанные в метеорологических таблицах, предоставленных для исследования (Приложение А)

3. Координаты, полученные из источников географических данных которые определяют координатами города координаты точки, находящейся примерно посередине города.

Было проведено несколько экспериментов с разными координатами и стандартными параметризациями в соответствии со значениями координат в таблице 3.2. В последнем столбце таблицы приведён номер узла сетки, который ближе всего расположен к заданной координате.

Координаты	Источник данных	Широта	Долгоа	Номер узела
Города				(i, j)
	Google Earth	13,96	44,17	(71, 40)
Ибб	Мет. бюро Йемена	14,00	44,20	(72, 42)
	Источники геог. данных	14,00	44,00	(72, 36)
	Google Earth	13,68	44,13	(65, 39)
Таиз	Мет. бюро Йемена	13,41	44,08	(59, 38)
	Источники геог. данных	13,57	44,02	(63, 37)
	Google Earth	15,47	44,22	(105, 41)
Сана	Мет. бюро Йемена	15,31	44,11	(101, 39)
	Источники геог. данных	15,35	44,21	(102, 41)
	Google Earth	15,47	43,55	(105, 27)
Эль-махвит	Мет. бюро Йемена	15,27	43,30	(100, 21)
	Источники геог. данных	15,47	43,54	(105, 26)

Таблица 3.2 – Координаты станций из различных источников

Как видно из анализа данных представленных в таблице 3.2, в зависимости от координаты меняется номер ближайшего узла к станции, по

которой производится верификации. Также видно, что даже при незначительных различиях в координате станции очень сильно отличается узел сетки, с которым ассоциируется станция. И это в свою очередь приводит к различным результатам верификации.

Результаты такого рода сравнения представлены на рисунках 3.3-3.14, где прогноз осадков в каждом городе верифицируется по своему узлу сетки. На всех графиках ось абсцисс (Х) представляет дни августа 2013 года, а ось ординат (Y) представляет количество осадков, измеренное в мм/сутки.



Рисунок 3.3 – Прогностическое и фактическое количество осадков для города Ибб в координатах Google Earth



Рисунок 3.4 – Прогностическое и фактическое количество осадков для города Ибб в координатах, предоставленных Метеорологическим бюро Йемена



Рисунок 3.5 – Прогностическое и фактическое количество осадков для города Ибб в координатах поисковых системах



Рисунок 3.6 – Прогностическое и фактическое количество осадков для города Таиз в фактических координатах Google Earth



Рисунок 3.7 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Таиз в координатах, предоставленных Метеорологическим бюро

Йемена



Рисунок 3.8 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Таиз в координатам поисковых систем



Рисунок 3.9 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Сана в фактических координатах Google Earth



Рисунок 3.10 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Сана в координатах, предоставленных Метеорологическим бюро Йемена



Рисунок 3.11 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Сана в координатах поисковых систем



Рисунок 3.12 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Аль-Махвит в фактических координатах Google Earth



Рисунок 3.13 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Аль-Махвит в координатах, предоставленных Метеорологическим бюро Йемена



Рисунок 3.14 — Прогностическое и фактическое количество осадков для города Аль-Махвит по координатам поисковых систем

На рисунках 3.15 – 3.18 представлены одновременно результаты прогнозов для конкретной станции, определённые в разных узлах расчётной сетки.



Рисунок 3.15 — Результаты прогнозов по различным координатам города Ибб



Рисунок 3.16 — Результаты прогнозов по различным координатам города



Таиз

Рисунок 3.17 — Результаты прогнозов по различным координатам города

Сана



Рисунок 3.18 — Результаты прогнозов по различным координатам города Эль-Махвит

Анализ результатов, представленных на рисунках 3.3-3.14, позволяет говорить о том, что, несмотря на небольшое изменение координат одного и того же города, изменение в прогностических значениях осадков значительные. Причём изменения касаются не только ошибок в количестве осадков, но факта наличия или отсутствия осадков. Некоторое исключение составляют прогнозы для города Ибб, где в зависимости от используемых координат меняется только количество осадков, но не изменяется прогноз наличия осадков.

Для более детального анализа воспользуемся матрицей сопряженности, с помощью которой будем сравнивать фактически наблюдаемые и прогнозируемые осадки и оценивать качество прогноза и проверять его соответствие действительности.

Проверка может быть качественной (является ли правильным прогноз наличия/отсутствия осадков) или количественные (насколько точны прогнозы количества осадков).

В матрице (таблице) сопряженности показана частота прогнозов и наблюдений, а также степень их совпадения или различия. Матрица сопряжённости (таблица 3.3) учитывает все возможные комбинации прогнозируемых и фактических событий выпадения осадков.

Пусть

А – означает, что событие предсказано и произошло;

В – событие предсказано, но не произошло;

С – событие произошло, но предсказано не было;

D – правильно предсказано, что событие не произойдёт.

N- сумма количество событий.

Таблица 3.3– Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений.

Наблюдение	да	нет	сумма
Прогноз			
Да	А	В	A+B
Нет	С	D	C+D
Сумма	A+C	B+D	Ν

С помощью матрицы сопряжённости вычисляется большое разнообразие статистических данных для описания конкретных аспектов эффективности прогнозов, Можно рассчитать следующие параметры:

▶ Точность :

Точность и согласованность между данными прогноза и данными наблюдений рассчитывается по следующей формуле:

Tочность =
$$\frac{A+D}{N}$$

Диапазон : от 0 до 1. Чем ближе к 1, тем лучше .

➢ Оценка BIAS (Частотная BIAS):

Отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий.

$$BIAS = \frac{A+B}{A+C}$$

Диапазон : от 0 до ∞. Чем ближе к 1, тем лучше .

BIAS = 1 означает совпадение числа прогнозируемых и наблюдаемых случаев осадков. BIAS не является мерой точности и необязательно BIAS = 1 соответствует идеальному прогнозу.

 \succ POD :

это доля станций, на которых правильно смоделированы осадки.

$$POD = \frac{A}{A+C}$$

Диапазон : от 0 до 1. Лучший результат соответствует POD = 1, а наихудший при POD = 0. POD =1 означает идеальный прогноз .

 \succ FAR :

Это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались (ложная тревога).

$$FAR = \frac{B}{A+B}$$

Диапазон : от 0 до 1 . Чем ближе к 0, тем лучше . FAR = 0 не обязательно соответствует совершенным прогнозам.

Коэффициент успешности (Success Ratio) SR :

Это отвечает ответ на вопрос: Какая доля прогнозируемых «да» событий произошло?

$$SR = \frac{A}{A+B}$$

Диапазон : от 0 до 1. Чем ближе к 1, тем лучше .

Предоставляет информацию о вероятности наблюдаемого события при условии, что оно было предсказано. Он чувствителен к ложным тревогам, но игнорирует промахи. ► TS :

Это доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными.

$$TS = \frac{A}{A + B + C}$$

Диапазон : от 0 до 1. лучший результат соответствует TS = 1, худший -TS = 0; в этом случае TS = 1 означает идеальные прогнозы.

В рамках данного исследования были рассчитаны указанные выше статистические показатели и получены результаты, представленные в таблицах 3.4-3.15.

Таблица 3.4 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб в фактических координатах (Google Earth)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	22	9	31
нет	0	0	0
сумма	22	9	31

Таблица 3.5— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб (по координатам, предоставленным Йеменским метеорологическим)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	22	9	31
нет	0	0	0
сумма	22	9	31

Таблица 3.6— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб (по координатам поисковых систем

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	22	9	31
нет	0	0	0
сумма	22	9	31

Таблица 3.7— Оценки прогнозов, полученных по матрице сопряженности для города Ибб

	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по
Ибб	координатам google earth	координатам	координатам
		Метеорологического бюро	географических данных
BIAS	1.40	1.40	1.40
FAR	0.29	0.29	0.29
POD	1	1	1
TS	0.7	0.7	0.7
SR	0.7	0.7	0.7
Точность	0.7	0.7	0.7

Таблица 3.8 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз в фактических координатах (Google Earth)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	9	18	27
нет	3	1	4
сумма	12	19	31

Таблица 3.9— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз по координатам, предоставленным Йеменским метеорологическим бюро



прогноз			
да	11	18	29
нет	1	1	2
сумма	12	19	31

Таблица 3.10— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз (по координатам поисковых систем)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	10	18	28
нет	2	1	3
сумма	12	19	31

Таблица 3.11— Оценки прогнозов, полученных по матрице сопряженности для города Таиз

	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по
Таиз	координатам google earth	координатам	координатам
		Метеорологического бюро	географических данных
BIAS	2,25	2.40	2.30
FAR	0.66	0.62	0.64
POD	0.75	0.90	0.83
TS	0.30	0.36	0.33
SR	0.33	0.37	0.35
Точность	0.32	0.38	0.35

Таблица 3.12 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана в фактических координатах (Google Earth)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	12	18	30
нет	0	1	1
сумма	12	19	31

Таблица 3.13 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана по координатам, предоставленным Йеменским метеорологическим

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	12	19	31
нет	0	0	0
сумма	12	19	31

Таблица 3.14 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана по координатам поисковых систем

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	12	19	31
нет	0	0	0
сумма	12	19	31

Таблица 3.15— Оценки прогнозов, полученных по матрице сопряженности для города Сана

	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по
Сана	координатам google earth	координатам	координатам
		Метеорологического бюро	географических данных

BIAS	2,50	2.58	2.58
FAR	0.60	0.60	0.60
POD	1	1	1
TS	0.40	0.38	0.38
SR	0.40	0.38	0.38
Точность	0.41	0.38	0.38

Таблица 3.16 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль Махвит в фактических координатах (Google Earth)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	15	15	30
нет	0	1	1
сумма	15	16	31

Таблица 3.17 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль Махвит (по координатам, предоставленным Йеменским метеорологическим)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	12	9	21
нет	3	7	10
сумма	15	16	31

Таблица 3.18— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль Махвит (по координатам, в поисковых системах)

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	15	14	29
нет	0	2	2
сумма	15	16	31

Таблица 3.19— Оценки прогнозов, полученных по матрице сопряженности для города Эль-Махвит

	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по	Оценки прогнозов по
Эль-Махвит	координатам google earth	координатам	координатам
		Метеорологического бюро	географических данных
BIAS	2	1.40	1.93
FAR	0.50	0.42	0.48
POD	1	0.80	1
TS	0.50	0.50	0.51
SR	0.50	0.57	0.51
Точность	0.51	0.61	0.54

Анализируя представленные данные можно сделать следующие выводы:

BIAS для прогнозов во всех городах всегда больше 1 и это указывает на то, что прогнозируемых дней с осадками всегда больше, чем фактических дней, в которые осадки наблюдались.

FAR (ложная тревога) - осадки прогнозируются, но не наблюдаются, и она меньше в городах Ибб и Аль-Махвит и увеличивается в городах Сана и Таиз.

РОД на всех метеостанциях 1 или близко к 1 и это хорошая характеристика, указывающая на то, что прогноз наличия осадков был

правильным в большом количестве случаев. Поскольку этот индикатор чувствителен к совместимости прогноза с наблюдаемыми, но он игнорирует ложные тревоги, то он должен использоваться вместе с FAR. Этот критерий искусственно может быть улучшен, если дать больше раз прогноз осадков.

TS Прогноз осадков правильно соответствует тому, что наблюдается в городах Ибб и Аль-Махвит, где наибольшее значение равно 0,5, а в Таизе и Сане меньше 0,5.

SR Это также 0,5 и более в Иббе и Махфите и менее 0,5 в Таизе и Сане.

Точность, которая является наиболее важным статистическим показателем, точность прогноза, будь прогноз наличия или отсутствия осадков, самая высокая в Иббе и Аль-Махвите и самая низкая в Таизе и Сане.

Благодаря анализу предыдущих статистических показателей нам становится ясно, что качество прогноза и его совместимость с тем, что наблюдается, выше в городах Ибб, Эль-Махвит, затем Таиз и Сана. Метеорологические станции Таиз и Сана - это станции, расположенные в аэропортах и расположенные на открытых местах относительно далеко от города, какая топография города отличается от местоположения метеостанции. Что касается станций Ибб и Эль-Махвит, из-за их присутствия в месте, которое представляет топографию региона, они имеют лучшее качество и соответствуют выходным данным.

Кроме того, город Таиз является исключением из остальных исследуемых городов, потому что находится на границе прибрежной и горной местности. В этом районе очень часты воздушные потоки с моря, которые приносят с собой осадки. Прогноз в этом регионе очень труден.

Для станции, которая является более репрезентативной, для географии окружающей местности, точность прогнозируемых осадков лучше.

Чтобы прояснить это более точно, были использованы следующие программы (Google earth, Surfer 13 и TCS Converter с помощью сайта GPS <u>https://www.gpsvisualizer.com/elevation</u>) для получения топографических карт четырех городов, которые приведены на рисунках (3.19-3.22), на которых

представлена высота рельефа и звёздочкой обозначено расположение метеорологической станции.



Рисунок 3.19 — Топографическая карта города Ибб.



Рисунок 3.20 — Топографическая карта города Таиз.



Рисунок 3.21 — Топографическая карта города Сана.



Рисунок 3.22 — Топографическая карта города Эль-Махвит

На рисунках 3.19 – 3.22 ось абсцисс (*x*) это широта, а ось ординат (*y*) – долгота. Знаком «звёздочка» показано расположение метеорологической станции, данные с которой используются при верификации прогноза осадков.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие рекомендации

1. Необходимо использовать, как можно более точные координаты станций наблюдений.

2. Использовать дополнительные станции, на которых производят наблюдения за осадками. Оптимальным было бы, чтобы местоположение станции соответствовало характеру преобладающей местности. Добавление точек измерений будет способствовать повышению точности информации об осадках и, прямо или косвенно, повысит качество прогноза осадков.

3. Для будущих исследований рекомендуем сравнительное исследование ряда прогнозов различных моделей для всех станций в Йемене. В этом исследовании изучалась только модель WRF-ARW, поскольку она наиболее часто используется синоптиками Йемена.

4. В дальнейших исследованиях для верификации будут использованы координаты Google earth, представленные в таблице 3.2

3.3 Описание и анализ различных параметров

Задача дальнейших исследований - попытаться получить наилучшие результаты прогнозирования.

Будем проводить численные эксперименты для того же периода времени с 1 августа 2013 г. по 31 августа 2013 г., в той же области (рисунок 3.1), но будем менять параметризации физических процессов.

Сначала использовались параметризации представлены в таблице 3.20

Таблица 3.20 - Параметризации, используемые в численных экспериментах №2

Описываемый физический процесс	Опция в namelist.input	Параметризация (номер опции в namelist.input и название схемы)
Микрофизика облаков	mp_physics	6, схема WRF Single- moment 6-class
Длинноволновая радиация	ra_lw_physics	1, схема RRTM Longwave
Коротковолновая радиация	ra_sw_physics	1, схема Dudhia Shortwave
Поверхностный слой	sf_sfclay_physics	1, схема Revised MM5
Процессы на подстилающей поверхности	sf_surface_physics	2, Unified Noah Land Surface
Планетарный пограничный слой	bl_pbl_physics	1, схема Yonsei University (YSU)
Конвекция	cu_physics	1, cxeмa Kain–Fritsch

Было проведено сравнение результатов прогноза и фактических данных, измеренных на метеорологических станциях, которые были получены через Метеорологическое управление Йемена. Результаты этого сравнения были представлены на рисунках 3.23-3.26 (визуализация с использованием программы Grapher).



Рисунок 3.23 — Прогностическое и фактической количество осадков на метеостанции Ибб



Рисунок 3.24 — Прогностическое и фактической количество осадков на метеостанции Таиз



Рисунок 3.25 — Прогностическое и фактической количество осадков на метеостанции Сана



Рисунок 3.26 — Прогностическое и фактической количество осадков

Анализируя предыдущие рисунки 3.3,3.6,3.9,3.12 и, сравнивая их с данными, представленными на рисунках 3.23-3.26, которые представляют одни и те же города с одинаковыми координатами, но с разными параметризациями, мы замечаем, что разница между ними незначительна, и, чтобы понять это более четко, мы проанализируем результаты с использованием матрицы сопряжённости.

Таблица 3.21 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб

Факт Прогноз	да	нет	сумма
Да	21	8	29
Нет	1	1	2
сумма	22	9	31

Таблица 3.22— Результаты сравнения оценок прогнозов для первого и второго экспериментов для города Ибб

	Первый эксперимент	Второй эксперимент
Ибб		
BIAS	1.40	1.31
FAR	0.29	0.27
POD	1	0.95
TS	0.7	0.7
SR	0.7	0.7
Точность	0.7	0.7

Сравнивая результаты первого и второго численных экспериментов для города Ибб, отметим следующее:

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых событий в обоих экспериментах (больше 1 – 1,4 и 1,31), но она меньше во втором эксперименте (1,31), чем в первом (1,4).

FAR/ События предсказанные (да), которые не наблюдались, во втором эксперименте немного ниже, чем в первом.

РОD/ Наблюдаемые события (да), которые были правильно предсказаны в первом эксперименте, были идентичны и равны 1, но во втором эксперименте они были немного меньше, чем 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий «да» с наблюдаемыми событиями «да» в обоих экспериментах одинакова, и нет никакой разницы между ними, поскольку оба являются = 0,7

SR/ Доля предсказанных (ДА) и правильно наблюдаемых событий (ДА) также одинакова в обоих экспериментах =0,7

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то (да) или (нет), также согласуется в обоих экспериментах =0,7

Таблица 3.23 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз

Факт	да	нет	сумма
Прогноз			
да	8	12	20
нет	4	7	11
сумма	12	19	31

Таблица 3.24— Результаты сравнения оценок прогнозов для первого и второго экспериментов для города Таиз

перыя женеримент второй эксперимент		Таиз	Первый эксперимент	второй эксперимент
-------------------------------------	--	------	--------------------	--------------------

BIAS	2,25	1.6
FAR	0.66	0.6
POD	0.75	0.53
TS	0.30	0.33
SR	0.33	0.40
Точность	0.32	0.48

Сравнивая результаты первого численного эксперимента для города Таиз с результатами второго численного эксперимента, получили данные, представленные в таблице 3.24, из анализа которой можно отметить следующее:

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых событий в обоих экспериментах, Но во втором численном эксперименте он намного меньше, чем в первом.

FAR/ События, которые предсказывают (да) и которые не наблюдались в обоих экспериментах, примерно равны.

РОД / Наблюдаемые (да) события, которые были правильно предсказаны в первом эксперименте ближе к 1, чем во втором эксперименте.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемыми событиями в обоих экспериментах одинакова, и нет никакой разницы между ними, поскольку в обоих случаях TS=0,3

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий во втором эксперименте немного выше, чем в первом эксперименте.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то (да) или (нет), где во втором эксперименте он точнее, чем в первом.

Таблица 3.25— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана

Факт да нет сумма

Прогноз			
да	10	14	24
нет	2	5	7
сумма	12	19	31

Таблица 3.26— Результаты сравнения оценок прогнозов для первого и второго экспериментов для города Сана

Сана	Первый эксперимент	второй эксперимент
BIAS	2,50	2
FAR	0.60	0.5
POD	1	0.83
TS	0.40	0.38
SR	0.40	0.41
Точность	0.41	0.48

Сравнивая результаты первого численного эксперимента (таблица 3.2) для города Сана с результатами второго численного эксперимента (таблица 3.26), отметим следующее:

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых событий в обоих экспериментах, но в первом численном эксперименте она больше, чем в втором.

FAR/ События, которые предсказывают и которые не наблюдались во втором эксперименте меньше, чем в первом.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны . в первом эксперименте POD= 1, а во втором эксперименте меньше 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых событий - оба эксперимента близки.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – оба эксперимента близки.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то прогноз наличия или отсутствия осадков. Прогноз во втором эксперименте точнее, чем в первом.

Таблица 3.27 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль-Махвит

Факт	да	Нет	сумма
прогноз			
да	14	13	27
нет	1	3	4
сумма	15	16	31

Таблица 3.28— Результаты сравнения оценок прогнозов для первого и второго экспериментов для города Эль-Махвит

Эль-Махвит	Первый эксперимент	второй эксперимент
BIAS	2	1.8
FAR	0.50	0.48
POD	1	0.93
TS	0.50	0.50
SR	0.50	0.51
Точность	0.51	0.54

Сравнивая результаты первого численного эксперимента в координатах Google Earth в Таблице (3.2) для города Сана с результатами второго численного эксперимента, получили данные, представленные в таблице (3.28), отметим следующее:

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых событий в обоих экспериментах, но в первом численном эксперименте он больше, чем во втором.

FAR/ События, которые предсказывают и которые не наблюдаются, во втором эксперименте он был немного меньше, чем в первом.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, в первом эксперименте равен 1, а во втором эксперименте он меньше 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых событий – оба эксперимента близки.

SR/ Доля предсказанных и правильно наблюдаемых событий – оба эксперимента близки.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие осадков - во втором эксперименте он точнее, чем в первом.

В результате проведённого анализа можно сделать вывод о том, что параметризации, использованные во втором численном эксперименте (таблица 3.20), дали более точные результаты, чем параметризации первого численного эксперимента (таблица 3.1). Хотя и в небольшой степени, но они наиболее подходящие для прогноза наличия или отсутствия осадков.

3.4 Использование вложенной сетки

Для уточнения прогнозов осадков были проведены численные эксперименты с вложенной сеткой, представленной на рисунке 3.27. К этому решению пришли, так как используемая ранее модельная область слишком груба для описания процессов (шаг сетки был равен 5 км) и для увеличения пространственного разрешения, рабочая область модели была увеличена в три раза. В середине самой большой области, которая совпадала с рабочей областью предыдущих экспериментов, выделен прямоугольник, соответствующий интересующей области (области, в которую входят города Сана, Аль-Махвит, Таиз, Ибб), то есть была создана вложенная сетка.

Горизонтальный шаг материнской сетки 5 км, вложенной сетки 2 км. Шаг по времени материнской сетки 120 секунд, вложенной 60секунд.

За период с 1 августа 2013 г. по 31 августа 2013 г. модель WRF-ARW запускалась 31 раз в течение 31 дня.



Рисунок 3.27—Модельная область а) Материнская и вложенная сетки, б) вложенная сетка

Два численных эксперимента были проведены во вложенных сетях с разными параметризациями физических процессов, которые приведены в таблице 3.29.

Таблица 3.29 — Параметризации, используемые в численных экспериментах

Физический	Опция	Параметризаций	Параметризаций
процесс	namelist.input	первого	второго
		численного	численного
		эксперимента.	эксперимента.

Микрофизика	mp_physics	8,8,8 Схема Томпсона	
облаков			
Длинноволновая	ra_lw_physics	1,1,1 Схема RRTM Longwave	
радиация			
Коротковолновая	ra_sw_physics	1,1,1 Схема Dudhia Shortwave	
радиация			
Поверхностный	sf_sfclay_physics	1,1,1 Схема	1,1,1 Схема
слой		(Revised MM5)	(Revised MM5)
Процессы на	sf_surface_physics	2,2,2 Unified Noah Land Surface	
подстилающей		модель	
поверхности			
Планетарный	bl_pbl_physics	1,1,1 Схема Yonsei University (YSU)	
пограничный слой			
Конвекция	cu_physics	5,5,0 Grell 3D	5,5,5 Grell 3D
		Ensemble Схема	Ensemble Схема

В первом численном эксперименте модель WRF-ARW запускалась с параметрами, указанными в таблице 3.29.

Проведено сравнение результатов прогноза и фактических данных, измеренных на метеорологических станциях, которые были получены через Метеорологическое управление Йемена. Результаты этого сравнения представлены на рисунках 3.28-3.31.



Рисунок 3.28 — Прогноз интенсивности осадков на вложенной сетке и фактические данные на метеостанции Ибб



фактические данные на метеостанции Таиз


Рисунок 3.30 — Прогноз интенсивности осадков на вложенной сетке и

фактические данные на метеостанции Сана



Рисунок 3.31 — Прогноз интенсивности осадков на вложенной сетке и фактические данные на метеостанции Эль-Махвит

Анализируя результаты прогнозов (рисунки 3.28- 3.31), мы отмечаем, что совпадение прогностических значений с данными наблюдений во всех городах не согласуется, так как количество дней, в течение которых фактические осадки измерялись на станциях, много больше, чем количество дней, в которые прогнозировались осадки, и чтобы понять это более четко проанализируем результаты с использованием матрицы сопряжённости.

Таблица 3.30 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	13	5	18
нет	9	4	13
сумма	22	9	31

Таблица 3.31– Оценка качества прогнозов для г. Ибб

	Результаты матрицы	
Ибб	сопряжения для первого	
	эксперимента	
BIAS	0.81	
FAR	0.27	
POD	0.59	
TS	0.48	
SR	0.72	
Точность	0.54	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий меньше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались = 27 %

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны . Немного больше половины и это не очень хорошая сумма .

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемыми событиями = почти половина случаев.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий = 0.72.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие осадков. Это равно половине и это неудовлетворительный результат.

Таблица 3.32 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	6	10	16
нет	6	9	15
сумма	12	19	31

Таблица 3.33 – Оценка качества прогнозов для г. Таиз

	Оценки для первого		
Таиз	эксперимента		
BIAS	1.3		
FAR	0.62		
POD	0.5		
TS	0.27		
SR	0.37		
Точность	0.51		

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались = 62 % и это неудовлетворительно.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно половины и это не очень хороший результат.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых событий 0,27 и это неудовлетворительный результат.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.37 и это неудовлетворительный результат.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие осадков, равно почти половине и это неудовлетворительно.

Таблица 3.34 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	10	14	24
нет	2	5	7
сумма	12	19	31

Таблица 3.35- оценка качества прогнозов для г. Сана

	Оценки для первого
Сана	эксперимента
BIAS	2
FAR	0.58
POD	0.83
TS	0.38
SR	0.41

Точность	0.48

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались = 58 % и это неудовлетворительно.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны равно 0,83.

TS/ Степень совместимости предсказания и наблюдения события = 0,38 и это неудовлетворительный результат.

SR/ Доля предсказанных и правильно наблюдаемых событий = 0.41 и это неудовлетворительный результат.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие осадков. Это равно почти половине, и это неудовлетворительный результат.

Таблица 3.36 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль-Махвит

факт прогноз	да	нет	сумма
да	10	7	17
нет	5	9	14
сумма	15	16	31
	Оце	Оценки для первого	

Таблица

3.37- оценка

качества прогнозов для г. Эль-Махвит

Эль-Махвит	эксперимента
BIAS	1.13
FAR	0.41
POD	0.66
TS	0.45
SR	0.58
Точность	0.61

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых событий.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались = 41 %, и это неудовлетворительный результат.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно 0,66.

TS/ Степень совместимости предсказать событий с наблюдаемыми событиями = 0,45 и это неудовлетворительный результат.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий = 0.58.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие осадков. Это больше, чем 0,6.

Во втором численном эксперименте модель WRF-ARW запускалась с параметризациями, указанными в таблице 3.29.

Проведено сравнение результатов прогноза и фактических данных, измеренных на метеорологических станциях, которые были получены через Метеорологическое управление Йемена. Результаты этого сравнения были представлены на рисунах 3.31-3.34.



Рисунок 3.31 — Прогноз осадков на вложенной сетке и фактические данные на метеостанции Ибб



Рисунок 3.3 — Прогноз осадков на вложенной сетке и фактические данные на метеостанции Таиз



Рисунок 3.33 — Прогноз осадков на вложенной сетке и фактические данные

на метеостанции Сана



Рисунок 3.34 — Прогноз осадков на вложенной сетке и фактические данные на метеостанции Эль-махвит

При анализе данных прогнозов, представленных на рисунках 3.31 - 3.34 Таиз отметим, что точность прогнозов осадков города для неудовлетворительна, так как количество дней, В которые осадки наблюдались на станции было намного больше, чем прогнозированных. Для

городов (Ибб, Сана и Эль-Махвит) существует небольшое согласие между прогнозируемыми данными и наблюдаемыми данными и чтобы понять это более четко, мы проанализируем результаты, используя матрицу непредвиденных обстоятельств.

Таблица 3.3 8— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Ибб

факт прогноз	да	нет	сумма
да	15	5	20
нет	7	4	11
сумма	22	9	31

Таблица 3.39- Оценка качества прогнозов для г. Ибб

	Оценки прогноза	
Ибб		
BIAS	0.90	
FAR	0.25	
POD	0.68	
TS	0.55	
SR	0.75	
Точность	0.61	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий меньше, чем относительная частота наблюдаемых событий.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались = 25 %

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно 0,68.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемымио событиями = Почти половина.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий = 0.75.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие осадков больше 0,6.

Таблица 3.40 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Таиз

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	5	11	16
нет	7	8	15
сумма	12	19	31

Таблица

Оценка

3.41-

качества прогнозов для г. Таиз

Таиз	Оценки прогноза	
BIAS	1.23	
FAR	0.68	
POD	0.41	
TS	0.21	
SR	0.31	
Точность	0.41	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ Предсказанные события, которые не наблюдались = 68 % и это неудовлетворительный прогноз.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно меньше половины, и это неудовлетворительный прогноз.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых осадков – 0,21 и это неудовлетворительный прогноз.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.31 и это неудовлетворительный прогноз.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие осадков – меньше половины, и это неудовлетворительный прогноз.

Таблица 3.42— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Сана

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	8	8	16
нет	4	11	15
сумма	12	19	31

Таблица

3.43- Оценка качества прогнозов для г. Сана

	Результаты матрицы	
Сана	сопряжения для	
	второго эксперимента.	
BIAS	1.3	
FAR	0.5	
POD	0.66	
TS	0.4	
SR	0.5	
Точность	0.61	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались – 50 % и это неудовлетворительный прогноз.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно 0,66.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых событий – 0,40 и это неудовлетворительный прогноз.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0. 50 и это неудовлетворительный прогноз.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь то наличие или отсутствие явления – 61%, и неудовлетворительный прогноз.

Таблица 3.44 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений для города Эль-Махвит

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	9	6	15
нет	6	10	16
сумма	15	16	31

Таблица 3.45- Оценка качества прогнозов для г. Эль-Махвит

	Оценки прогноза
Эль-Махвит	

BIAS	1
FAR	0.4
POD	0.6
TS	0.42
SR	0.6
Точность	0.61

BIAS / Относительная частота предсказанных событий равна относительной частоте наблюдаемых.

FAR/ События, предсказанные, которые не наблюдались – 40 % и это неудовлетворительный прогноз.

РОД / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны – 0,66.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий наблюдаемых– 0,42 и это неудовлетворительный прогноз.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.60.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие явления – 0,6.

Анализируя результаты и сравнивая два численных эксперимента с вложенной сеткой, надо заметить, что точность прогнозов для городов Ибб и Сана во втором численном эксперименте лучше, чем в первом численном эксперименте, а обратная ситуация наблюдается для города Таиз. Для Эль-Махвит разницы между прогнозами практически нет. Но, в целом, мы не получили отличных результатов от обоих экспериментов с разными параметризациями и это можно увидеть по данным, приведённым в таблицах 3.46- 3.49.

Таблица 3.46 — Сравнение матриц сопряженности для первого и второго численного эксперимента для города Ибб .

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Ибб	сопряжения для первого	сопряжения для второго
	эксперимента	эксперимента.
BIAS	0.81	0.90
FAR	0.27	0.25
POD	0.59	0.68
TS	0.48	0.55
SR	0.72	0.75
Точность	0.54	0.61

Таблица 3.47 — Сравнение матриц сопряженности для первого и второго численного эксперимента для города Таиз .

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Таиз	сопряжения для первого	сопряжения для второго
	эксперимента	эксперимента.
BIAS	1.3	1.23
FAR	0.62	0.68
POD	0.5	0.41
TS	0.27	0.21
SR	0.37	0.31
Точность	0.51	0.41

Таблица 3.48— Сравнение матриц сопряженности для первого и второго численного эксперимента для города Сана.

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Сана	сопряжения для первого	сопряжения для второго
	эксперимента	эксперимента.
BIAS	2	1.3
FAR	0.58	0.5

POD	0.83	0.66
TS	0.38	0.4
SR	0.41	0.5
Точность	0.48	0.61

Таблица 3.49 — Сравнение матриц сопряженности для первого и второго численного эксперимента для города Сана.

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Эль-Махвит	сопряжения для первого	сопряжения для второго
	эксперимента	эксперимента
BIAS	1.13	1
FAR	0.41	0.4
POD	0.66	0.6
TS	0.45	0.42
SR	0.58	0.6
Точность	0.61	0.61

4. Глобальная система прогнозирования (GFS)

4.1 Описание модели GFS

Глобальная прогнозирования (GFS) система -ЭТО система глобального разработанная гидродинамического прогноза погоды, (NCEP). Национальными центрами экологического прогнозирования Прогнозирует большой набор данных – на сайте доступны десятки атмосферных метеорологических величин, от температуры, ветра и осадков до влажности почвы и концентрации атмосферного озона.

Модель GFS - это совместная модель, состоящая из четырех отдельных моделей

•модель атмосферы,

•модель океана,

•модель суша/почва,

•модель морского льда.

Модели работают вместе для получения точной картины состояния атмосферы.

Чем выше разрешение модели атмосферы, тем точнее можно описать рельеф земной поверхности (орографию) и её взаимодействие с атмосферным потоком. Более высокое разрешение модели атмосферы позволяет точнее описывать каскад энергии по спектру атмосферных движений, а в некоторых случаях перейти от параметрического к явному описанию атмосферных явлений (например, глубокой конвекции). Это, в свою очередь, способствует уменьшению ошибок прогноза.

В модели GFS применяется спектральное полулагранжево описание адвекции с полунеявной схемой интегрирования по времени [10].

В качестве базисных используются сферические функции [13]. Для увеличения качества прогнозов в модели улучшается разрешение и по

горизонтали и по вертикали, а структура модели делается всё более модульной.

Разрешение по горизонтали современной оперативной (детерминированной) модели Т1534 (Т574) или приблизительно 13 км (34 км) на экваторе для прогноза с заблаговременностью 0-10 дней (10-16 дней).

Разработана система ансамблевого прогноза – разрешение модели около 25 км, 80 членов ансамбля.

По вертикали используется 64 уровня в гибридной σ-давление системе координат [13]. Верхняя граница модельной атмосферы находиться приблизительно на уровне 0.27 гПа (около 55 км).

Полулагранжев метод устраняет ограничение на величину шага по времени (условие Куранта-Фридрихся-Леви) особенно жесткое вблизи полюсов вследствие сходимости меридианов. Увеличение шага по времени (в 3–5 раз) позволяет при заданном разрешении модели ускорить прогноз либо при заданном времени прогноза повысить горизонтальное разрешение. Такое увеличение шага по времени не нарушает аппроксимации, так как ограничение по числу Куранта в атмосфере проявляется в основном при расчете достаточно гладких струйных течений в верхней тропосфере. По сравнению с эйлеровыми конечно-разностными схемами второго порядка, полулагранжев метод дает значительно меньшую фазовую ошибку в решении.

В полулагранжевом методе описания адвекции формально отсутствует свойство сохранения массы переносимой величины, теоретически необходимое для интегрирования модели на длительные (несколько десятилетий и больше) сроки. Практика показала, что это не сильно влияет на качество решения при использовании модели для среднесрочного прогноза погоды с разрешением порядка градуса и выше. Отметим, что полулагранжев подход применяют в сочетании как с конечно разностным, так и со спектральным методами.

Однако, в моделях, предназначенных для прогноза погоды на периоды длиннее сезона и экспериментов по моделированию климата, полулагранжев подход значительно менее распространен в силу того, что он не гарантирует выполнение законов сохранения массы и энергии. Помимо преимущества от использования больших шагов по времени, полулагранжев метод позволяет рассчитывать перенос большого количества составляющих атмосферы (малых газовых составляющих, аэрозолей и т. д.) быстрее других численных методов [11]. В современных моделях мирового уровня число подобных составляющих доходит до 100 и будет увеличиваться. Поэтому в последние годы появились обобщения полулагранжева метода, сохраняющие массу переносимой величины, основанные на методе конечных объемов.

Полулагранжев метод локален, однако при больших числах Куранта требуется пересылка значительного количества данных. Частично эта проблема, по-видимому, решена [12]. Удалось разработать программную реализацию полулагранжева переноса, масштабируемую на десятки тысяч ядер. Также рассматривается возможность ограничения шага по времени для минимизации количества пересылок.

При использовании полулагранжевой схемы используется трёхмерная интерполяция Эрмита.

Полулагранжева адвекция по горизонтали вычисляется на линейной редуцированной вычислительной экономии) гауссовой (для сетке. Полунеявный подход и неявное описание диффузии (восьмого порядка точности) осуществляется в спектральном пространстве. Это требует применения преобразований Фурье и Лежандра для перехода из сеточного пространства в спектральное и наоборот. Для повышения точности вычисления присоединённых полиномов Лежандра при больших волновых числах используется расширенная арифметика. Для того чтобы исключить В стратосфере используют дополнительное демпфирование «шум» дивергенции второго порядка, которое увеличивается с высотой И применяется начиная с уровня 100 гПа. Также корректируется глобальное

среднее содержание озона для избежания неконсервативности схемы при использовании полулагранжева подхода при описании адвекции. В модели сохраняется и трёхуровнная по времени схема для описания адвекции по вертикали в эйлеровых координатах.

В модель GFS регулярно вносятся изменения для повышения ее производительности и точности прогнозов. Это постоянно развивающаяся модель атмосферы.

Сеточные прогностические данные доступны для загрузки через систему распределения NOAA (NOMADS). Продукты прогнозирования и дополнительная информация о GFS доступны на домашней странице GFS [https://www.ncdc.noaa.gov/].

До января 2003 года GFS была известна как модель GFS Aviation (AVN) и модель GFS средней заблаговременности (MRF). Продукты GFS-AVN и MRF являются линейкой NCEP от NOAAPort [9]

4.2 Использование GFS модель для прогноза осадков

Задача дальнейших исследований - попытаться получить наилучшие результаты прогнозирования, поэтому в этой части мы получим с сайте модели GFS, обработаем, проанализируем и сравним данные модели GFS с данными, уже наблюдаемыми на станциях как мы ранее работали с моделью WRF - ARW за тот же период времени, то есть август 2013 г.

Было проведено сравнение результатов прогноза (GFS) и фактических данных, измеренных на метеорологических станциях, которые были получены через Метеорологическое управление Йемена. Результаты этого сравнения представлены на рисунках 4.1-4.4.



Рисунок 4.1 — Прогностическое (GFS) и фактическое количество осадков на метеостанции Ибб



Рисунок 4.2 — Прогностическое (GFS) и фактическое количество осадков на метеостанции Таиз



Рисунок 4.3 — Прогностическое (GFS) и фактическое количество осадков на метеостанции Сана



Рисунок 4.4 — Прогностическое (GFS) и фактическое количество осадков на метеостанции Эль-Махвит

Анализ результатов, представленных на рисунках (4.1)-(4.4), позволяет говорить о том, что прогноз для городов Ибб и Аль-Махвит являются наиболее точными и последовательными между результатами прогнозов и данными измерений на станциях, за ними следуют города Таиз и Сана.

Для более детального анализа воспользуемся матрицей сопряженности, с помощью которой будем сравнивать фактически наблюдаемые и прогнозируемые осадки и оценивать качество прогноза и проверять его соответствие действительности.

В рамках данного исследования были рассчитаны статистические показатели и получены результаты, представленные в таблицах 4.1-4.8.

Таблица 4.1 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования (GFS) и наблюдений для города Ибб

факт	да	нет	сум
ирогно			ма
3			
да	21	9	30
нет	0	0	0
сумма	21	9	30

Таблица4.2 – Оценка качества прогнозов (GFS) для г. Ибб

	Результаты	матрицы
Ибб	сопряжения	
BIAS	1.4	
FAR	0.3	
POD	1	
TS	0.7	
SR	0.7	
Точность	0.7	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События предсказываемые, которые не наблюдались = 30 %.

РОД / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемыми событиями – 0,7.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.7.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие осадков-70%.

Таблица 4.3 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования (GFS) и наблюдений для города Таиз

факт	да	нет	сумма
прогноз			
да	11	14	25
нет	1	4	5
сумма	12	18	30

Таблица 4.4- Оценка качества прогнозов (GFS) для г. Таиз

	Результаты	матрицы
Таиз	сопряжения	
BIAS	2.1	
FAR	0.56	
POD	0.9	
TS	0.42	
SR	0.44	
Точность	0.5	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказываемые, которые не наблюдались – больше, чем 50 %, и это неудовлетворительный прогноз.

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны, равно меньше, чем 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемых событиями – 0,42.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.44.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие явления – 50%.

Таблица 4.5 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования (GFS)и наблюдений для города Сана

факт прогноз	да	нет	сумма
да	13	11	14
нет	0	6	6
сумма	13	17	30

Таблица 4.6- Оценка качества прогнозов (GFS) для г. Сана

	Результаты	матрицы
Сана	сопряжения	
BIAS	1.8	
FAR	0.45	
POD	1	
TS	0.54	
SR	0.54	
Точность	0.63	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События предсказываемые, которые не наблюдались – меньше, чем 50 % .

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны равно 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных и наблюдаемых событий – 0,54.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.54.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие событий – больше, чем 60%.

Таблица 4.7— Матрица сопряжённости результатов прогнозирования (GFS) и наблюдений для города Эль-Махвит

факт	да	нет	сум
прогноз			ма
да	17	7	24
нет	2	4	6
сумма	19	11	30

Таблица 4.8- Оценка качества прогнозов (GFS) для г. Эль-Махвит

	Результаты матри	
Эль-Махвит	сопряжения	
BIAS	1.26	
FAR	0.3	
POD	0.9	
TS	0.65	
SR	0.7	
Точность	0.7	

BIAS / Относительная частота предсказанных событий больше, чем относительная частота наблюдаемых.

FAR/ События, предсказываемые, которые не наблюдались равно 30 %

POD / Наблюдаемые события, которые были правильно предсказаны – меньше, чем 1.

TS/ Степень совместимости предсказанных событий с наблюдаемыми событиями – больше, чем 60%.

SR/ Доля предсказанных и наблюдаемых событий – 0.7.

Точность/ Доля правильных прогнозов, будь наличие или отсутствие осадков – 70%.

Проанализировав результаты прогноза осадков глобальной системой прогнозирования (GFS) по сравнению с данными, фактически измеренными на станциях, теперь добавим к этому результаты прогноза, адаптированной к региону прогноза модели WRF-ARW. Результаты второго эксперимента, которые были ранее представлены в третьем главе, были выбраны для наиболее сравнения, потому ЧТО ОНИ являются точными среди экспериментов, которые проводились ранее. На рисунках 4.5 - 4.8 представлены результаты этого сравнения.



Рисунок 4.5 — Фактическое и прогностическое (GFS и WRF) количество осадков для города Ибб



Рисунок 4.6 — Фактическое и прогностическое (GFS и WRF) количество осадков для города Таиз



Рисунок 4.7 — Фактическое и прогностическое (GFS и WRF) количество осадков для города Сана



Рисунок 4.8 — Фактическое и прогностическое (GFS и WRF) количество осадков для города Эль-Махвит

Мы замечаем, анализируя графики, представленные на рисунках 4.4-4.8, что точность модели GFS, как и для модели WRF-ARW, различна для разных населённых пунктов.

Прогноз модели GFS более точен в Эль-Махвит, а на остальных станциях точность прогнозов моделями GFS и WRF близка.

Таблица 4.9— Результаты сравнения оценок прогнозов для (GFS и WRF) модель для города Ибб.

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Ибб	сопряжения (GFS)	сопряжения (WRF)
BIAS	1.4	1.31
FAR	0.3	0.27
POD	1	0.95
TS	0.7	0.7
SR	0.7	0.7

Точность	0.7	0.7	

Таблица 4.10— Результаты сравнения оценок прогнозов для (GFS и WRF) модель для города Таиз.

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Таиз	сопряжения (GFS)	сопряжения (WRF)
BIAS	2.1	1.6
FAR	0.56	0.6
POD	0.9	0.53
TS	0.42	0.33
SR	0.44	0.40
Точность	0.5	0.48

Таблица 4.11— Результаты сравнения оценок прогнозов для (GFS и WRF) модель для города Сана.

	Результаты матрицы	Результаты матрицы
Сана	сопряжения (GFS)	сопряжения (WRF)
BIAS	1.8	2
FAR	0.45	0.5
POD	1	0.83
TS	0.54	0.38
SR	0.54	0.41
Точность	0.63	0.48

Таблица 4.12— Результаты сравнения оценок прогнозов для (GFS и WRF) модель для города Эль-Махвит.

	Результаты	матрицы	Результаты	матрицы
Эль-Махвит	сопряжения (GFS)		сопряжения (WRF	7)

BIAS	1.26	1.8
FAR	0.3	0.48
POD	0.9	0.93
TS	0.65	0.50
SR	0.7	0.51
Точность	0.7	0.54

Отметим из вышеизложенного, что точность прогнозов для модели GFS является наилучшей для всех станций, которые были изучены в разных пропорциях, а точность одинакова для WRF и GFS в городе Ибб.

Из всего вышесказанного в целом отметим, что в обеих моделях станции с большей точностью по порядку является- Ибб, Аль Махвит, Сана, затем Таиз.

Заключение

В результате проведённых исследований можно выработать следующие рекомендации:

1. Необходимо использовать как можно более точные координаты станций наблюдений.

2. Необходимо включать в исследование дополнительные станции, на которых производят наблюдения за осадками. Оптимальным было бы, чтобы местоположение станции соответствовало характеру преобладающей местности. Добавление точек измерений будет способствовать повышению точности информации об осадках и, прямо или косвенно, повысит качество прогноза осадков.

3. Для будущих исследований рекомендуем сравнительное исследование ряда прогнозов различных моделей для всех станций в Йемене. В этом исследовании изучалась только модель WRF-ARW и GFS, поскольку она наиболее часто используется синоптиками Йемена.

4. Второй численный эксперимент был выбран из экспериментов, которые проводились с помощью модель WRF - ARW, которая соответствует топографии Йемена после проверки его результатов путем сравнения с данными метеорологических станций.

5. Проведенные численные эксперименты показали, что точность прогнозов между двумя моделями WRF - ARW и GFS близка, и разница между ними невелика с небольшим преимуществом модели GFS.

6. Метеорологической службе Йемена рекомендуем дальше развивать адаптированную к региону исследования модель WRF-ARW.

Список использованных источников

- Модель Advanced Research WRF, версия 4 Уильям С. Скамарок. Лаборатория мезомасштабной и микромасштабной метеорологии. Национальный центр атмосферных исследований Боулдер, Колорадо, США Opisaniye Model' Advanced Research WRF, versiya 4 Uil'yam S. Skamarok.
- Davis Christopher et al. Prediction of Landfalling Hurricanes with the Advanced Hurricane WRF Model. // Mon. Wea. Rev, 2008. – C. 136.
- 3. http://polarmet.osu.edu/PWRF // Polar Meteoropogy Group: The Polar WRF
- 4. Fei Chen et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, 33 and applications to urban environmental problems. // International Journal of Climatology Special Issue: ICUC-7 Urban Climate Meeting.Volume 31, Issue 2, pages 273–288, February 2011
- Yang Zhang, Joshua Hemperly, Nicholas Meskhidze, William C. Skamarock. The Global Weather Research and Forecasting (GWRF) Model: Model Evaluation, Sensitivity Study, and Future Year Simulation. // Atmospheric and Climate Sciences, 2012, 2, 231-253
- 6. Laprise R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as as independent/variable, Mon. Wea. Rev., 120, 197-207.
- Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM Н.Ф. Вельтищев, В.Д. Жупанов. [Электронный источник] – Режим доступа: <u>http://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/velt_zh.pdf</u> (дата обращения 30.04.2021).

- 8. Numerical Prediction and Dynamic Meteorology, 2nd Edn. By G. J. HALTINER and R. T. WILLIAMS. Wiley, 1980. 477.
- 9. <u>https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs</u>
- 10. http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html
- 11.Khvorostyanov V., Sassen, K. Cirrus cloud simulation using explicit microphysics and radiation. part ii: Microphysics, vapor and ice mass budgets, and optical and radiative properties // J. Atmos. Sci. – 1998. – Vol. 55. – P. 1822–1845.]
- 12.Wehner M.F., Reed K.A., Li F., Prabhat, Bacmeister J., Chen C.-T., Paciorek C., Cleckler P.J., Sperber K.R., Collins W.D., Gettelman A., Jablonowski C. The effect of horizontal resolution on simulation quality in the Community Atmospheric Mode, CAM5.1 // J. Adv. Model. Earth Syst. – 2014. – Vol. 6. – P. 980–997.
- 13. Sela, J., 2009: The implementation of the sigma-pressure hybrid coordinate into the GFS. NCEP Office Note #461, pp25.

Приложение А

Координаты, утвержденные Метеорологическим бюро Йемена

код	название	широта	долгота
41452	Ибб	14.00	44.20
41466	Таиз	13.41	44.08
41404	Сана	15.31	44.11
41390	Эль-Махвит	15.27	43.30

Приложение В

Данные об осадках, наблюдаемые на метеостанции в Иббе 2013 г., получены от метеорологического бюро Йемена.

Station:	IBB		Latitude:	14 ⁰ 00 [\] N
WMO Index:	41452		Longitude:	44 ⁰ 20 [\] E
Year:	2013	Annual Climatolgical Summary	Elevation:	1929m
		Daily Rainfall Total (mm)		

Dav						Mo	nth						Mean
Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	wican
1	0,0	0,0	0,0	17,5	2,7	20,7	7,0	4,8	27,9	4,9	0,0	0,0	7,1
2	0,0	0,0	0,0	3,5	2,8	0,0	0,0	8,0	5,4	0,0	0,0	0,0	1,6
3	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	0,0	1,0	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	1,3
4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	5,0	3,9	0,0	0,0	0,0	1,1
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	0,0	2,8	17,7	73,5	0,0	0,0	8,5
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,7
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	4,0	5,6	0,0	0,0	1,5
8	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	3,6	0,0	0,0	1,5
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2

10	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	14,6	10,0	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	3,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	19,5	6,3	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	30,0	0,0	0,0	9,0	0,0	3,5
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,8	0,0	0,0	13,5	0,0	1,4
14	0,0	0,0	0,0	0,0	39,0	0,0	6,3	7,7	0,0	4,0	0,0	0,0	4,8
15	0,0	0,0	0,0	0,0	18,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	1,8
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	22,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9
17	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
18	0,0	0,0	0,0	10,1	0,0	0,0	0,0	16,1	7,7	0,0	0,0	0,0	2,8
19	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	0,0	0,0	41,3	2,2	0,0	0,0	0,0	4,0
20	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
22	0,0	0,0	0,0	1,8	30,3	4,8	6,7	0,0	0,0	0,0	18,6	0,0	5,2
23	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	1,1	8,4	0,4	0,0	3,5	0,0	1,5
24	0,0	0,0	0,0	0,0	66,6	0,0	1,7	0,1	0,0	0,0	2,0	0,0	5,9
25	0,0	0,0	43,1	0,0	37,9	0,0	1,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9
26	0,0	0,0	2,7	6,7	12,5	0,0	0,0	12,1	17,0	0,0	0,0	0,0	4,3
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
28	0,0	0,0	1,5	0,0	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
29	0,0		4,4	0,0	2,7	13,7	2,3	11,6	25,3	0,0	0,0	0,0	5,5
30	0,0		0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	5,3	24,2	0,0		0,0	3,0
31	0,0		3,2		30,0		0,0	4,8		0,0		0,0	5,4
			•										
Max	0,0	0,0	43,1	17,5	66,6	20,7	19,8	41,3	27,9	73,5	18,6	0,0	8,5
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Mean	0,0	0,0	1,8	2,3	9,2	2,5	2,2	6,9	5,1	3,0	1,7	0,0	3,0

Приложение С

Данные об осадках, наблюдаемые на метеостанции в Таизе 2013 г., получены от метеорологического бюро Йемена.

Station:	TAIZ		Latitude:	13.41N
WMO Index:	41466		Longitude:	44.08E
Year:	2013	Annual Climatolgical Summary	Elevation:	1385m
		Daily Rainfall Total (mm)		

Dav	Month												Mean
Duy	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	ivicuit
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,6	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,9
2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	11,6	0,0	0,0	0,0	1,1
3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	17,6	5,8	0,0	9,6	2,1	0,0	0,0	3,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,7
5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	17,8	0,0	0,4	0,0	2,2	0,0	0,0	1,8
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6

Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Max	0,0	0,4	27,8	5,4	24,5	17,8	7,9	21,8	31,6	16,4	7,0	0,0	3,4
	I	1											
31	0,0		3,8		0,6		0,0	0,3		0,0		0,0	0,7
30	0,0		0,0	0,0	24,5	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6
29	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	1,9	15,5	0,0	0,0	0,0	2,3
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
25	0,0	0,0	11,2	0,0	22,8	0,0	2,1	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4
24	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	1,1
23	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	2,1	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	1,9
22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,1
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,2
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
19	0,0	0,0	27,8	5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,0	27,2	0,0	0,0	0,0	2,9
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	13,6	0,0	0,0	21,8	0,3	0,0	0,0	0,0	3,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	31,6	0,0	0,0	0,0	2,9
13	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,7	1,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	1,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,3	11,7	6,1	0,0	4,9	0,0	2,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,4	0,6	0,0	0,0	0,4
8	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	1,4	16,5	4,3	0,0	0,0	0,0	2,1
7	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	12,5	0,6	16,4	0,0	0,0	2,8

Приложение D

0,0

1,4

0,3

3,4

0,0

Mean

Данные об осадках, наблюдаемые на метеостанции в Сане 2013 г., получены от метеорологического бюро Йемена.

1,0

2,8

3,9

0,8

0,5

0,0

1,4

2,1

Station:	SANA'A		Latitude:	15.31N
WMO Index:	41404		Longitude:	44.11E
Year:	2013	Annual Climatolgical Summary	Elevation:	2190m
		Daily Rainfall Total (mm)		

Dav	Month												
Duj	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	moun
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
3	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------------	---------	-----	-----	------	-----	-----
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	1,6	0,0	0,0	0,0	0,5
8	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	24,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
15	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
17	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	4,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
18	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
20	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	4,6	0,0	0,6
21	0,0	0,0	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
22	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1	0,0	1,1
23	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
25	0,0	0,0	0,2	8,3	0,0	0,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
26	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
27	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
28	0,0	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
29	0,0		1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
30	0,0		0,5	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
31	0,0				0,0		3,1	0,0		0,0		0,0	0,5
	0.0	0.0	10.1	0-	0.0	• •	<i>c</i> ^	<u></u>		0.0	101	0.0	
Max	0,0	0,0	13,1	9,5	9,8	2,8	6,0	24,7	1,6	0,0	12,1	0,0	2,2
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mean	0,0	0,0	0,7	1,1	0,5	0,1	0,8	1,8	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

Приложение Е

Данные об осадках, наблюдаемые на метеостанции в Эль-Махвите 2013 г.,

получены от метеорологического бюро Йемена.

Station:

ALMAHWET

Latitude: $15^{0}27$ N

WMO Index:	41390
Year:	2013

Annual Climatolgical Summary

Longitude: $43^{0}30^{1}E$

Elevation:

2078m

Daily Rainfall Total	(mm)
----------------------	--------

Day	Month												Moon
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	wicali
1	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	10,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
2	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	18,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1
4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	5,0	6,0	0,5	0,0	0,0	0,0	1,5
5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	6,4	0,0	5,5	16,0	0,0	0,0	2,4
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	6,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,7
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1
8	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	1,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	9,9	0,0	3,4	2,6	0,0	0,0	1,9
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
12	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,2	9,8	0,0	0,0	1,0	0,0	1,1
13	0,0	0,0	0,0	1,3	8,6	0,0	0,0	8,8	0,0	15,8	0,0	0,0	2,9
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
16	0,0	0,0	0,0	8,0	9,0	0,4	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	3,0	2,5
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	4,4	0,0	0,0	0,0	1,1
19	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,7
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
22	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,7
23	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	7,8	0,0	1,0
24	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	6,7	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
25	0,0	0,0	0,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,2
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2	0,0	0,0	0,0	1,3
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
29	0,0		6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
30	0,0		5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5
31	0,0		4,0		8,0		0,0	0,9		0,0		0,0	1,8
	0.0	0.0	6.0	10.0	0.0		0.0	46.5		1.0			•
Max	0,0	0,0	6,9	10,0	9,0	16,2	9,9	18,2	9,2	16,0	7,8	3,0	2,9
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mean	0,0	0,0	0,7	1,1	1,2	1,5	1,5	2,9	1,0	1,1	0,4	0,1	1,0

Приложение F

```
Скрипт для загрузки прогнозируемых данных об осадках
```

integer,parameter :: NX=269,NY=179,NT=5

real,dimension (NX,NY) :: XLAT,XLON

real,dimension (NX,NY,NT) :: RAINC,RAINNC,RAINSH

real,dimension (NX,NY,24) :: F24

real,dimension (NX,NY,34) :: F34

```
real,dimension (NX,NY,4) :: F4
```

```
real,dimension (NX,NY,1) :: F1
```

```
character*2,dimension (NT) :: SROK=(/'00','06','12','18','24'/)
```

```
character*14 nameFILE
```

real M

```
integer ReclZap
```

```
ReclZap=NX*NY*24*29+NX*NY*34*2+NX*NY*4*4+NX*NY*84
```

```
open(55,file='./forecast/list.txt')
```

```
do while(.not.EOF(55))
```

read(55,'(a14)') nameFILE

open(3,file=nameFILE(1:10)//'rain_IBB.dat')

```
open(1,file='./forecast/'//nameFILE,form='unformatted',access='direct',convert='big_endian',recl=ReclZap
)
```

```
write(*,*) nameFILE
```

```
do it=2,NT ; !write(*,*) it
```

read(1,rec=it)

```
(F24,i=1,3),(F1,i=1,4),F24,(F1,i=1,4),F24,F24,F1,(F24,i=1,8),XLAT,XLON,F1,F1,F34,F34,(F24,i=1,5),(F1,i=1,3), &
```

C(:,:,it)

enddo

close(1)

```
!open(2,file='LATLON.dat')
```

!write(2,'(2i7,2F10.3)') ((i,j,XLAT(i,j),XLON(i,j),i=1,NX),j=1,NY)

!close(2)

!do i=1,NX

!do j=1,NY

!if(XLAT(i,j)>13.9.and.XLAT(i,j)<14.1) then

if(XLON(i,j)>44.1.and.XLON(i,j)<44.3) then

!XLAT_IBB=XLAT(i,j)

!XLON_IBB=XLON(i,j)

```
!write(*,*) i,j,XLAT(i,j),XLON(i,j)
```

!endif

!endif

!enddo

!enddo

 $i_{IBB}=42$

```
j_IBB=72
```

do it=2,NT

write(3,'(a7,4f10.2)')

srok(it),RAINC(i_IBB,j_IBB,it),RAINSH(i_IBB,j_IBB,it),RAINNC(i_IBB,j_IBB,it),RAINC(i_IBB,j_IB B,it)+RAINSH(i_IBB,j_IBB,it)+RAINNC(i_IBB,j_IBB,it)

enddo

enddo

stop

end

Приложение G

Скрипт для сравнения предсказанных данных с наблюдаемыми данными.

real,dimension (31) :: RAINforecast,RAINfact

character*25 nameFILE

open(11,file='IBB.dat')

read(11,'(/////)')

do iday=1,31

read(11,*) iid,f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,RAINfact(iday)

enddo

close(11)

!open(2,file='IBB_fact-forecastSUM2.dat')

!open(55,file='listIBB.txt')

!iday=1

!do while(.not.EOF(55))

- ! read(55,'(a22)') nameFILE
- ! open(1,file=nameFILE)
- ! write(*,*) nameFILE
- ! read(1,'(//)')
- ! read(1,*) ii,f1,f2,f3,RAINforecast(iday)
- ! close(1)

! write (2,*) name FILE (1:10), RAIN forecast (iday), RAIN fact (iday), RAIN forecast (iday) - RAIN fact (iday), RAIN forecast (id

! iday=iday+1

!enddo

!close(55)

```
open(2,file='IBB_fact-forecastCONV2.dat')
```

```
open(55,file='rain_IBB2.dat')
```

iday=1

```
do while(.not.EOF(55))
```

```
!read(55,'(37x,f10.2)') RAINforecast(iday) ; write(*,*) iday, RAINforecast(iday)
```

read(55,*) iii,r,r,r,RAINforecast(iday) ; write(*,*) iday, RAINforecast(iday)

```
write(2,'(i9,3f10.4)') iday,RAINforecast(iday),RAINfact(iday),RAINforecast(iday)-RAINfact(iday)
```

iday=iday+1

enddo

close(55)

stop

end