

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное
государственное образовательное учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
УДК 551.509.324.2

Маддах Мохаммад Амин

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
СТРУКТУРЫ ОСАДКОВ В РАЙОНАХ ИРАНА СО
СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЬЮ WRF-ARW**

Специальность 25.00.30 —
«Метеорология, климатология и агрометеорология»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
Доктор географических наук, профессор
Русин Игорь Николаевич

Санкт-Петербург — 2018

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Особенности климатических условий юго-запада Ирана	10
1.1 Краткая физико-географическая характеристика и термический режим юго-западного Ирана	10
1.2 Барико-циркуляционный режим юго-западного Ирана	16
1.3 Климатология осадков над территорией юго-запада Ирана	22
1.4 Количественные характеристики сильных осадков юго-западного Ирана	31
Глава 2. Гидродинамическое моделирования атмосферных процессов над территорией юго-запада Ирана	42
2.1 Модели и их использование для прогноза атмосферных осадков .	42
2.2 Краткое описание мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы WRF	44
2.3 Опыт использования численных моделей в прогнозах и исследованиях	47
Глава 3. Адаптация модели WRF-ARW для юго-запада Ирана .	53
3.1 Локализованная модель WRF-ARW	53
3.2 Общая настройка модели по всем экспериментам	59
3.3 Методы верификации	63
Глава 4. Моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана	68
4.1 Оптимизация набора схем параметризации модели для юго-запада Ирана	69
4.2 Влияние размера и структуры доменов на качество прогнозов . .	81
4.3 Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков	88
Заключение	103

	Стр.
Список сокращений и условных обозначений	107
Список литературы	108
Список рисунков	125
Список таблиц	129
Приложение А. Система уравнений WRF	131
Приложение Б. Список станций на юго-западе Ирана	133

Введение

Актуальность темы исследования. Исламская Республика Иран расположена в среднеширотном поясе. В её юго-западной части находится провинция Хузестан (30° — 33° широта, $47,7^{\circ}$ — $50,5^{\circ}$ долгота), которая является одной из 31 провинции Ирана. Провинция Хузестан в настоящее время является важнейшей зоной для экономики страны. Она богата нефтью, газом, водными ресурсами и плодородными землями.

Наиболее опасными явлениями для этого региона являются сильные дожди (ливни), вызывающие катастрофические наводнения. Прогноз распределения количества осадков по территории и особенно правильное описание распределения осадков по водосборам горных рек представляет особый интерес для лиц, принимающих решения (например, руководителей водного хозяйства, земледельцев, промышленников, климатологов и т. д.). Она также важна для жизни и деятельности человека. Изменения климата делают оценку опасных осадков в будущем одной из основных проблем в области планирования водоснабжения и управления рисками наводнений.

Однако в районах со сложной орографией такую оценку осадков очень трудно получить. Единственным разумным по затратам методом для этого является численное моделирование атмосферных процессов на основе гидродинамических моделей, заслуживших репутацию наиболее надёжных и испытанных в разных условиях. Применение гидродинамической модели атмосферы адаптированной к особенностям области интегрирования даёт возможность корректно моделировать поля метеорологических величин, а, следовательно, и хорошо их прогнозировать.

В настоящее время наибольшее распространение среди специалистов по прогнозу погоды получила мезомасштабная гидродинамическая модель Weather Research and Forecasting (WRF-ARW), разработанная коллективом высоко квалифицированных авторов (NCAR, NOAA, Военно-морская исследовательская лаборатория, ВВС США, Университет штата Оклахомы США), неоднократно апробированная в различных гидрометеорологических центрах мира и доступная свободно любому исследователю. Эта модель сопровождается специализированным препроцессором для настройки прогноза на исходные данные, подготовленные в крупных метеорологических центрах. Кроме того,

каждый исследователь имеет огромный спектр возможностей для адаптации модели к новому району, многоуровневой телескопизации результатов, выбора наилучших методов параметризации подсеточных процессов из нескольких тысяч возможных вариантов.

Всё это в сочетании с непрерывным совершенствованием делает модель WRF-ARW удобным, полезным, но и очень сложным инструментом для совершенствования метеорологических прогнозов в различных районах Земли. Эта модель применяется гидрометеорологической службой Ирана по всей территории, но для повышения качества прогноза осадков по территории экономически важной провинции Хузестан требуются дополнительные исследования модели WRF-ARW применительно к этому географическому объекту. Из сказанного следует, что тематика работы является актуальной и имеет большое практическое значение.

Объектом исследования в диссертации является территория юго-западного Ирана и, главным образом провинция Хузестан. **Предметом** исследования являются особенности распределения атмосферных осадков различных градаций интенсивности по рассматриваемой территории. Основными **методами** исследования являются статистический анализ данных наблюдений и расчетов, а также динамическая интерполяция осадков с помощью численной модели WRF-ARW.

Целью диссертационной работы является моделирование и прогноз полей атмосферных осадков на территории юго-западной части Ирана.

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

1. Собрать весь доступные данные о количестве и пространственном распределении осадков по территории юго-западного Ирана. Выбрать информацию о случаях выпадения особо сильных осадков, которая будет использована в численных экспериментах.
2. Путём расчёта и анализа функций распределения наблюдаемых осадков, получить значения интенсивности опасных осадков для каждой станции и построить карты распределения осадков опасной градации.
3. Адаптировать общедоступную гидродинамическую мезомасштабную модель прогноза погоды WRF-ARW для территории юго-западного Ирана. Выбрать наилучшую конфигурацию модели WRF-ARW путём

- подбора набора параметризаций, дающего наибольшую точность прогноза сильных для первоначально заданных доменов.
4. Исследовать чувствительность прогноза осадков к изменению положения и конфигурации доменов, а также к шагу сетки родительского и вложенных доменов
 5. Получить оценки точности прогноза осадков различных градаций в оптимизированном варианте модели для территории юго-запада Ирана.

Научная новизна. В процессе выполнения исследования атмосферных процессов на территории со сложной орографией были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые на основе всего доступного материала наблюдений различными сетями сбора данных получены оценки эмпирических и теоретических функций распределения осадков по градациям интенсивности. На основе этого построены карты опасного количества осадков на территории юго-западного Ирана. Эти результаты, важные для климатологии и организации водохозяйственных работ, послужили основой для сравнения с количеством осадков, рассчитанных по модели WRF-ARW.
2. Впервые произведена тщательная адаптация гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW для территории юго-западного Ирана, в процессе которой использованы практически все, согласующиеся с рельефом и климатом варианты конфигурации модели.
3. Впервые исследовано влияние набора параметризаций на точность прогноза количества и распределения осадков разных градаций по рассматриваемой территории. На основе анализа результатов показано, что для этого горного района оптимальный набор параметризаций отличается от таких наборов для других горных территорий, изученных в работах разных исследователей.
4. Исследовано влияние конфигурации доменов модели WRF-ARW и соотношения их шагов на результаты моделирования распределения осадков различной интенсивности по исследованной территории. Подтверждён вывод о том, что на данном этапе развития модели WRF-ARW оптимальный шаг сетки составляет 5-6 км. Применение более мелкого шага сопровождается падением точности прогноза.

5. Впервые проведены численные эксперименты по моделированию случаев особо сильных ливней на исследуемой территории. Получены оценки точности прогнозов количества и распределения осадков различной интенсивности по территории юго-западного Ирана.

Научная и практическая значимость результатов:

- Полученные результаты показывают, что применение гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW для проведения исследований атмосферных процессов над территорией со сложной орографией требует детальной настройки всех параметров и не только таких, как набор схем параметризации, но также количество и конфигурация доменов, в которых решаются прогностические уравнения, шаги вложенных сеток.
- Показано, что за счёт детального подбора всех возможных входных характеристик модели можно достичь достаточно высокой точности моделирования осадков по территории. Например, осадки средней интенсивности могут рассчитать с 90 % точностью. Это значит, что появляется возможность получать адекватное описание распределения сильных осадков по водосборам, что необходимо для прогноза паводков.
- Показано, что в существующем варианте модели WRF-ARW с прилагаемым набором параметризаций приходится смириться с тем, что слабые осадки будут преувеличены (иногда в 3 раза). Это значит, что в дальнейшем нужно обратиться к совершенствованию параметризаций микрофизики облаков и конвекции. Проведённые исследования послужат основой для создания системы прогнозирования распределения количества сильных ливней по водосборам и вызываемых ими паводков на территории юго-западного Ирана.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты статистического анализа показывают, что средние значения суточного количества осадков зависят от высоты станции, тогда как максимальные значения от высоты станции не зависят.
2. Наиболее подходящими законами распределения вероятностей для описания ежедневных сумм осадков в районе исследования является распределение Вейбулла и логарифмически нормальный закон. Однако оба они дают значительные расхождения с эмпирическим распределением в области больших значений количества осадков. Для определения экстремальности осадков самым оптимальным является

- индекс $R_T90\%$, который позволяет определить вклад экстремальных осадков в общее их количество.
3. Анализ воспроизведения поля сильных осадков в численных экспериментах показал, что для территории со сложным рельефом модель WRF-ARW более чувствительна к схемам параметризации конвекции, чем к схемам параметризации микрофизики облаков.
 4. Преимущество более высокого пространственного разрешения (1–2 км) не очевидно. Показано, что качество моделирования осадков значительно и нелинейно зависит от разрешения модели. Важен не только выбор шага сетки наименьшего домена, принятого для получения окончательного результата моделирование, но и разрешение материнских сеток. Отсутствие домена с высоким пространственным разрешением (1–2 км) в случае двухстороннего взаимодействия вложенных сеток оказывает положительное влияние на изучаемый домен.
 5. Слабые и умеренные осадки (меньше 15 мм/сутки) лучше воспроизводятся при отключении параметризации конвекции. Включение этой параметризации особенно сильно повлияло на улучшение качества прогнозов осадков в градации очень сильных осадков.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой математической постановкой задачи, использованием апробированной модели гидродинамического прогноза, корректным использованием методов оценки гидродинамического моделирования, корректным использованием метеорологических и общегеографических данных для формирования исходной информации, а также тем, что полученные результаты согласуются с результатами других независимых исследований по данной тематике. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в российских и зарубежных изданиях, а также выступлениями с докладами перед научной общественностью России и Ирана.

Личный вклад автора заключается в формулировке целей и постановке задач исследования, обосновании выбора теоретических и расчётных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Автор устанавливал гидродинамическую модель WRF-ARW и адаптировал её к территории юго-западного Ирана, создавал скрипты постпроцессинга для обработки результатов и оценки их точности, проводил анализ особенностей климата юго-западного Ирана для выбора критериев сравнения

опасных осадков, планировал и проводил численные эксперименты по оптимизации схем параметризации, обрабатывал данные численных экспериментов и анализировал их, подготавливал материалы докладов и публикаций, формулировал выводы и заключения по работе, разрабатывал рекомендации для практического использования. Все выносимые на защиту положения основаны на результатах исследований, проведённых автором самостоятельно.

Апробация результатов. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на семинарах кафедр климатологии и мониторинга окружающей среды СПбГУ (2015 — 2017 гг.) и метеорологических прогнозов РГГМУ (2017 г.);
- в виде доклада на совещании в «Khuzestan Water and Power Authority» при Министерстве энергетики Ирана, г. Ахваз, 2017 г.;
- на ежегодных конференциях Иранских студентов в России. г. Санкт-Петербург (2016 г.) и г. Екатеринбург (2017 г.);
- на III национальной конференции «по вопросам здравоохранения, окружающей среды и устойчивого развития», Hormozgan University, Bandar Abbas, 2014.

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 3 научные работы, в том числе 2 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1—в высокорейтинговом зарубежном издании (*Scopus*).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 136 страниц, включая 28 рисунков и 18 таблиц. Список литературы содержит 161 наименование, из которых 147 — иностранные.

Глава 1. Особенности климатических условий юго-запада Ирана

1.1 Краткая физико-географическая характеристика и термический режим юго-западного Ирана

Исламская Республика Иран расположена в среднеширотном поясе. В её юго-западной части находится провинция Хузестан ($30^{\circ} - 33^{\circ}$ широта, $47,7^{\circ} - 50,5^{\circ}$ долгота), которая является одной из 31 провинции Ирана. Площадь провинции — 64 тыс. км², что составляет 3,8 % площади Ирана и превышает площади большинства европейских государств [1]. В ней проживают около 4 миллиона человек (Рисунок 1.1). Провинция Хузестан в настоящее время является важнейшей зоной для экономики страны. Она богата нефтью, газом, водными ресурсами и плодородными землями.

Физико-географическое строение Хузестана разнообразно. В нем представлены как равнинные ландшафты на юге, так и горные в северных районах провинции. Топографические высоты в провинции варьируются от 0 до 3740 м.

Северная, восточная и северо-восточная части провинции, гористые, окружены горами Загрос, которые представляет собой ряд параллельных горных цепей, постепенно увеличивающихся по высоте до 5000 м по мере удаления от моря. Высота заключённых между горными цепями долин, тоже постепенно по мере удаления от моря. Юго-западная часть провинции – низменная.

Большая часть территории Хузестан расположена на Хузестанской равнине, которая является одной из двух обширных низменностей в Иране. Хузестанская равнина является продолжением Месопотамской равнины и уходит вглубь Иранской территории на 120–160 км, а затем прерывается цепью гор Загрос. Высота региона на всей территории равнины не превышает 3-5 метров над уровнем моря.

С юга регион омывается водами Персидского залива. Влага, поступающая от Персидского залива, обычно запирается в горах Загрос. Кроме того, эта горная цепь, которая простирается с северо-запада на юго-восток, является источником нескольких крупных рек, таких как Кархех, Дез, Джарахи, Арванд Руд и Карун (крупнейшая и судоходная река в Иране). В этих реках Хузестана содержится более 30 % всех поверхностных водных ресурсов страны.

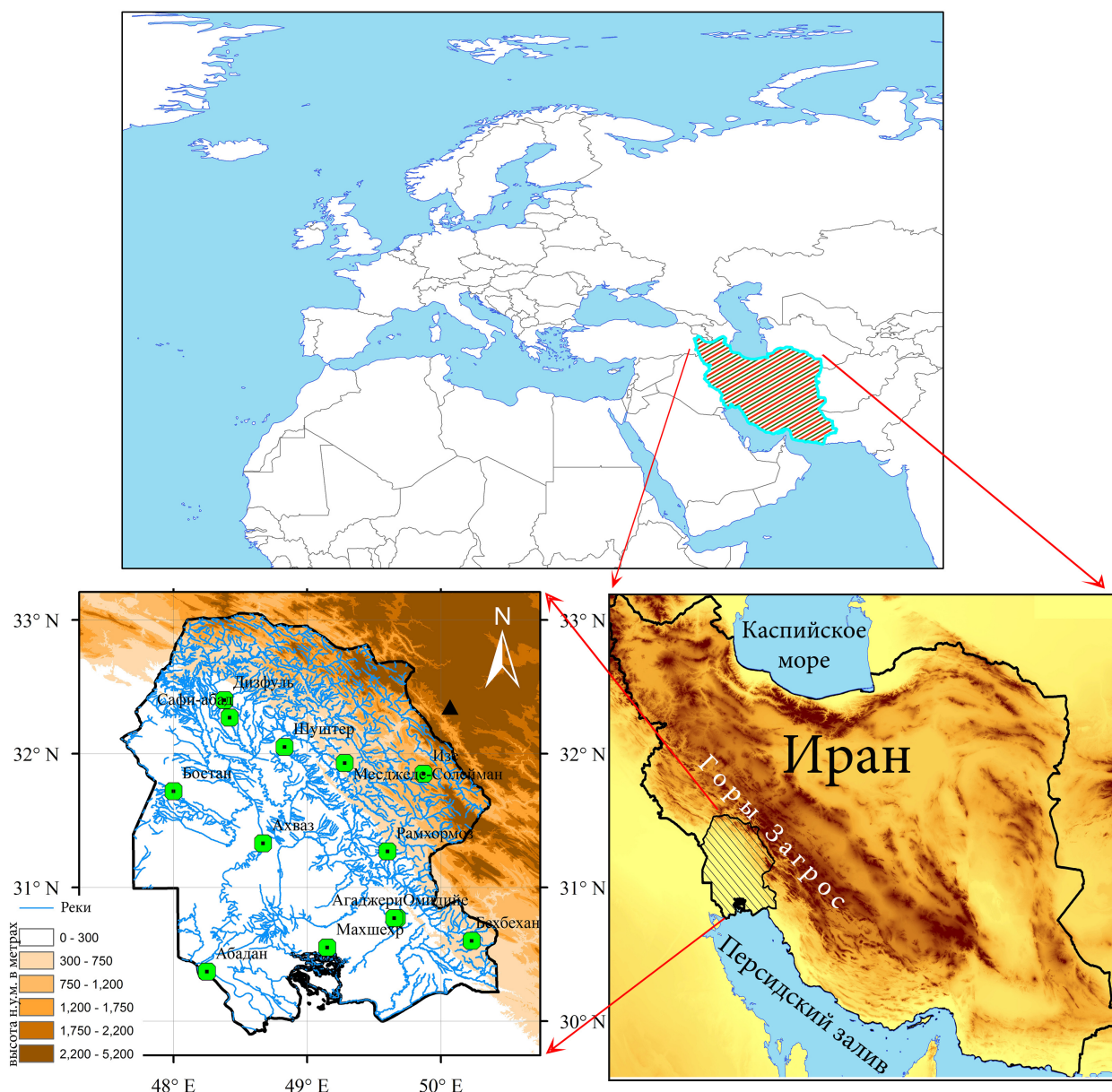


Рисунок 1.1 — Расположение Хузестана на карте мира и место расположения 13 метеостанции, данные которых использовались в данной главе

Низменные районы получают поверхностные воды из этих бассейнов, поэтому они играют большую роль в сельскохозяйственном производстве, являясь основой для ирригации.

Предгорья Загрос расположены недалеко от побережья Персидского залива, и состоят из известняка и соли. Поэтому воды рек, которые протекают через них, в основном солёные и известковые.

В Иране организации, ответственные за сбор метеорологических данных при публикации обновлённых данных создают запаздывание на 3–5 лет от времени наблюдений. Более того, многие данные станций в Иране имеют

существенные разрывы, что приводит к многочисленным проблемам низкого качества и неоднородности. Краткость климатологических рядов создают существенные трудности в работе с данными, поскольку станций с самыми длинными рядами очень мало, и они редко распределены по всей стране.

В разделах 1.1 по 1.3, чтобы дать общие сведения о климатических условиях, т.е. о температурном, барическом режиме, а также о режимах ветров и осадков по месяцам и сезонам, в провинции Хузестан, в качестве исходных данных, использовались материалы метеорологических наблюдений в период 1994–2010 гг. Для первого этапа исследований отобраны 13 станций, равномерно распределённых по всей территории Хузестана. А в разделе 1.4 для второго этапа исследований с целью оценки функций распределения осадков по исследуемой территории использованы дополнительно станции, перечисленные в таблице 1. В этой таблице представлены также сведения о географических координатах отобранных станций, высотах над уровнем моря и продолжительности наблюдений.

Согласно рекомендациям ВМО [2] перед анализом все временные ряды было проверены на однородность и отбракованы данные со станций, которые были признаны нерепрезентативными.

Общеизвестно, что определяющим фактором для всех атмосферных процессов служит тепловой режим атмосферы, а, следовательно, важнейшим элементом, характеризующим погоду и климат, является температура воздуха. Термический режим региона формируется под влиянием разномасштабных факторов. Крупномасштабными факторами, которые определяются геофизическими особенностями, являются циркуляционный и радиационный режимы, свойства подстилающей поверхности. Мезо- и микроособенности связаны с влиянием мезо- и микрорельеф, характера растительности и почв, близостью водоёмов. Всё вместе приводит к сложному пространственно-временному распределению температуры.

Средние месячные и годовые температуры воздуха являются основной характеристикой термического режима местности. Было рассчитано и проанализировано по данным 13 станций (таблица 1, первый этап) распределение многолетней годовой температуры воздуха по территории Хузестана за период 1994–2010 гг. Результаты приведены в таблице 2. Среднегодовая температура по всей территории меняется от $21,1^{\circ}$ (Изе) до $26,8^{\circ}\text{C}$ (Рамхормоз). Как видно из последнего столбца таблицы 2 и рисунка 1.2, многолетняя средняя

Таблица 1 — Информация о пунктах наблюдения, данные которых использованы для исследования в настоящей главе.

№ станций, отобранные для этапа:	Станция	Высота над ур. морья (м)	Координаты		Начало наблю- дений (год)	Длина ряда (в годах)
			первого	второго		
			°с.	ш. °в. д.		
1	1	Абадан	7	30,37 48,25	1951	60
2		Агаджери	27	30,77 49,67	1984	27
3	2	Ахваз	22	31,33 48,67	1953	58
4	3	Бехбехан	313	30,6 50,23	1993	18
5		Бостан	8	31,72 48	1986	25
6	4	Дизфуль	143	32,4 48,38	1963	48
7	5	Изе	767	31,85 49,87	1993	18
8		Махшехр	6	30,55 49,15	1987	24
9	6	Месджеде- Солейман	320	31,93 49,28	1985	26
10	7	Омидийе	35	30,77 49,65	1984	27
11	8	Рамхормоз	150	31,27 49,6	1987	24
12		Сафи-абад	83	32,27 48,42	1987	24
13		Шуштер	67	32,05 48,83	1994	17

годовая температура воздуха повсеместно положительна и имеет более низкие значения на востоке, северо-востоке (станция Изе), чем в других регионах провинции. Эти изменения обусловлены особенностями рельефа и высотой места, режимом облачности и радиации. Наряду с радиационными и циркуляционными факторами необходимо учитывать характер подстилающей поверхности. Из проведённого анализа можно сделать вывод о том, что на территории провинции ввиду больших разностей высот (между Хузестанской равниной и горами Загроса) влияние рельефа на микроклиматический режим оказывается преобладающим.

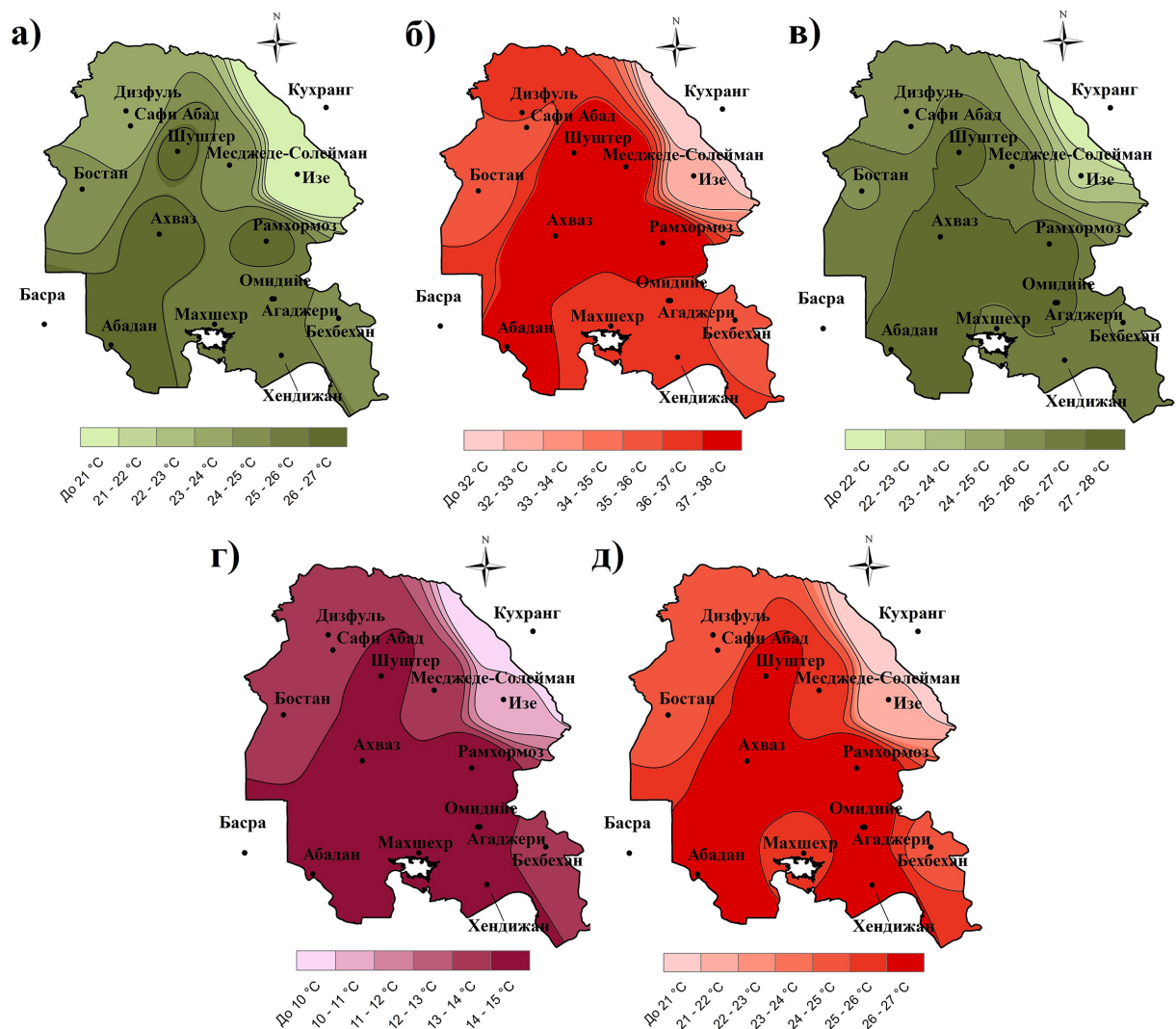


Рисунок 1.2 — Средняя температура (°C) воздуха. а—весна, б—лето, в—осень, г—зима, д—год

Метеостанция Изе расположена на северо-востоке провинции (на высоте 767 м) и поэтому температура в этом регионе заметно ниже, чем в более южных и западных регионах. Для каждого сезона года построены средние многолетние

карты (осреднение проводилось за период 1994–2010 гг.). Осенью и весной изотермы направлены с севера и северо-востока на юго-запад, а летом и зимой происходит перестройка термического поля – центральные и южные территории Хузестана характеризуются почти одинаковыми температурами.

Как видно из анализа таблицы 2, чётко прослеживается годовой ход температуры воздуха. Она быстро возрастает с февраля до мая в связи с увеличением продолжительности дня и приходящей солнечной радиации. В январе – самом холодном месяце года – средняя многолетняя температура воздуха повышается с северо-востока на юг-запад провинции от $9,4^{\circ}\text{C}$ (Изе) до $13,3^{\circ}\text{C}$ (Абадан). Затем температура незначительно повышается в феврале (примерно на 2°C). С апреля по октябрь среднемесячные значения температуры не опускаются ниже 20°C . В летний период температурные различия между месяцами не столь значительны. Самым тёплым месяцем года является июль.

Среднегодовое значение максимальной летней температуры в провинции Хузестан составляет около 50°C (в июле), а минимальной зимней температуры – 9°C (в марте). Согласно результатам, приведённым в таблице 2, будем считать, что жаркий период в Хузестане продолжается с апреля по октябрь, а относительно холодный – с ноября по март.

Результаты подобных исследований температурного режима Хузестана приведены в работе Переведенцев и др. [3], в которой проанализирована температура за более длительный период (1948–2013 гг.). Результаты данного исследования полностью согласуются с результатами Переведенцев и др. [3]. Также по среднемесячным значениям температуры оценили её межгодовую изменчивость, обусловленную циркуляцией атмосферы, облачностью и др. Получено, что изменчивость незначительна и однородно распределена по территории региона. Наибольшие значения межгодовой изменчивости характерны для декабря, наименьшие – для июля. В общем, в зимние месяцы изменчивость от года к году значительно больше, чем в летние.

Согласно работе Переведенцев и др. [3] годовой ход средних минимумов и максимумов температуры аналогичен годовому ходу средней месячной температуре, поскольку определяется одними и теми же особенностями региона (радиационными и циркуляционными процессами, особенностями подстилающей поверхности). Естественно, что средняя месячная температура связана со средней экстремальной. Разброс значений температуры (разность между экстремумами) на территории Хузестана сравнительно невелик в – декабре $6,1$

-8,2°C, а в летние месяцы 2,2 – 4,3°C, что заметно меньше, чем в высоких и умеренных широтах Северного полушария.

Переведенцев и др. [3] для выделения систематической составляющей изменений температуры рассчитали наклон линейного тренда для всех метеостанций для всех месяцев. Оказалось, что с наибольшей скоростью происходит повышение температуры в августе (до 0,71°C/10лет) на ст. Ахваз, что объясняется местными условиями [3].

1.2 Барико-циркуляционный режим юго-западного Ирана

Существует общее мнение о том, что глобальный климат подвергается заметным изменениям, что приводит к повышенной влажности в атмосфере и, следовательно, к усиленным гидрологическим циклам [4]. Более частые случаи чрезвычайных осадков на значительной части суши были отмечены в 4-ом и 5-ом докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата [5], [6].

Погодные и климатические условия любого района Земли в большей степени определяются атмосферной циркуляцией – системами воздушных течений, охватывающих значительные по площади географические районы.

Климат Хузестана засушливый. В летний период осадки практически отсутствуют. В зимний период на климат Хузестана оказывают влияние вторжения холодных масс воздуха из системы Сибирского антициклона, со стороны запада сказывается влияние Азорского антициклона, при обтекании потоками возвышенности Загрос возникают ливни [3].

Барико-циркуляционный режим юго-запада Ирана формируется под влиянием обширной Азиатской депрессии в летний период и отрога Сибирского антициклона в зимний. Циркуляция определяется движением воздушных потоков в субтропических антициклонах. Территория Хузестана находится под воздействием воздушных масс, формирующихся над пустынями Аравийского полуострова, а также поступающих из центральной части Ирана и со стороны Индийского океана [3].

Неравномерность в распределении давления формируется факторами термического и динамического характера, которые действуют совместно и

Таблица 2 — Средняя месячная и годовая температура воздуха (°C) для станций Хузестана за период 1994–2010 гг.

Станции	Месяцы												Год	Амплитуда
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Абадан	13,3	15,8	20,5	26,3	32,6	36,4	37,7	37,7	33,7	28,6	20,3	14,7	26,5	24,4
Агаджери	13,1	15,6	19,9	26	32,2	35,8	37,5	37,3	33,1	28,2	20,1	14,7	26,1	24,4
Ахваз	13,2	15,7	20	26,1	32,5	36,4	38,3	38,1	33,8	28,6	20,4	14,7	26,5	25,1
Бехбехан	12	14,2	18	23,9	30,5	34,7	36,6	36,2	31,8	26,7	18,9	13,9	24,8	24,6
Бостан	12,1	14,1	18	23,9	30,5	34,7	36,6	36,2	31,8	26,7	18,9	13,9	24,8	24,5
Дизфуль	11,8	13,7	17,4	23,3	30,2	35	37	36,8	32,1	26,6	18,9	13,7	24,7	25,2
Изе	9,4	10,9	13,7	18,6	25	30,4	33,3	32,8	28,7	23,4	16,1	11,4	21,1	23,9
Махпехр	13,3	15,5	19,7	25,8	32	35,4	37,2	36,6	32,7	28,1	20	14,4	25,9	23,9
Месджеде-Солейман	12,2	14,2	18,3	24,3	31,3	36,1	38,2	38	33,5	28	19,6	14,3	25,7	26
Омидийе	12,7	15,1	19,4	25,6	32,1	35,9	37,6	37,5	33,3	28,3	19,9	14,4	26	24,9
Рамхормоз	13,3	15,6	19,8	25,9	32,7	36,9	38,6	38,5	34,6	29,4	20,8	15,2	26,8	25,3
Сафи Абад	12,5	13,9	17,1	22,9	29,6	34	36,1	35,7	31	26,3	19	14,3	24,4	23,6
Шуштер	13,1	15,3	19,9	26	32,7	36,8	38,6	38,4	34,1	29,3	20,8	15	26,7	25,5
Среднее	12,5	14,6	18,6	24,5	31,1	35,3	37,2	36,9	32,6	27,6	19,5	11,4	3,3	24,7
Максимум	13,3	15,8	20,5	26,3	32,7	36,9	38,6	38,5	34,6	29,4	20,8	15,2	26,8	26
Минимум	9,4	10,9	13,7	18,6	25	30,4	33,3	32,8	28,7	23,4	16,1	11,4	21,1	23,6

определяют наблюдаемое в действительности распределение давления. Над холодными поверхностями создаются условия, благоприятные для повышения давления вблизи земной поверхности, а над нагретыми наоборот – для понижения. Действие динамических факторов проявляется в нагнетании воздуха и повышении давления в одних районах и оттоке воздуха, и понижении давления в других.

Структура барического поля над данной территорией в различные сезоны характеризуется определённым преобладающим направлением изобар. По данным метеорологических станций (таблица 1, первый этап) проанализировано поле давления (Рисунок 1.3, таблица 3).

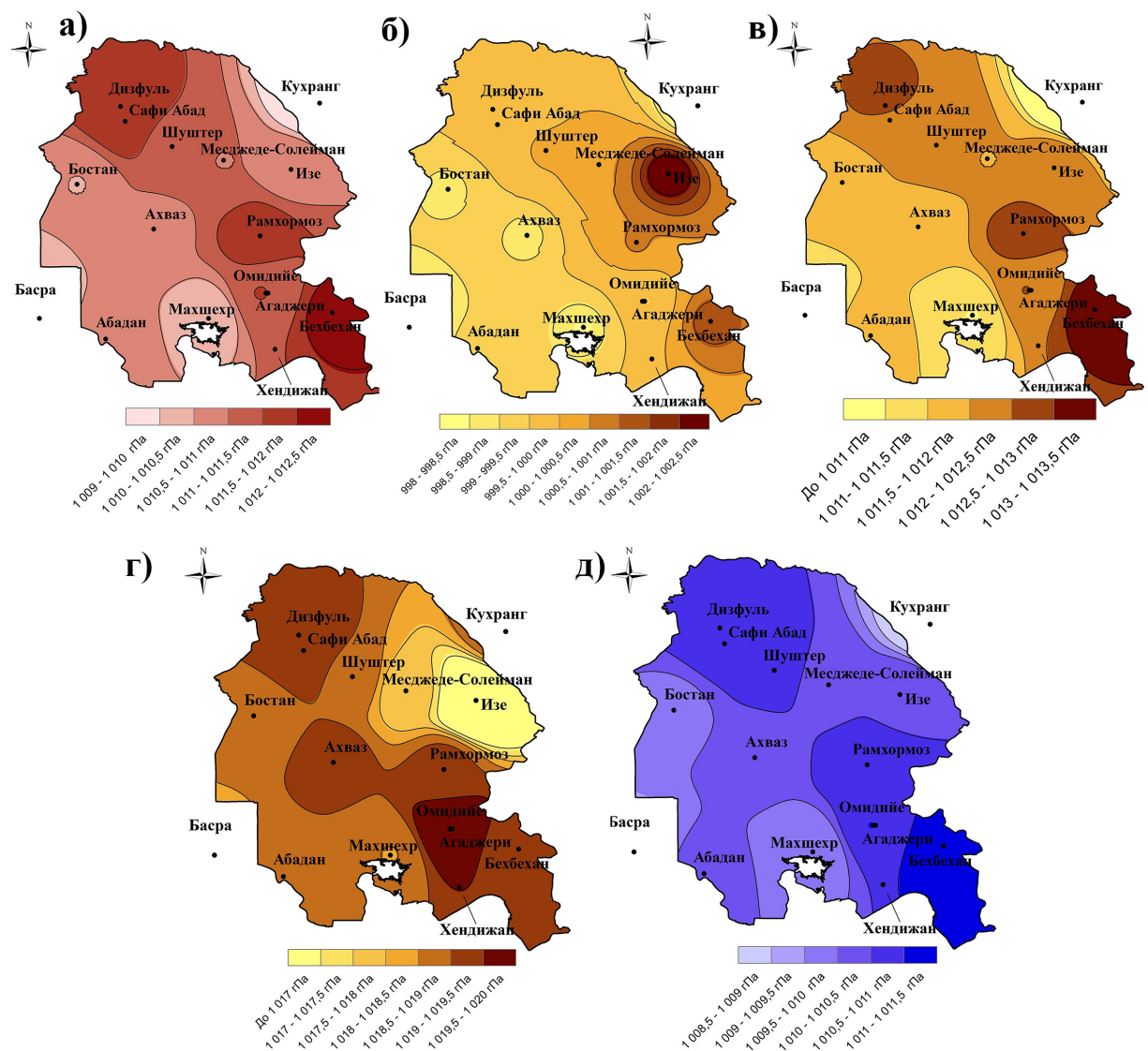


Рисунок 1.3 — Атмосферное давление (гПа) на уровне моря. а—весна, б—лето, в—осень, г—зима, д—год

В таблице 3 приведено среднее и экстремальное атмосферное давление, переведённое к уровню моря за период 1994–2010 гг. Из представленных данных видно, что на всей территории наблюдается хорошо выраженный годовой ход атмосферного давления с максимальными значениями в январе–декабре и минимальными в июле.

Режим ветра в основном определяется сезонными особенностями структуры барического поля согласно барическому закону ветра, а также высотой и формой рельефа, характером подстилающей поверхности, наличием затеняющих элементов. В среднем за год на высоте 10 м от земной поверхности, по данным за 1994–2010 гг., как показано на рисунке 1.4, преобладающим направлением ветра на территории провинции Хузестан является западное, его вероятность составляет около 36 %. При этом, повторяемость северо-западного направлений ветра составляет около 32 %. Роза ветров приведена для среднегодовых значений. В отдельные сезоны отличие от данных, приведённых на рисунке 1.4, незначительно и не превышает нескольких процентов.

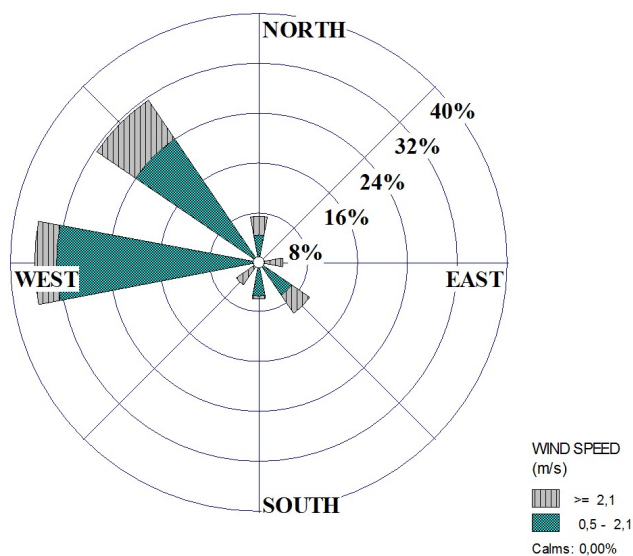


Рисунок 1.4 — Роза ветров в провинции Хузестан с учётом скоростей ветра по восьми румбам

На территории Хузестана среднемесячные скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли, как показано в таблице 4, характеризуются слабыми значениями в зимний период (0,6–3,6 м/с) и умеренными – в летний (до 5,3–5,7 м/с). В отдельные годы наибольшие средние месячные максимальные скорости ветра могут достигать 12–15 м/с. При этом, наибольшие скорости обычно характерны для ветров северо-западного направления.

Таблица 4 — Средняя скорость (м/с) ветра на территории Хузестана (1994–2010 гг.)

Станции	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Абадан	2,5	3	3,2	3,4	3,7	4,8	4,4	3,9	3,1	2,3	2,4	2,4	3,3
Агаджери	2,2	2,9	3,2	3,4	3,9	3,9	3,7	3,2	2,8	2,4	2,4	2,2	3
Ахваз	2	2,2	2,6	2,8	3,1	3,7	3,3	2,9	2,4	1,9	1,9	1,8	2,5
Бехбехан	0,9	1,3	1,4	1,8	2,1	2,4	2,4	1,9	1,6	1,2	1	0,7	1,6
Бостан	2,8	3,1	3,5	3,7	3,8	4,4	4,2	3,9	3,1	2,6	3	2,9	3,4
Дизфуль	1,3	1,6	1,9	2,2	2,7	2,5	2,1	2	1,6	1,5	1,2	1,2	1,8
Изе	1,2	1,4	1,5	1,5	2,3	2,7	2,9	2,9	2,4	2,1	1,4	1,1	2
Махшехр	3	3,6	3,9	4,5	5,1	5,7	5,3	4,8	4,1	3,2	3,2	3	4,1
Месджеде-Солейман	1	1,5	1,9	2,3	2,5	2,6	2,8	2,5	2	1,6	1,2	0,9	1,9
Омидийе	2,4	3	3,4	3,7	4,1	4,1	3,9	3,3	2,8	2,5	2,6	2,2	3,2
Рамхормоз	1,4	1,9	1,9	2,3	2,9	2,7	2,5	2,2	2	1,7	1,5	1,3	2
Сафи Абад	0,7	0,8	1,1	1,3	1,6	1,6	1,4	1	0,8	0,7	0,6	0,6	1
Шуштер	1,9	2,4	3,2	4	3,9	3,7	3,4	3,3	2,7	2,6	2,2	1,6	2,9
Среднее	1,8	2,2	2,5	2,8	3,2	3,4	3,3	2,9	2,4	2	1,9	1,7	2,5
Максимум	3	3,6	3,9	4,5	5,1	5,7	5,3	4,8	4,1	3,2	3,2	3	4,1
Минимум	0,7	0,8	1,1	1,3	1,6	1,6	1,4	1	0,8	0,7	0,6	0,6	1

1.3 Климатология осадков над территорией юго-запада Ирана

Одна из важнейших атмосферных характеристик – осадки – представляют весьма сложное явление, характеризующееся видом, фазовым состоянием, количеством, числом дней с осадками и т.д.

Во всем мире, увеличиваются осадки в экваториальной зоне и уменьшаются в субтропиках в зависимости от знака вертикальных токов циркуляции Хедли. Усиление тропической конвекции в восходящей зоне циркуляции Хедли приводит к увеличению осадков и в субтропиках, и в высоких широтах за счёт горизонтального переноса влаги [7].

Изменение климата в последние десятилетия является причиной роста количества многих экстремальных климатических явлений. Одним из важнейших экстремальных явлений являются экстремальные осадки. Изменения пространственно-временной структуры осадков потенциально могут вызвать сильные засухи или наводнения [8]. Существует много рисков, которые связаны с этими событиями.

Как уже было отмечено ранее, Иран расположен в засушливой и полусухой климатической зоне; поэтому влагой не богат и большого количества дней с сильными осадками не следует ожидать. Распределение осадков в Иране характеризуется высокой пространственно-временной изменчивостью. Климат Хузестана меняется от засушливого до влажного. В северных районах провинции холодная погода, как в умеренных широтах, тогда как в южных районах господствует погода жарких пустынь. Ежегодное испарение составляет 2000—4000 мм [9].

Переведенцев и др. [3] оценили степень континентальности климата Хузестана по данным 13 станций с помощью индекса континентальности С.П. Хромова [10]. Оценки показывают, что для территории Хузестана индекс континентальности 88–89 %. Следовательно, по этому показателю климат Хузестана является резко континентальным.

Dinpashoh и др. [11] районировали Иран по климатическому режиму осадков, используя многомерные методы. Исследовались данные 77 станций с периодом наблюдения с 1951 по 1998 гг. о 57 переменных, характеризующих осадки (широта, долгота, высота (м), Годовая общая глубина осадков (мм),

Среднегодовая среднемесячной относительной влажности, и т.д.). В результате территория Ирана разбита на 7 классов. Юго-западная часть Ирана, где расположен рассматриваемый в данном исследовании Хузестан, была отнесена к классу, для которого характерны одновременно и интенсивные осадки, вызывающие наводнения, и сильные засухи. В будущем Dinpashoh и др. [11] ожидают усиление засух.

По данным Иранской метеорологической организации, годовые суммы осадков на территории Хузестана изменяются в пределах от 210 до 320 мм, что составляет менее одной трети среднего значения для Земли. Ливневые осадки над территорией Ирана обычно наблюдаются внутри однородных воздушных масс. Они выпадают из конвективных кучево-дождевых облаков, по времени не продолжительные, но интенсивные и имеют локальное, очаговое распространение. Ливневые осадки сопровождаются градом, шквалом и грозой.

Территория Хузестана находится под влиянием западных и северо-западных воздушных течений средних широт, а также северо-восточных воздушных течений из Сибири и восточных экваториальных воздушных течений с юга [12]. Погодные условия формируются под воздействием тропических воздушных масс летом и умеренных зимой. Азорский антициклон является частью субтропического пояса высокого давления и из-за связанных с ним зональных и меридиональных движений, в Иране в тёплые и холодные сезоны преобладают различные условия температуры и осадков. Летом Азорский антициклон простирается до Средиземноморского бассейна и охватывает Ближний Восток, и из-за нисходящего воздуха в Иране преобладает сухое и жаркое лето, тогда как в холодное время года (ноябрь–март) Азорский антициклон отступает от Средиземного моря и западные ветры умеренного пояса господствуют над Ближним Востоком, а влажные условия преобладают в Иране [13]. Летом с приходом тропических масс устанавливается жаркая и сухая погода [14]. Большая часть осадков в юго-западной части Ирана выпадает в зимний и осенний сезоны из-за преобладания влажных западных ветров средиземноморского происхождения [11], [15]. Максимум осадков приходится на период с декабря по март, с июня по сентябрь значительных осадков не наблюдается [16]. Большая часть территории Хузестана является одним из самых засушливых регионов Ирана. При этом количество осадков в Хузестане сильно варьируется.

В горах Загрос зимой температура практически всегда ниже 0°C, характерны обильные снегопады и сильный ветер. Географическое расположение

горных хребтов делает Загрос барьером для воздушных течений и барических систем, что влияет на осадки на севере и востоке провинции Хузестан. Есть регионы в горах Загрос, где выпадает до 2000 мм осадков в год, тогда как юго-западе Ирана выпадает менее 50 мм/год. В горах часты сильные ливни, в результате которых может происходить переполнение горных рек, что создаёт угрозу наводнений на равнинных территориях юго-запада Ирана. Горы Загрос (северные и северо-восточные части Хузестана) находятся в зоне субтропического климата и характеризуются умеренной погодой летом и холодной в зимний период (например, станция Изе в таблице 1). Осадки в этом районе определяются орографией, а среднегодовое количество осадков составляет около 700 мм. Рельеф региона создаёт благоприятные условия для формирования сильных осадков. Подъем тёплого воздуха и опускание холодного воздуха играют ключевую роль в формировании сильных осадков и гроз. Если тёплый воздух по какой-то причине поднимается с поверхности, то подъём будет продолжаться из-за меньшей плотности тёплого приземного воздуха (конвективный процесс). Тем самым тёплый воздух будет передавать тепло от поверхности земли верхним уровням атмосферы. Орографические условия, заставляя воздух подниматься вверх по склону горы или большого холма, способствуют образованию гроз.

В горах Загрос количество осадков увеличиваются лишь до некоторой предельной высоты. Высота зоны максимума осадков и их количество зависят от ориентации склонов по отношению к влагонесущим потокам. Поэтому обычно осадков гораздо больше выпадает на юго-западных склонах, обращённых в сторону влажных западных средиземноморских ветров.

Южные части Хузестана вблизи Персидского залива расположены в зоне тропического климата, в которой большинство осадков конвективного происхождения. В этой области высоких температур воздуха среднегодовое количество осадков менее 250 мм [17]. С удалением от берега уже на расстоянии 20—30 км суша сильно прогревается, происходит усиление турбулентности и увеличение конвективной облачности и осадков [1].

В центральных частях провинции климат менее засушлив и количество осадков составляет 250 – 400 мм/год. В целом, на территории Хузестана количество осадков увеличиваются по двум направлениям. Во-первых, по направлению с юга на север, что во многом обусловлено постепенным увеличением высоты места. Во-вторых, по направлению с запада на восток, что связано с более резким увеличением высота места с Хузестанской равнины до склонов цепи

Загроса, при этом количество осадки в этом направлении изменяется более заметно от минимальных к максимальным суммам. Был проведён совместный анализ годового хода температуры и месячных сумм осадков (рисунки 1.5 и 1.6). Из анализа можно сделать вывод о значительных колебаниях месячных сумм осадков и их неоднородном распределении по территории в течение года.

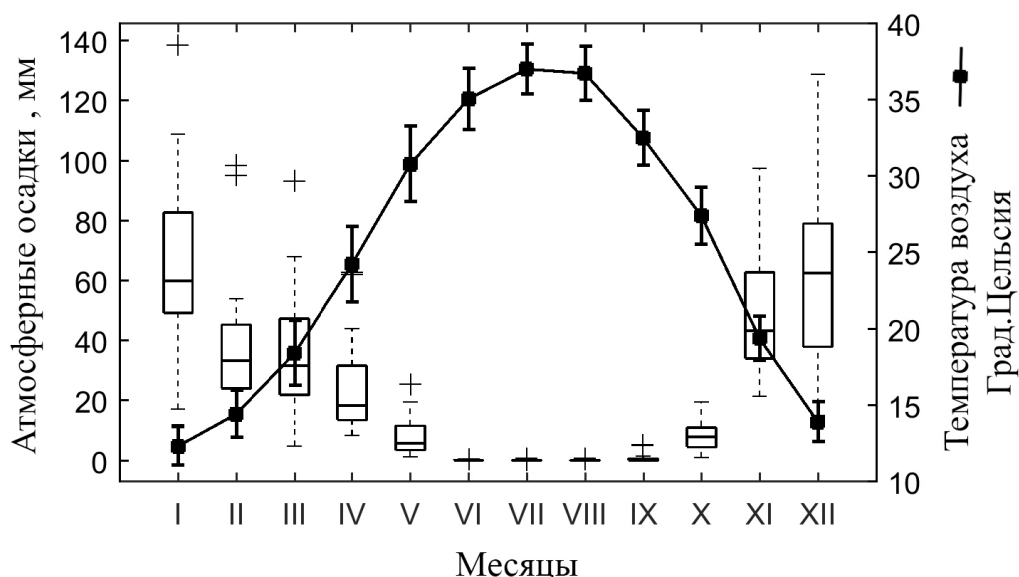


Рисунок 1.5 — Годовой ход количества атмосферных осадков и температуры воздуха в Хузестане (На бокс-диаграмме прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и вторым квантилем; крестики – выброс)

Рассчитанная средняя по провинции Хузестан годовая сумма осадков осреднённая за 17 лет – 1994 по 2010 гг., составляет величину около 300 мм. Особенности атмосферных процессов и характера подстилающей поверхности на территории Хузестана определяют убывание годовых сумм осадков в направлении с северо-востока на юго-запад. Однако под влияние Загроских гор количество осадков увеличивается на северо-востоке и востоке провинции. Максимальное количество осадков выпадает на северо-востоке Хузестана (ст. Изе—635 мм). Минимальное же количество осадков наблюдается в аридной, юго-западной части провинции (ст. Абадан—158 мм). Самый плювиальный месяц отмечается в зимний сезон. Получено следующее распределение осадков по сезонам: зимой—59 %; весной—24 %; осенью—16 %; летом—1 %. Около 70 % ежегодных осадков выпадают с февраля по апрель. Ежегодное количество осадков в среднем составляет 150-256 мм на юге и 995–1100 мм на севере.

Экстремальное количество осадков опасно для населения и экономики и может провоцировать экстренные ситуации. Проведён анализ экстремальных

Таблица 5 — Средние многолетние (1994–2010 гг.) значения месячных, сезонных и годовых сумм атмосферных осадков (мм/год)

Станции	Месяцы												Год			Сезоны		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Весна	Лето	Осень	Зима		
Абадан	41,8	15,1	18,8	11,8	1,8	0,2	0	0	0	2,8	19,7	46,2	158,2	32,4	0,2	22,5	103,1	
Агаджери	68,3	30,1	36,6	24,5	1,8	0,1	0,6	0,1	0	3,7	43,4	66,1	275,3	62,9	0,8	47,1	164,5	
Ахваз	50,1	22,5	28,1	17,4	0,8	0,2	0	0	0,3	3	39,2	50,8	212,4	46,3	0,2	42,5	123,4	
Бехбехан	83,6	33,5	48,4	20,1	3,7	0,8	0	0,4	0,2	2,9	40,5	86,4	320,5	72,2	1,2	43,6	203,5	
Бостан	46,6	21,8	28,7	15,1	1,7	0	0	0	0	4,2	28,6	39,9	186,6	45,5	0	32,8	108,3	
Дизфуль	95,5	46,7	64,1	37,4	5,8	0,4	0	0	0,6	13,7	57,3	81,4	402,9	107,3	0,4	71,6	223,6	
Изе	142,4	96,2	95	66,6	8,3	0,5	0,1	0,8	1,9	7,4	81,5	134,8	635,5	169,9	1,4	90,8	373,4	
Махшехр	54,2	21,3	25,1	12,2	1,5	0,1	0	0	0,1	2,2	43,4	48,1	208,2	38,8	0,1	45,7	123,6	
Месджеде-Солейман	103,4	46,6	64,9	29,4	5,5	0	0,1	0	0,1	5,4	57	89,6	402	99,8	0,1	62,5	239,6	
Омидийе	67,2	29,6	31,1	18,2	4,7	0,2	0	0	0	2,4	42,3	63,6	259,3	54	0,2	44,7	160,4	
Рамхормоз	79,6	33,4	46,2	20,9	2,4	0,1	0	0,1	1,3	4,6	32,5	82,7	303,8	69,5	0,2	38,4	195,7	
Сафи абад	67,3	39	47	28	4,8	0,1	0,1	0	0,4	7,1	42,7	72,7	309,2	79,8	0,2	50,2	179	
Шуштер	74,5	33,6	46,2	22,3	5,8	0,1	0	0	0	5,5	48	64,4	300,4	74,3	0,1	53,5	172,5	

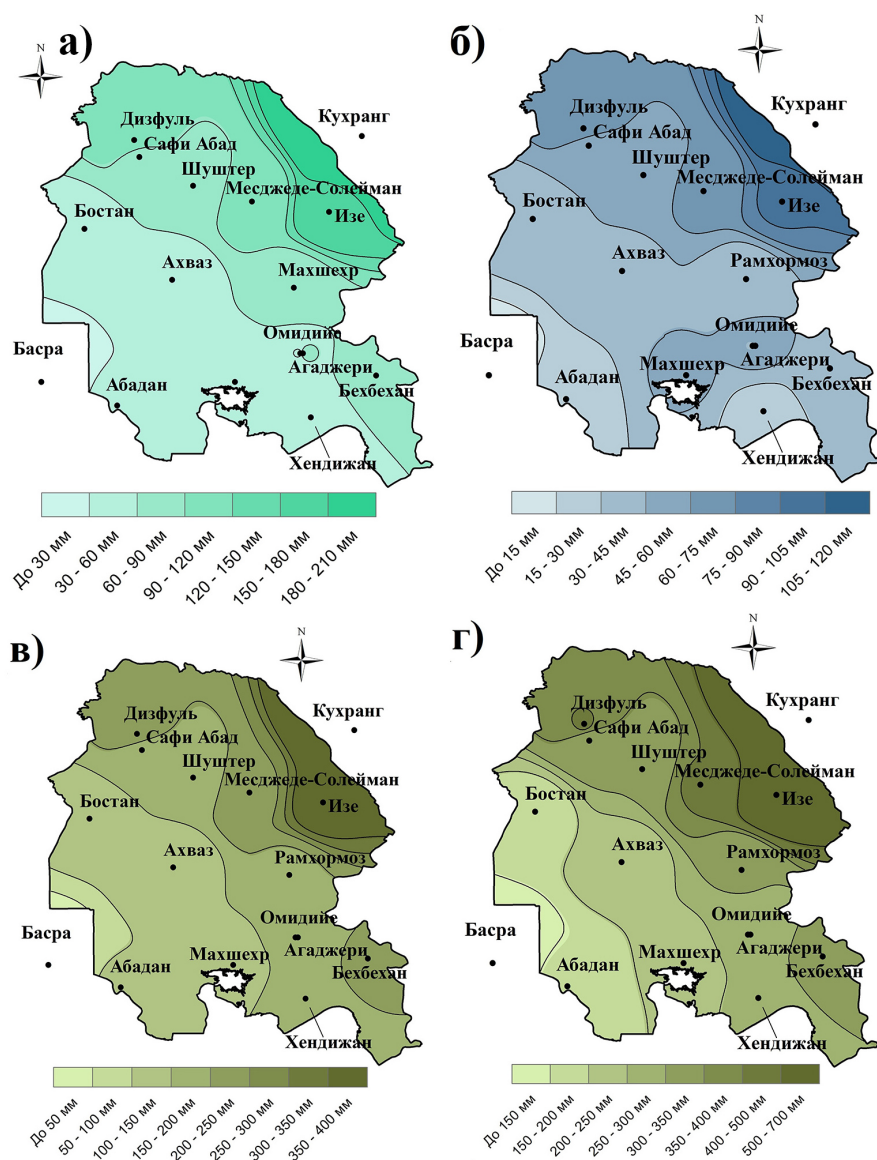


Рисунок 1.6 — Средняя значения сумм атмосферных осадков (мм). а—Весна, б—осень, в—зима, г—год

осадков в Хузестане. Результаты приведены в таблице 6. Анализ позволяет сделать вывод о том, что зима – это сезон сильных осадков на территории Хузестана.

Анализируя результаты, приведённые в таблице 7, видно, что суммарное число дней с осадками интенсивностью больше 10 мм/день наблюдается зимой и весной, чаще в декабре и январе. Наибольшее число случаев зарегистрировано за январский период (1994–2010 гг.) на метеостанции Изе – 81 раз.

Рисунок 1.7 показывает, что в провинции Хузестан наблюдается очень хорошее соответствие между количеством сильных осадков и высотой пункта над уровнем моря. Коэффициент корреляции равен 0,93.

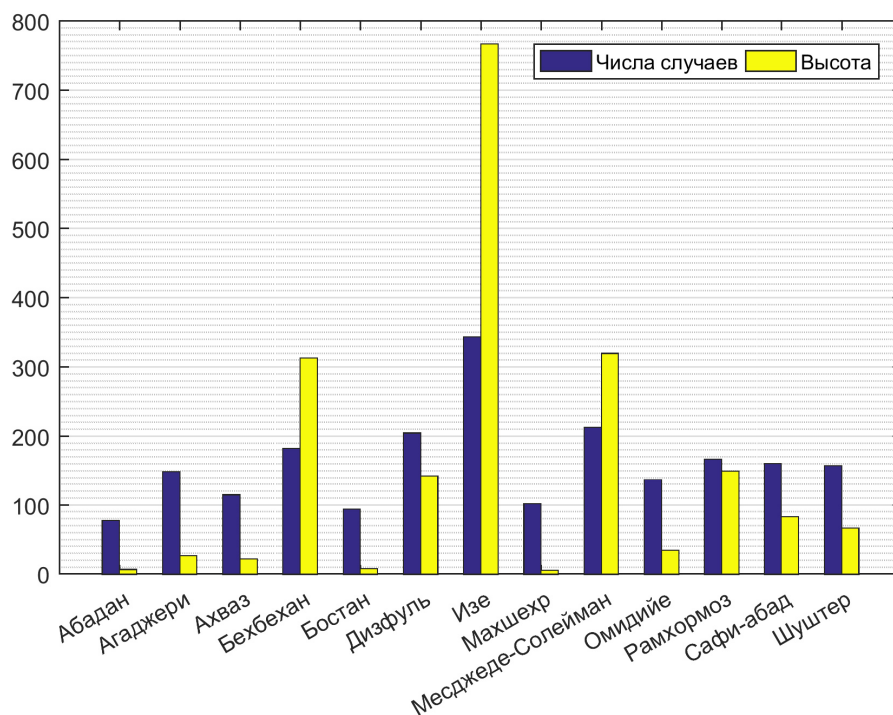


Рисунок 1.7 — Числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм (левее) и высоты станции (правее) 1994—2010 гг.

На рисунке 1.8, представлено межгодовое изменение числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм. Линии полиномиального тренда показывают, что межгодовая изменчивость на разных станциях имеет колебательный характер. Кривые показывают цикличность наблюдаемых осадков выше 10 мм, причём цикл занимает около 10 лет.

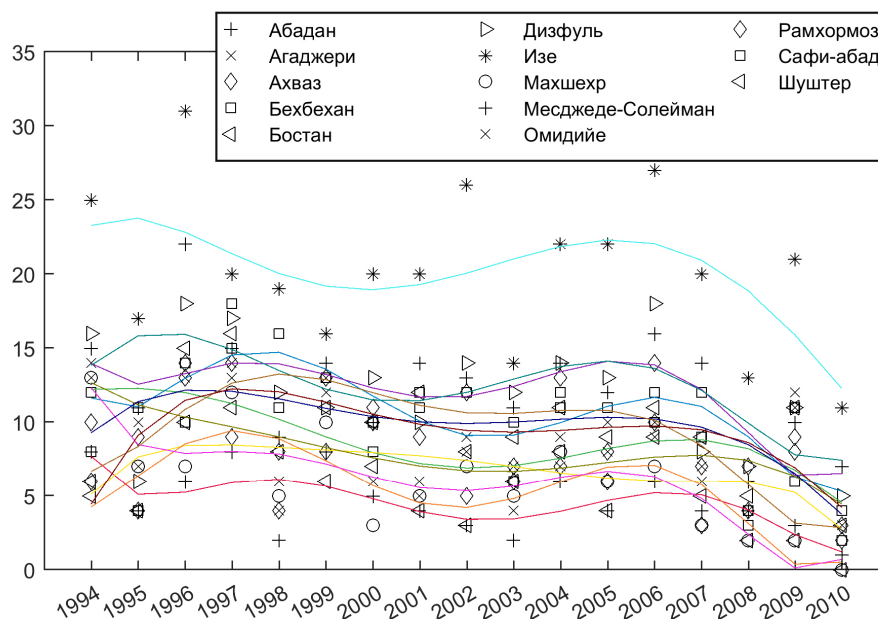


Рисунок 1.8 — Линия тренда числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм 1994—2010 гг.

Таблица 6 — Экстремальные значения (1994–2010 гг.) месячных, сезонных и годовых атмосферных осадков (мм).

Станции	Месяцы												Год			Сезоны		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Весна			Лето	Осень	Зима
Абадан	53	42,5	21	49	9	3	0	1	0	16	29	54	49	3	29	54		
Агаджери	82	44,1	63	123	7,6	1,8	11	2	0	41	68,2	54,7	123	11	68,2	82		
Ахваз	68	51	53	36	5	2	0	0	5	8	107	44	107	53	2	107	68	
Бехбехан	107	43	75	58	32,2	13	0	6	4	18,3	59	101	107	75	13	59	107	
Бостан	48	53	49	53	4	0	0	0	0	19,2	63	64	64	53	0	63	64	
Дизфуль	76	54,6	99	48	38	4	0	0	9,2	62	110	80	110	99	4	110	80	
Изе	90	75	91	99,6	18	4	8	5	10	29,3	78	113	113	99,6	8	78	113	
Махшехр	70	44,7	38	37	7,4	1	0	0	1	12,8	76	45	76	38	1	76	70	
Месджеде-Солейман	71	61	50	34	49	0	1	0	2	24	122	63	122	50	1	122	71	
Омидийе	85	54	33	81	12	2	0,5	0	0	11	84,2	83	85	81	2	84,2	85	
Рамхормоз	103	51	127	39	9	0	0	0	11	19	41	60	127	127	0	41	103	
Сафи абад	52	88	75	44	30,2	2	2	0	3,5	27	83	74	88	75	2	83	88	
Шуштер	73	71	71	38,5	55	1	0	0	0	21,2	102	53	102	71	1	102	73	

Таблица 7 — Суммарное число случаев (дней) с осадками больше 10 мм за период 1994–2010 гг.

Станции	Месяцы												Год			Сезоны		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Весна			Лето	Осень	Зима
Абадан	24	9	9	3	0	0	0	0	0	1	11	21	78	12	0	12	54	
Агаджери	35	20	22	8	0	0	1	0	0	1	24	38	149	30	1	25	93	
Ахваз	27	12	13	11	0	0	0	0	0	0	20	32	115	24	0	20	71	
Бехбехан	49	21	29	10	2	1	0	0	0	2	22	47	183	41	1	24	117	
Бостан	28	13	16	4	0	0	0	0	0	2	14	17	94	20	0	16	58	
Дизфуль	53	23	29	21	3	0	0	0	0	4	29	43	205	53	0	33	119	
Изе	81	55	52	36	4	0	0	0	0	5	43	68	344	92	0	48	204	
Махшехр	29	12	13	4	0	0	0	0	0	1	18	25	102	17	0	19	66	
Месджеде-Солейман	59	26	35	17	1	0	0	0	0	2	24	49	213	53	0	26	134	
Омидийе	36	16	19	6	2	0	0	0	0	1	18	39	137	27	0	19	91	
Рамхормоз	43	17	23	9	0	0	0	0	2	4	19	50	167	32	0	25	110	
Сафи абад	44	18	23	12	2	0	0	0	0	2	24	36	161	37	0	26	98	
Шупштер	44	21	23	12	1	0	0	0	0	4	21	32	158	36	0	25	97	

1.4 Количественные характеристики сильных осадков юго-западного Ирана

Наиболее опасными явлениями для этого региона являются сильные дожди (ливни), вызывающие катастрофические наводнения. В засушливых и полувасушливых регионах мира оценка осадков не только представляет особый интерес для лиц, принимающих решения (например, руководителей водного хозяйства, земледельцев, промышленников, климатологов и т. д.). Она также важна для жизни и деятельности человека. Однако в районах со сложной топографией такую оценку осадков очень трудно получить [18].

Ghasemifar и др. [19] с целью анализа синоптических закономерностей, связанных с экстремальными осадками над Западом Ирана, был использован 99 перцентиль для определения экстремальных осадков по ежедневным данным об осадках в течение 2000–2015 гг. на семи метеостанциях. После выявления экстремальных осадков, применяется анализ главных компонент для давления на уровне моря, 500 и 800 гПа, вертикальное движение, меридионального и зонального ветра, относительной влажности, данных TRMM. По этим результатам можно установить условия, необходимые для образования сильных осадков над Западом Ирана. Перечислим их:

- Давление, приведённое к уровню моря, ниже 1000 гПа,
- Относительная влажность у земной поверхности более 70 %,
- Отрицательное вертикальное движение – dp/dt ниже $-0,3$ Па/с
- Во всех случаях западная часть Ирана расположена перед ложбиной на уровнях 500 и 850 гПа.

Изучение климатических характеристик сильных дождей на территории юго-западного Ирана представляет особый интерес и трудности вследствие сложного рельефа. Из-за климатических условий в этом регионе происходят интенсивные осадки. Кроме того, переполнение больших рек после непрерывного сильного дождя ведёт к крупным наводнениям в Хузестане. Поэтому пространственно-временная информация высокого разрешения осадков как наиболее важная входная переменная в гидрологические модели необходима для надёжного моделирования и анализа экстремальных событий. Однако достаточно густой сети наземных измерений осадков в провинции Хузестан нет [20].

Для определения порогового значения осадков, способных нанести значительный ущерб, экспертной группой по обнаружению климатических изменений, мониторингу и индексам при комиссии по климатологии ВМО были предложены индексы экстремальности [21]. Согласно выводам этой комиссии, экстремальным считается количество осадков, превышающее границу 95 перцентиля эмпирического распределения. Однако функции распределения дневных осадков в Хузестане до настоящего времени не были определены.

Критерии опасных дождей в научной литературе часто устанавливают едиными для всей исследуемой территории. Такой подход неприменим для дождей, которые выпадают в провинции Хузестан и могут быть отнесены опасным. Разные районы провинции отличаются по условиям образования конвективных осадков, особенностями атмосферной циркуляции, орографией и т. п. Автор данной диссертации оценил 90, 95 и 99-й перцентили суточных сумм осадков и построил карты пороговых значений сильных осадков по исследуемой территории [22].

В качестве исходной информации были использованы массивы ранее не обрабатывавшихся данных о суточных суммах осадков по восьми метеорологическим станциям Хузестана, имеющим наиболее длинные ряды и равномерно расположенным по всей провинции. Информация об этих станциях показана в таблице 1 для второго этапа. За день с осадками принимался день, в который количество выпавших осадков превысило 0,1 мм. Поскольку ряды наблюдений на рассматриваемых станциях имеют продолжительность от 65 до 32 лет, количество дней с осадками по каждой станции превысило тысячу случаев. По этим данным были получены средние характеристики осадков за месяц и год. Для восьми рассматриваемых станций, указанных в таблице 1 для второго этапа, в таблице 8 приведены данные о максимальном и среднем количестве атмосферных осадков. Период с июня по сентябрь является «сухим сезоном», в течение которого на всех станциях за весь период наблюдений осадки наблюдались так редко, что вероятность дня с дождём была менее 0,01, а количество осадков за месяц не превышало 10 мм. Поэтому при исследовании сильных дневных осадков указанные месяцы не рассматривались.

В таблице 9 приведены статистические характеристики осадков по дням с дождём: вероятность дней с дождём более 0,1 мм (ВДД, %), среднее количество осадков за день с дождём ($\bar{x}$, мм), коэффициент вариации (C_v), характеризующий изменчивость дневных сумм осадков в дни с дождём.

Таблица 8 — Максимальные (числитель) и средние (знаменатель) месячные и годовые суммы осадков (мм).

Станция	I	II	III	IV	V	X	XI	XII	Год
Абадан	53/35	67/20	44/18	86/14	18/4	39/4	42/22	54/35	86/150
Ахваз	68/51	77/29	54/27	42/17	22/5	37/7	107/34	71/34	107/220
Бехбехан	107/82	44/39	75/47	58/19	32/3	18/3	100/53	101/78	107/325
Дизфуль	120/94	61/54	99/56	50/31	68/10	62/10	110/46	81/83	120/388
Изе	90/139	75/99	91/94	100/63	21/12	30/9	90/93	113/129	113/640
Месджеде Солейман	71/95	61/54	64/67	157/34	49/6	33/11	122/64	96/100	157/430
Омидийе	82/56	86/35	63/32	123/20	3/11	57/1	68/44	69/58	123/255
Рамхормоз	103/74	89/41	127/41	39/18	30/4	28/8	41/34	105/82	127/300

Для определения 90, 95 и 99 перцентилей дневных сумм осадков проведена статистическая обработка дневных данных об осадках на всех станциях, в результате которой были получены эмпирические функции распределения осадков в дни с дождём с количеством осадков более 0,1 мм.

Для выбора теоретического закона распределения, согласующегося с эмпирическим по выбранным станциям, были испытаны двухпараметрические законы распределения Вейбулла, логарифмически нормальный, Гамма и Парето. Подбор параметров распределения произведён путём минимизации расхождений подбираемой и эмпирической функций распределения вероятностей методом обобщённого приведённого градиента [23]. В качестве показателя близости распределений использован критерий Пирсона-Романовского (PR), вычисленного по формулам (1.1) и (1.2):

$$PR = \frac{|\chi^2 - (k - 2)|}{\sqrt{2(k - 2)}} \quad (1.1)$$

где

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_i^*(x) - F_i(x))^2}{F_i^*(x)} \quad (1.2)$$

где k — число групп, на которые разбито эмпирическое распределение, F_i — наблюдаемая частота признака в i -й группе, F_i^* — теоретическая частота.

Таблица 9 — Статистические характеристики дневных осадков для важнейших пунктов провинции Хузестан

Станция	Парам	I	II	III	IV	V	X	XI	XII	Год
Абадан	ВДД	16	13	12	9	3	2	10	15	10
	$\bar{x}$	6,90	5,29	4,88	5,21	3,47	5,10	6,99	7,13	5,62
	C_v	1,12	1,43	1,30	1,82	1,12	1,56	1,26	1,28	1,36
Ахваз	ВДД	18	14	14	10	3	4	11	16	11
	$\bar{x}$	8,92	6,81	6,05	5,06	5,17	5,59	9,81	9,58	7,12
	C_v	1,15	1,26	1,43	1,30	1,02	1,50	1,36	1,13	1,27
Бехбехан	ВДД	23	16	14	11	2	3	16	20	13
	$\bar{x}$	11,56	8,39	9,99	5,43	9,69	4,26	12,82	13,28	9,43
	C_v	1,30	1,11	1,26	1,49	1,12	1,23	1,36	1,21	1,26
Дизфуль	ВДД	26	23	20	16	6	5	15	23	17
	$\bar{x}$	12,17	8,75	9,00	7,27	5,88	6,63	10,61	11,93	9,03
	C_v	1,36	1,27	1,53	1,26	1,60	1,42	1,37	1,21	1,38
Изе	ВДД	32	29	24	21	6	5	24	23	21
	$\bar{x}$	13,91	11,99	12,47	9,92	5,97	5,38	12,94	17,21	11,22
	C_v	1,13	1,16	1,26	1,34	0,90	1,14	1,28	1,10	1,16
Месджеде Солейман	ВДД	28	24	22	15	4	6	15	22	17
	$\bar{x}$	11,07	8,04	9,97	7,21	4,48	6,13	13,24	13,76	9,24
	C_v	1,24	1,15	1,25	2,02	1,80	1,20	1,35	1,23	1,41
Омидийе	ВДД	21	16	14	9	2	3	14	20	12
	$\bar{x}$	8,34	7,93	7,12	7,14	3,58	8,24	10,37	9,34	7,76
	C_v	1,39	1,35	1,37	2,29	0,90	1,56	1,14	1,30	1,41
Рамхормоз	ВДД	23	18	15	12	2	4	14	19	13
	$\bar{x}$	9,87	7,70	8,10	4,88	5,40	7,06	7,84	13,31	8,02
	C_v	1,34	1,45	1,61	1,41	1,39	1,09	1,19	1,13	1,33

Для всех рассмотренных пунктов удаётся так подобрать параметры функций распределения Вейбулла (1.3) или логарифмически-нормального закона (1.4), чтобы критерии согласия Пирсона-Романовского не превосходили значения 3, что обеспечивает случайность расхождения между эмпирической и теоретической функциями распределения на уровне значимости 0,3 %.

$$f(x, a, b) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a} \quad (1.3)$$

$$f(x, a, b) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x} e^{-\frac{(\ln x - a)^2}{2b^2}} dx \quad (1.4)$$

где a – коэффициент формы и b – коэффициент масштаба.

Оказалось, что испытанные также функции распределения Гамма и Парето значительно хуже согласуются с эмпирической функцией распределения, поэтому результаты их оценивания не приведены.

Сравнение эмпирической и наиболее подходящих теоретических функций распределения можно провести с помощью таблицы 10.

Таблица 10 показывает, как годовое количество сильных осадков увеличивается с ростом высоты расположения станции. Эта зависимость может быть описана либо логарифмической, либо степенной функцией с дробным показателем. Коэффициент детерминации R^2 в обоих случаях превышает 0,8. Максимальное за месяц количество осадков статистически не зависят от высоты расположения станций.

Если сопоставить количество осадков в таблице 9 с высотами станций, то как для месячных, так и для годовых значений снова выявляется регрессионная зависимость от высоты станции. Для вероятности дней с дождём эта зависимость линейная, но менее чёткая (R^2 превышает 0,7). Число дней с осадками увеличивается примерно на 1 – 1,5 % при увеличении высоты станции на 100 м. Зависимость средних суточных сумм осадков от высоты выражена более сильно и описывается либо логарифмической, либо степенной функцией с коэффициентами детерминации 0,85 – 0,92. Наиболее значительные изменения характерны для высот до 100 м. Коэффициент вариации, в среднем равный 1,32, не зависит от высоты расположения станций. Наиболее изменчивы суточные

Таблица 10 — Характеристики эмпирической (Э) и теоретических функций распределения Вейбулла (В) и логарифмически (Л) нормального закона ежедневных осадков в Хузестане с критериями согласования по критерию Пирсона-Романовского.

Станция	Распределение	Перцентиль-(мм)					Параметры функций распределения		Оценки согласования
		50%	75%	90%	95%	99%	a	b	
Ахваз	Э	3,5	8,5	15	20,5	47	-	-	-
	В	3,7	9	17	24	42	0,859	5,678	2,86
	Л	3,3	8	17,7	28,5	69,9	1,191	1,313	2,84
Омидийе	Э	3,4	8,7	19	29,3	55	-	-	-
	В	3,6	8,3	15,5	21	36	0,825	5,55	0,56
	Л	3,2	7,9	18,1	29,7	75	1,153	1,36	3,97
Абадан	Э	3,3	6	12	16,5	37,5	-	-	-
	В	3,2	8,5	13	17,8	30	0,981	4,597	7,04
	Л	2,9	6,2	12,3	18,5	40	1,063	1,129	2,99
Изе	Э	5,2	14,5	29	42	77	-	-	-
	В	5,4	13,4	26,8	38	67	0,762	8,72	3,1
	Л	5	13,1	31,3	52,7	140,2	1,604	1,465	2,11
Бехбехан	Э	3,6	11,3	24	37	64	-	-	-
	В	3,8	10	20,3	29,5	54	0,718	6,354	3,01
	Л	3,6	10,3	26,6	46,9	136,5	1,274	1,566	3,32
Дизфуль	Э	4	10,5	25	32,5	70	-	-	-
	В	4,4	11,2	23	32	58	0,833	6,853	11,46
	Л	4	10,1	23,3	38,4	98,4	1,381	1,379	1,17
Месджеде Солейман	Э	4,7	11,5	26	39,5	64	-	-	-
	В	4	10,2	21	29	53	0,741	6,552	2,35
	Л	4,7	11,2	24,6	39,5	95,6	1,541	1,298	3,92
Рамхормоз	Э	3,5	9,5	20,5	27,5	51	-	-	-
	В	4	10,2	21	29	53	0,78	6,016	2,56
	Л	3,4	8,9	21	35,2	92,6	1,223	1,421	3,56

количества осадков в марте, апреле и октябре, когда C_v в отдельных пунктах увеличивается до 1,5 — 2,3.

Из таблицы 10 следует, что значения 50, 75 и 90 перцентилей осадков по эмпирической и теоретическим функциям распределения близки. Однако значения 95 и 99 перцентилей у теоретических функций распределения расходятся между собой и значительно отличаются от тех, которые получаются по эмпирической функции распределения. Функция распределения вероятностей Вейбулла занижает значения 99 перцентиля. Функция распределения логарифмически нормального закона завышает эти значения. Причём завышения значительно больше, чем занижения. Поскольку данных о максимальных осадках было мало, то в данной работе для определения порогового значения обильных осадков мы считаем более реалистичной аппроксимацию эмпирической функции распределения законом распределения Вейбулла. Гистограммы ежедневных сумм осадков и плотности распределения Вейбулла для избранных пунктов приведены на рисунке 1.9.

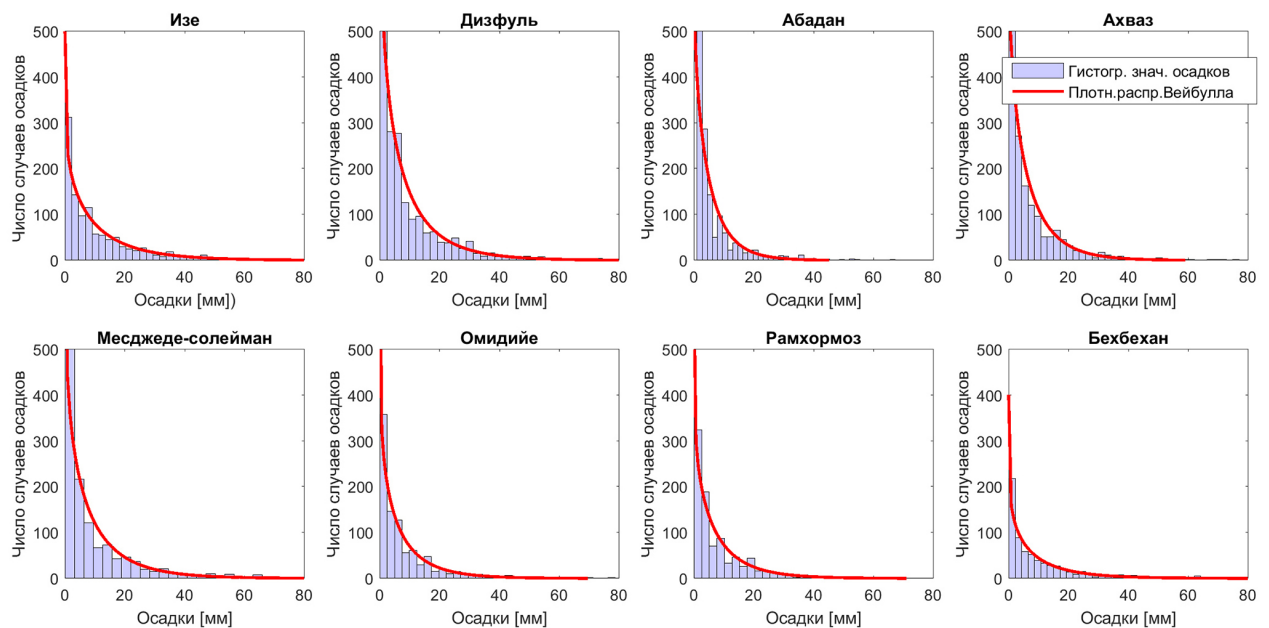


Рисунок 1.9 — Выборочные функции распределения количества осадков за сутки по данным наблюдений (гистограммы) и плотности распределения вероятностей Вейбулла (красные линии)

Однако при выборе значения перцентиля экстремальных ежедневных дождей мы приняли решение ориентироваться на эмпирическую функцию распределения и не приводить карту значений, имеющих обеспеченность 1 %. Анализ значений экстремальных дождей, определённых указанным образом,

показал, как и ожидалось, что значения осадков, обеспеченность которых 10 % и 5 %, существенно различны для разных станций. Распределение по территории Хузестана значений сильных дождей с этими обеспеченностями приведено на рисунке 1.10.

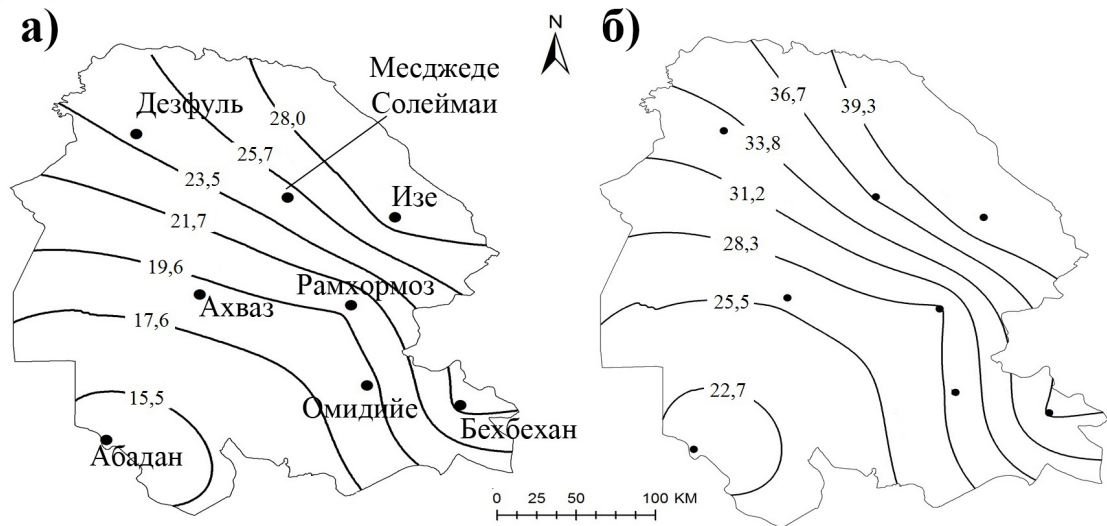


Рисунок 1.10 — Распределение порогового значения обильных осадков (мм) на территории Хузестан по эмпирическому распределению на уровне 90 % (а) и 95 % (б).

Интересно, что даже при выборе в качестве оценок перцентилей количества осадков подтверждается вывод о том, что между максимальными и средними значениями количества осадков существует связь. Обычно этот вывод получается, когда определяют экстремальные осадки по единому значению для всей территории [24]. Регрессионная зависимость сильных осадков обеспеченностью 10 %, 5 % и 1 % от средних дневных значений сумм осадков X для выбранных станций Хузестана может быть представлена в виде:

$$Y_{10\%} = 2,59X, (R^2 = 0,97) \quad (1.5)$$

$$Y_{5\%} = 3,76X, (R^2 = 0,96) \quad (1.6)$$

$$Y_{1\%} = 6,92X, (R^2 = 0,92) \quad (1.7)$$

Эти зависимости должны уточняться по мере поступления новых данных, но на этом этапе их можно использовать для оценки максимальных значений количества осадков за сутки на рассматриваемой территории.

Для того, чтобы провести сравнение режима экстремальных осадков на разных районах Хузестана, был использован индекс вклада экстремальных осадков в общее их количество за месяц, год и весь период наблюдений [25]. Расчёт критерия проведён по формулам:

$$Rxx\% = 100 \frac{R_T(xx)}{R_T} \quad (1.8)$$

$$R_Txx\% = 100 \frac{R_T(xx)}{R_T - R_T(xx)} \quad (1.9)$$

В этих формулах xx – принимает значения 90 и 95. Например, $R95\%$ – индекс вклада экстремальных осадков, с обеспеченностью 5 %. Он вычислен по методике [25]. В знаменателе формулы (1.8) стоит сумма осадков R_T на рассматриваемой метеорологической станции за период T (месяц или год). В числителе стоит сумма осадков в день, когда они превышали значение, имеющее для данной станции обеспеченность 5 % за период T . Индекс $R90\%$ вычислен аналогично, но в числителе стоит сумма осадков в день, когда они превышали значение, имеющее для данной станции обеспеченность 5 % за период T .

Эти индексы удобны для демонстрации климатических особенностей станций с точки зрения экстремальных осадков. На рисунке 1.11 показано, как изменяется степень экстремальности осадков в годовом ходе в разных пунктах наблюдений. Хорошо видно, что в период с мая по сентябрь осадки не могут превышать те, которые имеют 5 % уровень обеспеченности. Однако на одной из станций в июне оказались возможными осадки, которые превышают 10 % уровень обеспеченности.

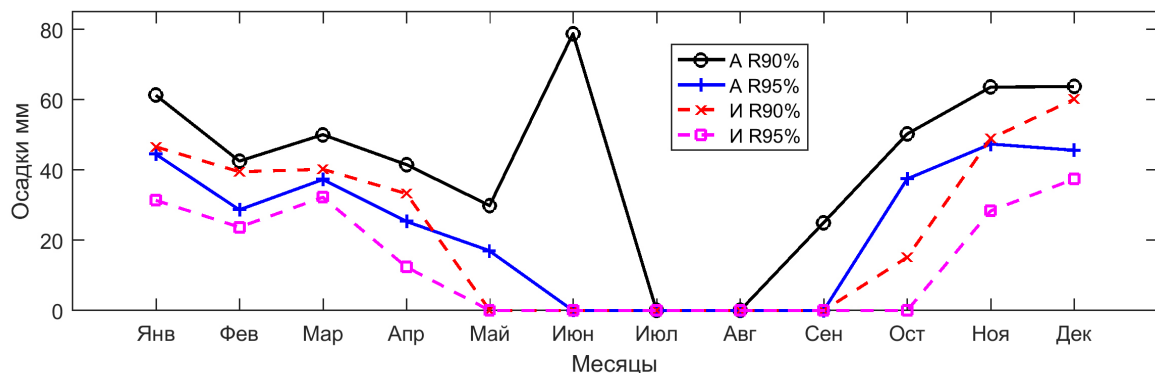


Рисунок 1.11 — Годовой ход индексов $R95\%$ и $R90\%$ на станциях Ахваз (А) и Изе (И)

По мнению авторов, индекс $R95\%$ недостаточно выраженно реагирует на изменчивость экстремальных осадков. Это происходит потому, что экстремальные осадки по построению влияют и на числитель, и на знаменатель формулы (1.8). Поэтому для описания мезомасштабной неоднородности экстремальных осадков были применены индексы $R_T90\%$ и $R_T95\%$, вычисляемые по формуле (1.9). Смысл использования этих индексов понятен: они показывают соотношение экстремальных и не экстремальных осадков в одном и том же периоде. На рисунке 1.12 показано, что индексы $R90\%$ позволяют отметить только различие режима экстремальности в разных пунктах, разница между годами выражается в нескольких десятках процентов, и не способствует определению того, насколько значительней воздействие экстремальности в разных пунктах.

При использовании индекса $R_T90\%$ сразу видно, что в года с экстремальными осадками их вклад самый значительный в пункте Ахваз, где он может превышать вклад остальных осадков даже в 6 раз. На станции Дизфуль вклад экстремальных осадков может превосходить вклад остальных в два с половиной раза. На станции Изе вклад экстремальных осадков значительно меньше и не превышает 150% от остальных.

Понятно, что сравнение индексов $R_T90\%$ позволяет ранжировать станции наблюдений по роли экстремальных осадков в климате, что важно и для оценки необходимости защитных мероприятий. Пример такого сравнения приведён (на рисунке 1.12 и в таблице 11).

Таблица 11 — Эмпирические обеспеченности и критерии экстремальности для станций, расположенных в районах с разным микроклиматом провинции Хузестан

Станция	Обеспеченности, %				R90 %	R95 %	RT90 %	RT95 %
	0,5	0,25	0,1	0,05				
Ахваз	3,5	8,5	15	20,5	55,9	40	126,8	66,8
Абадан	3,3	6	12	16,5	54,2	41,5	118,2	71
Омидийе	3,4	8,7	19	29,3	49	37,4	96,1	59,8
Бехбехан	3,6	11,3	24	37	48,2	31,6	93	46,2
Дизфуль	4	10,5	25	32,5	46,1	32,2	85,4	47,4
Изе	5,2	14,5	29	42	44,6	27,9	80,5	38,8
Месджеде солейман	4,7	11,5	26	39,5	44,6	28	80,7	38,8
Рамхормоз	3,5	9,5	20,5	27,5	44,1	33,1	78,9	49,5

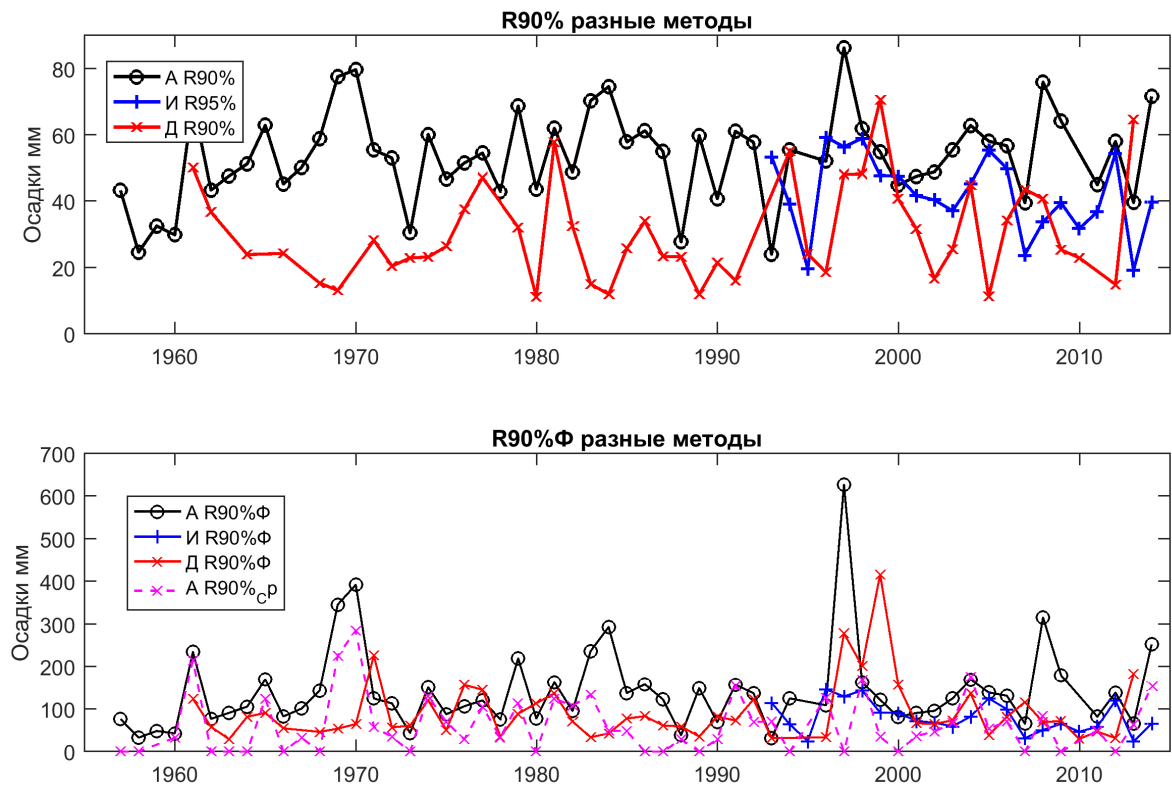


Рисунок 1.12 — Представление межгодовой изменчивости экстремальных осадков с помощью индексов $R90\%$ (верхний) и $R_{T90}\%$ (нижний) в пунктах наблюдений Ахваз (А), Изе (И), Дизфуль (Д).

Результаты распределения порогового значения обильных осадков (например, таблица 10, рисунок 1.10) будут использованы при моделировании атмосферных процессов (например, для использования метода телескопических и вложенных сеток) и для верификации результатов моделирования.

Глава 2. Гидродинамическое моделирования атмосферных процессов над территорией юго-запада Ирана

2.1 Модели и их использование для прогноза атмосферных осадков

Штормовые циклоны, сопровождающиеся проливными дождями, суровая погода, связанная с грозами, могут вызывать локальные наводнения и создавать значительные угрозы имуществу и экономике, чем сильно осложняют жизни людей. Следовательно, важное значение имеет прогноз возникновения опасных конвективных явлений и их характеристик. Лучшее понимание основы термодинамического процесса, их развития может улучшить прогнозирование таких событий.

Возможность изменения климата является одной из основных проблем в области водоснабжения и управления рисками наводнений. Экстремальные осадки в любом географическом районе относятся к опасным явлениям, которые могут оказывать существенное влияние на хозяйственную деятельность. Результаты наблюдений и моделирования изменений глобального климата указывают на общую тенденцию к увеличению интенсивности и изменчивости осадков в глобальном масштабе [26]—[28]. Надёжное прогнозирование интенсивных атмосферных осадков позволяет оценивать риск наводнений и способствует снижению уязвимости общества к воздействию этих опасных природных явлений.

Несмотря на успехи в гидродинамическом моделировании и системе усвоения данных в последние десятилетия, крупномасштабные модели (КМ) имеют в ряде регионов различные систематические ошибки, которые непросто устранить. Наиболее вероятным источником подобных ошибок являются недостатки в описании свойств подстилающей поверхности на сетке с большими пространственными шагами. Возможны также ошибки в описании физических процессов в атмосфере, например, в описании облачности, также связанные с недостаточным пространственным разрешением моделей, в описании гидрологического цикла, который напрямую определяет интенсивность осадков.

Во всех ведущих прогностических центрах развиваются различные подходы для уменьшения погрешностей прогноза осадков, прежде всего за счёт увеличения пространственного разрешения моделей. Одним из методов увеличения пространственного разрешения является использование региональных (мезомасштабных) гидродинамических моделей (РГМ). При этом начальные данные и краевые условия для этих моделей получаются из анализов и прогнозов по крупномасштабной модели. В настоящее время во всех крупных прогностических центрах мира основой технологии прогноза погоды является крупномасштабная (как правило, глобальная) гидродинамическая модель с телескопизацией, то есть постепенно, уменьшающимся, хотя все ещё, к сожалению, достаточно грубым пространственным разрешением. Для уточнения результатов грубого моделирования до мелкого масштаба часто сегодня используются статистический или динамический даунскейлинг [29].

В то время как статистический даунскейлинг использует выбранные атмосферные предикторы для получения осадков, динамический даунскейлинг описывает физические процессы в региональном масштабе с использованием РГМ, в которые вложены выходные данные КМ или данные реанализов. Таким образом, РГМ оказываются способными воспроизвести важные мезомасштабные картины наблюдаемых осадков, отражающие влияние рельефа на осадки [30]. Хотя точное представление подсеточных процессов в РГМ остаётся проблемой, они достаточно надёжны в моделировании атмосферных циркуляций. Кроме того, РГМ, в основном работающие на горизонтальном разрешении 10-50 км, как правило, оказываются лучшими в представлении суточных экстремальных осадков, чем их родительские КМ, а некоторые исследования также показывают, что РГМ могут лучше представлять редкие экстремальные осадки [31]. Хотя РГМ демонстрируют перспективу в своей способности моделирования экстремальных осадков, остаются некоторые проблемы. Несмотря на это, все больше исследователей применяют численные модели, предназначенные для прогноза погоды, для изучения особенностей интенсивных осадков.

В 1990-е годы в исследовательском сообществе широко использовалась Модель MM5 [32] (Fifth-Generation Pennsylvania State University – NCAR Mesoscale Model; <http://www2.mmm.ucar.wrf/users/docs>). Однако, хотя модель MM5 была негидростатической, она не была оптимальным инструментом: она была неконсервативной и имела меньшую точность решения при описании малых пространственных масштабов. Её структура не способствовала

добавлению более совершенного описания подсеточных физических процессов. Она не поддерживала множество желательных атрибутов программного обеспечения (портативность, параллельность, расширяемость, программные интерфейсы прикладного программирования). Между тем, Национальный центр прогнозирования окружающей среды (NCEP) заинтересовался разработкой негидростатической модели для оперативного прогноза на более мелких масштабах. Было создано сообщество для создания модели Weather Research Forecasting model (WRF) [33]. Его первоначальными членами были NCAR, Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA), Агентство погоды ВВС США, Военно-морская исследовательская лаборатория, Университет Оклахомы и Федеральная авиационная администрация. Первая версия модели выпущена в декабре 2000 года.

Первоначальные параметризационные пакеты описания атмосферных физических процессов были перенесены в WRF из MM5, но с тех пор члены метеорологического сообщества предоставили множество схем, обеспечивающих различные варианты описания физических процессов в атмосфере.

2.2 Краткое описание мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы WRF

Мезомасштабная гидродинамическая модель атмосферы WRF представляет собой современную систему моделирования, используемую как для оперативного прогноза, так и для исследований атмосферы в разных пространственных масштабах от нескольких до сотен километров. Она является одной из наиболее разработанных и широко распространённых систем моделирования для метеорологических исследований [34], [35].

По своей конструкции в качестве инструмента исследования WRF также может быть сконфигурирована для проведения идеализированных экспериментов. Эта возможность позволяет изучать процессы в упрощённой форме, например, учитывая идеализированный рельеф или варьируя параметры и начальные условия или ограничивая описания физики некоторых процессов. WRF также может быть использована для глобального моделирования. Глобальная WRF была первоначально построена для изучения атмосферы планет [36].

Являясь готовым продуктом, WRF активно применяется в новых направлениях исследований, новых конфигурациях и при этом продолжает развиваться. На сегодняшний день мезомасштабная гидродинамическая модель WRF применяется при решении многих прикладных и исследовательских задач, таких как

- Ассимиляции данных наблюдений для WRF с помощью система WRF Data Assimilation System (WRFDA) [37].
- Для оперативного гидродинамического в государственных прогностических центрах по всему миру (Иран входит в число стран зарегистрированных пользователей WRF), а также частными компаниями. Конфигурируемость доменов с высоким разрешением, множество возможных потоков входных данных и гибкость вычислительных алгоритмов (особенно в условиях ограниченного ресурса), а также способность использовать достижения всего исследовательского метеорологического сообщества сделали WRF особенно привлекательной использования в прогнозах в режиме реального времени.
- Для моделирования химии атмосферы используется вариант WRF-Chem [38]. Она применяется в широком спектре исследований качества и химии воздуха.
- Для гидрологического моделирования используется пакет WRF-Hydro, способный моделировать гидрологические процессы на суше, с возможностью как автономного моделирования, так и описания двухстороннего взаимодействия атмосферы и водных объектов суши [39].
- Для изучения распространения пожаров используется WRF-Fire [40], в которую входят модели развития лесных пожаров.
- HWRF [41] – это версия WRF, предназначенная для оперативного прогнозирования ураганов. NCEP, основной разработчик, развёртывает HWRF во всём мире для прогнозирования в реальном времени тропических циклонов.
- WRF-Urban [42] объединяет интегрированную в WRF многомасштабную систему городского моделирования для представления влияния урбанизации на региональные метеорологические и климатические условия, здравоохранение и водные ресурсы.
- WRF-Solar [43] это конфигурация WRF, предназначенная для прогнозирования солнечной энергии.

- WRF-LES это вихреразрешающая версия модели WRF [44].
- Polar WRF [45] более точно описывает условий в высоких широтах над ледовыми полями.

Динамика WRF представлена в её ядрах. Сначала два исходных ядра имели вертикальную координату на основе высоты и массы [46]. В WRF, версия 2, была удалена возможность работы с координатой на основе высоты, поскольку небольшое преимущество наличия обоих вертикальных координат не оправдало дополнительной сложности. В начале 2000-х годов был добавлено другое динамическое ядро — NMM (NCEP Nonhydrostatic Mesoscale Model) [47], чтобы предоставить альтернативный вариант для NCEP. Таким образом, Настоящая модель WRF содержит два динамических ядра: Advanced Research WRF (ARW, WRF-ARW) и WRF-NMM.

В данном исследовании используется модель WRF-ARW (версия 3.6.1), ранее называвшаяся Eulerian Mass-solver (EM), основанная на полностью сжимаемых негидростатических (с гидростатическим вариантом) уравнениях в потоковой форме с учётом всех компонент силы Кориолиса и кривизны Земной поверхности. Прогностические переменные включают трёхмерные поля ветра, флуктуации потенциальной температуры, геопотенциала, давления на подстилающей поверхности, кинетической энергии турбулентности и различных скаляров (отношение смеси водяного пара, облачной воды и т. д.). Вертикальная координата модели гибридная: внизу повторяет рельеф местности, основываясь на сухом гидростатическом давлении, а в верхних слоях модельной атмосферы координатой является давление. В качестве горизонтальной сетки используется С-сетка Аракавы. Для интегрирования по времени в модели используется схема Рунге-Кутты третьего порядка точности [33]. В приложении А представлена система уравнений в потоковой форме, на которой базируется модель.

В большинстве атмосферных моделей подсеточные атмосферные процессы, которые явно не разрешаются моделью, представлены схемами параметризации. Основной задачей параметризации является нахождение параметров, структурных элементов и связей крупномасштабных модельных переменных с величинами, характеризующими влияние подсеточных процессов на поля метеорологических величин. Для модели WRF предусмотрены параметризационные исследующих процессов:

- Микрофизика облаков и осадков (ПМО) – используются для моделирования микрофизических процессов, которые управляют образованием,

ростом и диссипацией облачных частиц на малых масштабах [48]. Кроме того, обеспечивает описание реализации скрытой теплоты конденсации, а также процессов образования и выпадения осадков [33]. В версии 3.6 для ядра ARW представлены 22 варианта ПМО.

- Конвекция (ПКО) (13 варианта) – описывает влияние кучевых облаков и мелкой конвекции. Корректное описание конвекции необходимо для учёта вертикального перераспределения тепла и влаги в потоках воздуха с фазовыми переходами водяного пара [49].
- Распространение радиация, включающая коротковолновые (ПКР) (8 вариантов) и длинноволновые (ПДР) (8 вариантов) потоки – рассчитывают профили атмосферного нагрева и оценку теплового бюджета атмосферных слоёв.
- Процессы в планетарном пограничном слое (ППС) (12 варианта) – определяют профили турбулентных потоков тепла, влаги и количества движения в пограничном слое, тем самым определяя корректное описание влияния подстилающей поверхности.
- Процессы в приземном слое (ППЗ) (7 вариантов) – Схемы ППЗ рассчитывают вертикальный турбулентный обмен, основываясь на теории Монина-Обухова с различными уточнениями. Рассчитанные поверхностные потоки используются для постановки нижнего граничного условия при вычислении переноса по вертикали в ППС.
- Процессы на подстилающей поверхности и в почве (ППП) (7 вариантов) – используются для оценки потоков тепла, импульса и влаги в почве и на подстилающей поверхности.

Вышеуказанные параметризации и схемы детально описаны в работах [33], [50].

2.3 Опыт использования численных моделей в прогнозах и исследованиях

Осадки являются одной из важнейших переменных в глобальном гидрологическом цикле для прогноза погоды и климата [51]. Понимание пространственной и временной изменчивости осадков важно не только для прогнозирующих

погоду и климат, но и для широкого круга лиц, принимающих решения, включая гидрологов, земледельцев и промышленников [52].

С 2005 года мезомасштабная модель ММ5 стала использоваться в Гидрометцентре Ирана и появилась возможность изучать и прогнозировать сильные осадки с использованием численного прогноза погоды (ЧПП). Kandahari и др. [53] оценили способности модели ММ5 при моделировании в ситуациях выпадения интенсивных осадков на западе и юго-западе Ирана. Результат моделирования показал, что можно хорошо прогнозировать поля осадков, возникающие в обширных холодных воздушных массах. Но при воспроизведении полей осадков, возникающих из-за локальных особенностей, в небольших барических системах, когда в верхних слоях атмосферы бароклинность отсутствует или очень слабая, качество моделирование плохое.

Со времени своего первого публичного выпуска в 2000 году WRF стала, вероятно, самой используемой в мире моделью атмосферы. Об этом свидетельствуют показатели роста с 2006 года зарегистрированных пользователей и публикаций. Например, совокупное количество регистраций WRF теперь составляет более 36 000, распределённых в 162 странах [54], в том числе и в Иране. Широкое признание WRF отчасти объясняется тем, что он предоставляется без затрат, обременения авторских прав или ограничений на модификацию. Модель WRF является одной из гидрометеорологических мезомасштабных моделей, вызывавшей интерес, привлекающей внимание исследователей и экспертов метеорологии в Иране.

Исследования по мезомасштабному моделированию, например, [55]–[58] показали, что при работе с относительно высоким разрешением (до 10 км) модели могут захватывают многие из наблюдаемых мезомасштабных особенностей, включая озёра-холодного-воздуха индуцированные мезоантициклонами и мезоциклонами позади линий шквалов, тогда как систематические недостатки в модельном осадкообразовании часто присутствуют, например, [59], [60]. Кроме того, Gallus и др. [61] продемонстрировали неспособность модели ЧПП с шагом 10 км предсказать хорошо документированное событие ураган «Derecho». Davis и др. [62], Carbone и др. [63] и Wilson [64] подчеркнули, что модели с высоким разрешением могут явно разрешать конвективные системы без параметризованной конвекции. Увеличение мощности компьютера привело к уменьшению пространственного разрешения ЧПП до менее, чем 5 км, что позволило

обеспечить явное (без параметризации) представление динамических и термодинамических процессов, связанных с конвективными системами и ключевыми характеристиками местности, которые могут оказывать прямое и значительное воздействие на осадки. Например, Xue и Martin [65] успешно смоделировали возникновение конвекции вдоль сухой линии шквала в течение Международного проекта H20 (IHOP) с использованием Advanced Regional Prediction System (ARPS) с разрешением в 1-км. Weisman и др. [66] продемонстрировали, что модель WRF с шагом в 4 км сетки создаёт значительные добавочные значения в отношении воспроизведения режима конвективной системы, включая линии шквала, «Bow echo», мезомасштабные конвективные вихри и суточный цикл атмосферных осадков. Shafer и др. [67] даже продемонстрировали, что модель WRF способна отличать торнадовую и неторнадную вспышки с обычными исходными данными. Оценка результатов моделирования с таким разрешением, которое позволяет образоваться кучевым облакам в модели, и, следовательно, оценить достоверность экспериментов по чувствительности к модели к описанию физических процессов, способствуют пониманию основных динамических и термодинамических механизмов, связанных с суровой погодой [68].

Модель WRF гибка, она обладает несколькими вариантами для пространственной дискретизации, диффузии, вложенности (нестинг), ППС и ПМО, а также для описания ландшафтов и топографических данных, совместимых с разными регионами.

Challa и Pfeffer [69] обнаружили, что скорость усиления и конечная интенсивность тропических циклонов были обусловлены эффектом демпфирования кучевого трения в числовых моделях. Karayaprudi и др. [70] показали, что прогноз интенсивности осадков чувствителен к различным методам ПКО, причём это объясняется главным образом различием в описании конвективных осадков и скрытого тепловыделения.

Davis и Bosart [71] утверждали, что прогноз интенсивности и следа тропического циклона Диана (1984 г.) чувствителен к схемам физических параметризаций и особенно ПКО. В частности, использование схемы KF [72] для ПКО привело к хорошо предсказанной интенсификации урагана «Диана», частично из-за того, что условия возникновения конвекции возникают в этой схеме чаще, чем в других.

Результативность модели WRF для территории Ирана ранее была исследована в ряде работ, в которых было показано, что прогноз факта выпадения или

отсутствия осадков оправдывается в 80 % случаев [73], [74]. Также было установлено, что качество прогноза осадков на территории со сложным рельефом, как юго-запад Ирана, зависит от выбора схем параметризаций: ПКО, ПМО и ППС. Физически это вполне объяснимо и неоднократно подтверждено в научных исследованиях, ориентированных на другие районы [49], [75]–[77].

В Иране, Neyestani и др. [78], изучали применение ассимиляции данных наблюдений с использованием модели WRF для моделирования конкретного случая осадков, вызванных синоптическими системами в западных регионах Ирана. при этом проводились контрольные эксперименты, используя три вида разных начальных данных: NCEP-GFS (использовались и при моделировании с ассимиляцией), NCEP-FNL и ERA-Interim. В результате показали, что положительное влияние ассимиляции на прогноз осадков получилось при моделировании с заблаговременностью 24 часа слабое - с заблаговременностью 48 часов. Помимо этого, они показали чувствительность модели к схемам параметризации и начальным данным. Отмечено что, максимальное влияние ассимиляции данных на корреляцию между модельными и контрольными осадками составило около 8 %.

По нескольким выбранным случаям, Azadi и др. [79], изучили влияние ассимиляции синоптических и аэрологических данных на прогнозы модели WRF для осадков над Ираном путём сравнения результатов моделирования без ассимиляции данных наблюдений и при применении её. Показано, что значительные улучшения по воспроизведению структуры поля осадков наблюдается, когда ассимиляции включена. По статистическим показателям улучшение составило 18 % и 15 % для средней ошибки и средней абсолютной ошибки, соответственно. Ассимиляция данных наблюдений имеет наибольшее значение, когда для модели уже выбраны и оптимальная конфигурация параметризации, и структура доменов, и точнее обновляющиеся граничные условия. Поскольку в данной работе именно эти вопросы изучаются, то включение ассимиляции не является приоритетным.

Azadi и др. [80], после месячных тестов на чувствительность и количество осадков по сравнению со спутниковыми оценками показали, что следующая конфигурация параметризации обеспечивает хорошие результаты над всей территорией Ирана с шагом сетки 15-км с 28 вертикальными уровнями: схем KF – ПКО, Lin [81] – ПМО, Схема MYJ [82] – ППС, Noah [83] – ППП, Goddard [84] – ПКР и RRTM [85] – ПДР.

В указанных выше работах было изучено качество моделирования осадков моделью WRF на длительные сроки для всей территории Ирана. Shabani и др. [86] с помощью модели WRF, изучили влияние горных цепей Загрос и Каспийского моря на интенсивность летних осадков, вызывающих наводнения в прибрежных частях Каспийского моря в Иране. при этом использовались три области расчёта с шагом сетки 90, 30 и 10 км.

Layeghi и др. [87] оценивали чувствительность к выбору схем параметризаций модели WRF-ARW при моделировании летнего муссона 2011 года над Персидским заливом и Оманским морем (на юге Ирана) в течение летнего муссона. В результате было показано, что конфигурация: Lin – ПМО, MRF [88] – ППС, KF – ПКО, RRTM – ПДР, Goddard – ПКР, Revised-MM5 [89] и Noah – ППП; приводили к меньшим ошибкам относительной влажности и температуры. Также конфигурации: Lin – ПМО, ACM2 [90] – ППС, KF – ПКО, RRTM – ПДР, Goddard – ПКР, Pleim-Xiu [91] для ППП и ППЗ; позволили получить лучшее поле ветра.

В недавнем исследовании, Sasanian и др. [92], оценили влияние 9 различных конфигураций физических параметризации в модели с 15-км шагом сетки над запад-юго-западом Ирана. выбрали период с декабря 2011 по февраль 2012. Путём сравнения модельных и фактических результатов, они выявили, что модель имеет тенденцию к завышению осадков в всех градациях, а также обнаружили сильную зависимость воспроизведения структуры поля осадков от параметризации конвекции. Надо отметить, что модель с 15-км шагом сетки при том, когда роль местных погодных факторов незначительна, практически могла воспроизводить поля осадков с хорошими оценками качества в данном периоде, причём большинство осадков было успешно произведено уже глобальной моделью. В случае существования более локальных погодных систем (например, конвективные осадки) нужно иметь и более точную настройку модели, полученную на основе дополнительных исследований. В качестве оптимальной конфигурации параметризаций предложили такую: ПКО – KF и Grell-Devenyi (GD) Ensemble [93], ПМО – Kessler [94], ППС – MYJ, ППП – Noah, ПКР – Dudhia, ПДР – RRTM, ППП – Monin-Obukhov (Janjic Eta) [82], [95].

Информация об осадках во всём водосборном бассейне отсутствует из-за неравномерного распределения и ограниченного числа измерительных станций. Таким образом, для детального изучения и количественной оценки количества

осадков во всём бассейне с регулярной сеткой, лучшим методом является моделирование моделей ЧПП. Ghassabi и др. [96] изучили временное распределение штормовых осадков по данным об осадках на юго-западе Ирана. Для этого была применена восстановление пространственно-временной структуры осадков путём применения модели WRF-ARW с 9-км пространственное разрешение с целью получения нужного регулярного поля осадков 12–15 ноября 2006 г. По полученным осадкам они подобрали логистическую функции распределения их по времени. В результате было найдено, что вероятность интенсивных осадков становится больше на севере и юго-западе территории, чем на юго-востоке и в центральной части.

Однако все эти выводы относятся к большой территории и большим промежуткам времени и не могут без проверки быть перенесены на меньшую и отличную по топографическим и ландшафтным особенностям территорию юго-запада Ирана. Решение этой задачи описано далее.

Глава 3. Адаптация модели WRF-ARW для юго-запада Ирана

3.1 Локализованная модель WRF-ARW

Высокая пространственная и временная изменчивость осадков над Ираном, частые засушливые периоды и растущие потребности в воде для постоянно растущего опустошения, а также для промышленности и экономического развития, включая ирригацию, усугубляют дефицит воды и затрудняют рациональное управление водными ресурсами [97]. Адаптация модели WRF для прогнозирования осадков в этом конкретном регионе является важной, актуальной, но и чрезвычайно сложной задачей.

В недавнем исследовании Madani [98] освещает водные кризисы в Иране, включая истощение уровня грунтовых вод, сушение озера, водоснабжения и экстремальные явления. Поскольку почти 85 % территории страны находятся в полужасушливых и засушливых климатах, страна сталкивается как с затяжными засухами, так и с наводнениями. За последние два десятилетия наводнения затронули 11 миллионов человек в Иране и вызвали более 2600 смертельных случаев [98], [99]. Это подчёркивает важность мониторинга и оценки экстремальных осадков в Иране. Для обеспечения надёжного функционирования основных водорегулирующих сооружений Ирана требуются прогностические и фактические данные о времени выпадения и распределении осадков по территории.

Из-за высокой пространственной и временной изменчивости осадков и частых сухих периодов возрастающие потребности в воде для постоянно растущего населения, а также для промышленности и экономического развития, включая ирригацию, усугубляют дефицит воды и затрудняют рациональное управление водными ресурсами. Следовательно, создание локализованного оперативного РГМ для прогнозирования количества и местоположения, в частности, чрезвычайных осадков, имеет большое значение для управления водными ресурсами и планирования землепользования.

Юго-западная часть Ирана окружена с севера и востока горами Загрос (высота которых достигает 4548 м в Зард-Кух, см. рисунок 1.1), и относится

к региону со сложным рельефом, где регулярно зимой выпадают интенсивные осадки, приводящие к очень опасным наводнениям. Количество осадков за один час может превышать среднемесячную сумму осадков для данного места, а за день может выпасть годовая норма осадков [22], [100]. Резкое увеличение поверхностного стока с гор, вызванное ливнями, приводит к заполнению и переполнению сухих русел на Хузестанской равнине и к паводкам на реках. Поскольку населённые пункты, расположенные по берегам водотоков, ориентированы на засушливый климат, то специальной канализации для отвода осадков в них не предусмотрено. Обычной защитной мерой являются дамбы, построенные достаточно давно и вследствие заиления русла, имеющие недостаточную высоту. В результате дамбы не могут удерживать паводковые воды, которые наносят значительный ущерб и приводят к человеческим жертвам. Реконструкция защитных сооружений требует изучения режима опасных осадков.

Известно, что при подъёме по горному барьеру цепи гор Загрос на юго-западе Иране влажный поток, как правило, усилит осадки над ветровым склоном и гребнем, а именно к равнине провинции Хузестан. Как, модельные [101]—[103] так и наблюдательные исследования [104]—[106] показали, что количество осадков зависит от интенсивности анабатического ветра (Upslope flow). Moradi и др. [107] рассмотрел влияние горных хребтов Загрос на распределение осадков в юго-западе Ирана. Они показали, что без горных хребтов Загрос, при благоприятных условиях для осадков, больше осадков будет происходить над центральной пустыней Ирана, расположенной на подветренной стороне Загроса. В работе [108] описано использование модели WRF-ARW для исследования роли Анатолийских и Кавказских гор в распределении осадков над Черноморским регионом. Ими было выяснено, что основное влияние эти горные массивы оказывают на пространственное распределение осадков и влажности над Черноморским регионом. В подобной работе Flesch и Reuter [109] рассматривается роль топографии в образовании осадков при применении WRF-ARW. В частности, производилось моделирование с использованием фактической топографии и с искусственно уменьшенными высотами гор. Получено, что снижение высоты горных массивов, при условии, когда высота точки сетки, истинная высота которой превышает 1000 м над уровнем моря уменьшается на 75 %, приводит к уменьшению максимального количества осадков примерно на 50 %.

В этих исследованиях, поскольку рассматривались станции, неравномерно распределённые по пространству, и применялись разные методологии, идентифицированная оптимальная конфигурация и разрешение РГМ отличаются от одного исследования другим, особенно в труднодоступных районах западного Ирана, которые характеризуются сложной орографией. Поэтому для юго-западного Ирана необходимо провести дальнейшие исследования для определения, адекватного согласованного локализованного РГМ, который надлежащим образом отражает реальную изменчивость прогнозируемого поля осадков в этом районе. Повышение точности прогноза осадков для этой территории определяет актуальность и практическую значимость описанного в работе исследования.

Моделирование атмосферных процессов над территорией юго-западного Ирана проводится с использованием численной модели WRF с динамическим ядром ARW, поскольку она является моделью общего пользования, может быть установлена без каких-либо лицензионных условий и используется в многих Гидрометцентрах мира в том числе России и Ирана. Эта модель включает в себя широкий набор параметризаций в области физического описания всех необходимых подсеточных процессов.

В дальнейшем с целью выбора оптимального набора параметризации, на основе сравнения характеристик параметризации и согласно литературным источникам используются следующие параметризации и схемы:

- Для моделирования мезомасштабной конвективной организации, возможно, наибольшей неопределённостью является ПМО, особенно обработка ледяной фазы. Поэтому после анализа источников мы используем три разные, чтобы отличать надёжные схемы, от зависимых от функционирования модели схем ПМО, а именно:
 - а. Схема «Lin», включает шесть классов гидрометеоров: водяной пар, жидкие частицы облачности, частицы дождя, кристаллы льда, снег и крупы. Все производственные условия параметризации основаны на [81] и [110] с некоторыми изменениями, включая корректировку насыщения после Тао и др. [111] и осадконакопления. Это относительно сложная схема ПМО в WRF, и она наиболее подходит для использования в исследовательских исследованиях.
 - б. Схема «WSM6», которая использует метод представления скоростей падения частиц смешанной фазы для частиц снега и крупы путём назначения одной полной скорости для обеих величин, взвешенных по

соотношениям смешивания, и применения этой скорости падения как для процессов осаждения, так и для аккреции [112]. Из трёх схем WSM схема WSM6 является наиболее подходящей для разрешающих облака сеток, учитывая эффективность и теоретические предпосылки [113].

в. Схема «Thompson» [114], схема одномоментная, модифицирована из объёмной микрофизической схемы [115]. Первоначально была предназначена для использования в прогнозировании зимних прогнозов погоды в авиации, в которых возникают опасения по поводу обледенения воздушных судов, и поэтому основное внимание уделяется описанию переохлаждённой жидкой воды, по сравнению со схемами, предназначенными для имитации конвективных систем. Он предсказывает двухмоментный облачный лёд и дождь. Кроме того, конверсия облачного льда в снег также очень эффективна. Процессы зарождения льда в этой схеме основаны на методах Соопер [116].

- На основе результатов работ авторов в Иране и на основе сравнения характеристик схем ПКО, используются следующие три схемы ПКО, а именно:

а. Схема «Kain-Fritsch» (KF), представляет собой схему параметризации вертикального потока массы, который определяет силу конвекции в зависимости от значения конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE) [117]. Эта схема является развитием более ранней схемы «Fritsch-Chappell» [118], которая моделирует восходящие и нисходящие потоки, а также скорости вовлечения и вытекания. Схема KF запускает глубокую конвекцию, когда перемешивающаяся частица имеет положительную вертикальную скорость на высоте, превышающей заданную толщину облака, обычно 3 – 4 км [119]. KF перемешивает воздух, участвующий в конвекции, с воздухом в соответствующих восходящих и нисходящих потоках, при этом строго сохраняя массу, тепловую энергию, полную влажность и импульс [120]. Конвекция, инициированная с использованием схемы KF, использует, по меньшей мере, 90 % энергии неустойчивости (CAPE) за период времени, который обычно составляет от 0,5 до 1 часа [119], что является замыкающим соотношением. Уменьшение CAPE основного состояния осуществляется путём перераспределения массы в колонке с использованием восходящего и

нисходящего потоков массы и потока массы в окружающем колонку воздухе. Путём удаления CAPE из перераспределяемой массы в модельном столбце образуются конвективные осадки.

б. Схема «Grell-Freitas» (GF) [121], ПКО GF основана на параметризации, первоначально разработанной Grell [121], и далее расширена Grell и Devenyi [93] с включением стохастичности. Что отличает GF от предыдущих версий, так это включение единой параметризации глубокой конвекции для расчёта конвективного вертикального вихревого переноса влажной статической энергии, влаги и других интенсивных переменных в разных горизонтальных масштабах.

в. Схема «Betts-Miller-Janjic» (BMJ) [122] является продолжением схемы BM [123], которая в свою очередь является развитием схемы конвективного приспособления Смагоринского-Манабе. Эта схема приспособления, которая базируется на анализе конвективной доступной потенциальной энергии, поступающей от крупномасштабных процессов. Подобно схеме KF, BMJ запускается, когда возможно вертикальное перемещение частицы воздуха за счёт энергии неустойчивости от уровня конденсации до уровня потери импульса. схема BMJ преобразует профили температуры и влажности, характерные для неустойчивой атмосферы, в профили, характерные для конвективных облаков с эталонной структурой, используя глубокую и мелкую конвекцию. Эталонными структурами являются предварительно определённые в работе [122] профили температуры и влажности внутри ПКО. Janjic [122] также ввёл поправку в схему BM, которая позволяет избежать ложной глубокой конвекции над тёплыми океанами, характерную для старой схемы BM. Vaidya и Singh [124] сравнили схему BM с BMJ и обнаружили, что новые изменения, внесённые в схему BMJ, оказались полезными и при прогнозировании осадков на суше. Janjic [125] также использовал переменное время релаксации, а также больше профилей влаги.

— Для ППС две локальной и нелокальной схемы:

а. Схема «Yonsei University» (YSU), нелокальная схема, учитывающая вовлечение и параболический профиль метеорологических величин в неустойчивом пограничном слое атмосферы. является нелокальной схемой первого порядка со счётным членом в уравнении вихревой диффузии. Схема YSU модифицирована в версии WRF 3 от Hong и др. [126]

путём увеличения критического числа Ричардсона от нуля до 0,25 над подстилающей поверхностью, тем самым улучшая перемешивание в стабильном пограничном слое [127].

б. Схема «Mellor–Yamada–Janjic Eta» (MYJ), одномерная прогностическая схема, основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и учитывающая перемешивание по вертикали [122]. Использует модель закрытия турбулентности 1,5-го уровня (уровень 2.5) [128] для представления турбулентности над поверхностным слоем [122], [129], [130]. Схема MYJ определяет коэффициенты вихревой диффузии от прогностической рассчитанной турбулентной кинетической энергии. Mellor и Yamada [128] утверждают, что схема подходит для всех стабильных и слегка нестабильных потоков, но эти ошибки более вероятны, когда поток приближается к пределу свободной конвекции.

– Для ППЗ, используются следующие схемы:

а. Схема «Revised MM5 Monin-Obukhov» (R_MM5) — модифицированная MM5.

б. Схема «Monin-Obukhov (Janjic Eta)» (Eta).

– Для параметризации распространения радиации, используются следующие схемы в экспериментах:

а. Схема «Rapid Radiative Transfer Model» (RRTM) – спектральная полоса с использованием коррелированного метода для ПДР.

б. Схема Dudhia [131], включая эффекты, связанные с наклоном склона и топографическим оттенком, использовались для ПКР. Простая нисходящая интеграция, обеспечивающая эффективное поглощение и рассеяние облаков и ясного неба.

– Для ППП используется: Схема «Noah», преемница модели поверхности земли Орегонского государственного университета используется для включения эффектов наземной поверхности. Схема Noah прогнозирует температуру почвы и влажность в 4 слоях, простирающихся на 10 см, 30 см, 60 см и 100 см от поверхности и суммируя их до 2 м ниже поверхности. Она включает в себя землепользование, ежемесячную фракцию растительности и эвапотранспирацию в оценке чувствительных и скрытых тепловых потоков. Noah также имеет улучшенное

подход к городским мест и рассматривает свойства излучательной способности поверхности [33].

3.2 Общая настройка модели по всем экспериментам

Процесс подготовки и запуска используемой для данной диссертационной работы модели состоит из двух шагов:

1. Сначала нужно настроить домен(ы) модели, получить и импортировать исходные данные и подготовить начальные условия с помощью WRF Preprocessing System (WPS). Ряд утилит, WPS сначала извлекает географическую информацию (например, топографию, землепользование) для создания пользовательских доменов модели. Затем он импортирует, переформатирует и интерполирует необходимые нулевые приближения атмосферных данных (например, глобальный анализ или модельный прогноз) для доменов пользователя. Наконец, поля ввода помещаются на вертикальные уровни модели и генерируются боковые граничные условия. После этого модель WRF готова к запуску.
2. Далее следует запуск модели прогноза. Это делается компонентом прогноза, который содержит решение уравнений динамики атмосферы, решающие и параметризации физических процессов. Компоненты прогнозируемой модели работают в рамках программного обеспечения WRF, которое производит операции ввода-вывода и параллельных вычислений. Модель WRF написана в основном на Fortran, и может быть построена с несколькими компиляторами и работает преимущественно на платформах с UNIX-подобными операционными системами, от ноутбуков до суперкомпьютеров. Надо отметить что, в данном исследовании WRF была установлена на многопроцессорном сервере кластера, представленного «Вычислительный центр Санкт-Петербургского Государственного Университета» (СПбГУ; <http://cc.spbu.ru>) и проводились все расчёты на виртуальной машине.

Для корректного описания процессов используется равноугольная конечная проекция Ламберта в декартовой системе координат. Все домены имеют

35 уровней по вертикальной гибридной координате η с верхней границей на уровне 50 гПа.

При моделировании использовались граничные условия двухстороннего взаимодействия (ГУДВ). Когда ГУДВ включена, в совпадающих точках значения сетки грубого домена заменяются значениями средними значениями переменных сетки вложенного домена. Для замаскированных полей возвращается только одно точечное значение в совпадающие точки. Если отношение шагов родительского и вложенных доменов чётное число, для обратной связи используется произвольный выбор значения юго-западной угловой точки. По этой причине, NCEP/NCAR (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user.htm>) рекомендует применять нечётное отношение, например, шаг родительского домена может быть в 3 или 5 раз больше шага вложенного домена, когда ГУДВ включена.

В качестве начальных и граничных условий для каждого эксперимента были использованы данные FNL из национального центра экологического предсказания США – NCEP [132] без ассимиляции данных наблюдений с пространственным разрешением 1° по долготе и широте и 27 изобарическими уровнями. Эти файлы содержат информацию за 4 срока наблюдений (00, 06, 12, 18 ВСВ) с дискретностью 6 часов.

В доменах используются топографические данные (шаг сетки – разрешение): (54, 45, 36 и 27 км – 5'), (18, 15, 12 и 9 км – 2') и (6, 5, 4, 3 и 1,7 км – 30"), которые были получены из базы данных глобальной геологической службы США– USGS (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/).

Шаг по времени для интеграции выбирается согласно критерию Куранта-Фридрихса-Леви [133]. По расчётам, шаг по времени для медленных мод (в секундах) рекомендуется, как минимум, в 6 раз больше, чем шаг сетки (в километрах).

В проведённых исследованиях, согласно рекомендации разработчиков модели, в зависимости от пространственного разрешения модели варьируется шаг по времени. Это происходит по правилу (3.1):

$$\Delta T = \Delta x \times 6 \begin{cases} \text{если } \frac{\Delta T}{15} \in \mathbb{N} : \Delta t = \Delta T \\ \text{если } \frac{\Delta T}{15} \notin \mathbb{N} : \Delta t = \Delta T' \leftarrow \left\{ \frac{\Delta T'}{15} \in \mathbb{N} \bigwedge \Delta T - 15 < \Delta T' < \Delta T \right\} \end{cases} \quad (3.1)$$

Где шаг родительской сетки (Δx), шаг по времени (Δt). Тогда для шага 54 км шаг по времени будет 315 секунд, для 45 км – 270 секунд, для 36 км – 210 секунд, для 27 км – 150 секунд и для 15 км – 90 секунд. Такое решение было принято, так чтобы получить результаты расчётов с интервалом 6 часов ($\text{interval_seconds} = 21600$).

Таблица 12 — Перечень случаев, отобранных для оценки качества прогноза максимального количества осадков и связанных с ними наблюдений максимального количества осадков.

	№ случаев, отобранные для этапа:			Дата	Число надёж- ных наблюде- ний	Максимальное количество осадков (мм/сутки)	Число станций, на которых наблюдалось количество осадков выше 40 мм/сутки
	первого	второго	третьего				
			1	13.12.2013	141	88	33
1			2	02.05.2013	119	123	12
2			3	21.12.2012	259	103	67
3			4	26.11.2012	194	98	35
			5	26.02.2012	254	64	17
4			6	20.11.2011	208	131	61
5			7	27.01.2011	193	113	56
			8	02.05.2010	256	67	39
	1		9	28.11.2009	266	138	56
6			10	30.11.2008	193	102	87

В каждом этапе данного исследования были рассмотрены случаи выпадения сильных атмосферных осадков, указанные нумерациями в таблице 12, которые вызвали локальные наводнения на юго-западе Ирана и нанесли значительный ущерб экономике региона. Грозы обычно происходят зимой и весной на юго-западе Ирана [22], и по этой причине мы выбрали наши тематические исследования в этих сезонах.

Для оценки результатов расчётов были использованы фактические данные о количестве осадков за сутки по 50 метеорологическим станциям, размещённые на сайте Иранской метеорологической организации (Центр статистики и данных) <http://www.irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>. Дополнительно к анализу привлекались данные 250 осадкомерных станций, расположенные в ДОЗ (в Хузестан и его сопредельных провинциях), в том числе 18 климатологических. Таким образом, максимальное количество станций, данные которых использовались, составило ~ 300 (приложение Б), но в каждом конкретном случае (таблица 12) их количество менялось в зависимости от наличия и надёжности данных наблюдений. Надо отметить, что ежедневные осадки регистрируются каждый день в 21:30 часов вечера по местному времени (+3 : 30 BCB). Измеряются накопленные осадки в течение предыдущих 24 часов.

В большинстве регионов мира датчики дождя не обеспечивают надёжного пространственного представления осадков [134], особенно над океанами, пустынями и горными районами. Кроме того, осадкомеры очень неоднородно распределены по пространству, и часто наблюдения страдают от существенных потеревшихся данных, что приводит к неадекватному временному и пространственному отбору особенно в развивающихся странах [135]. Однако следует учитывать, что в наблюдениях содержится только информация о «позитивных событиях», т. е. отсутствие записи в базе данных не означает, что никакого серьёзного погодного события не произошло [136]. То же самое относится к метеостанциям. Суровое погодное событие могло произойти за пределами диапазона, охваченного наблюдениями человека. Всё сказанное приводит к тому, что обработка данных о сильных конвективных явлениях усложнена из-за неоднородных и не стандартизованных данных. Поэтому для визуального анализа и контроля результатов расчёта поля осадков использовались 3-часовые данные «Tropical Rainfall Measuring Mission» (TRMM 3B42) с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>) и спутниковые снимки (снимок в видимом диапазоне) Aqua/MODIS в 10:30 BCB данного дня (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

Данные TRMM использовались также потому, что спутниковая система даёт уникальную возможность непрерывно отслеживать процессы и параметры системы земля-атмосфера. Это важно, поскольку правильное пространственно-временное обнаружение и количественная оценка осадков были одной из

основных целей создания системы наблюдений с метеорологических спутников [137].

Расчёты по модели WRF начинались в 12 ВСВ для каждого случая и продолжались в течение 30 часов. Первые 6 часов (разгоночный период) необходимы для подавления шумов, связанных с переходом на сетку с меньшим шагом. Шестичасовой разгоночный период был применён для обеспечения динамического равновесия между граничными условиями и модельной динамикой всех переменных, включая влажность и температуру почвы. Он также позволяет модели быть независимой от начальных условий. Оценивались результаты 24 часового прогноза от 18 ч 00 мин предыдущего дня до 18 ч 00 мин ВСВ данных суток. Для этого после каждого численного эксперимента были собраны суточные осадки всех точек сетки для каждого шторма с использованием написания скриптов в GrADS (<http://cola.gmu.edu/grads/>).

3.3 Методы верификации

Для оценки качества прогнозов использовались результаты моделирования в ближайших станции узлах сетки. В данной работе в доменах с шагом сетки 6 км и меньше из девяти узлов сетки, окружающих каждый пункт наблюдения за осадками, в качестве оценочного выбирался узел, в котором значения осадков были ближе всего к наблюдавшемуся значению (рисунок 3.1). Такая процедура оценки, предложенная в работе Giannaros и др. [138] и результативно применённая в работе Маддах и др. [139], позволяет избежать недооценки качества прогноза модели за счёт небольшого смещения точки выпадения осадков, вызванного дискретностью сетки.

Верификация прогнозов в данной работе проводится двумя способами: количественным и качественным, основанным на построении матриц сопряжённости. Все оценки проводились с помощью специально написанных скриптов в программе MATLAB R2016a (www.mathworks.com/products/matlab).

Количественный анализ выполнялся на основе расчёта общепринятых статистических критериев, а именно: относительная (RE) и средняя абсолютная

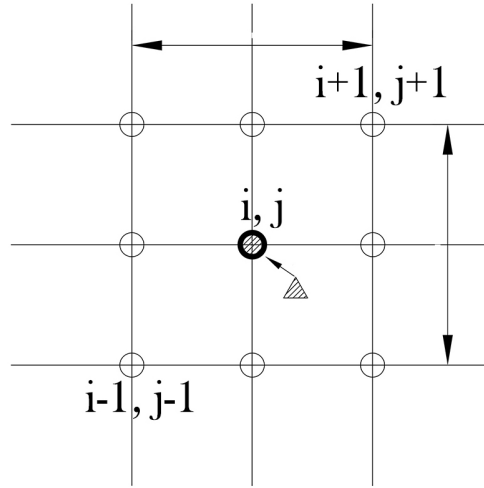


Рисунок 3.1 — Схема выбора оценочного узла сетки. Обозначения: кружки – 9 окружающих узлов для станции, треугольник – станция, с известными осадками, жирный кружок – ближайший узел из четырёх узлов сетки, окружающих станцию.

(MAE), систематическая (ME) и средняя квадратичная (RMSE) ошибки прогнозов, коэффициенты корреляции Пирсона (CORR) между прогностическими (P) и фактическими (F) полями метеорологических величин.

$$ME = \sum_{i=1}^N (P_i - F_i) \quad (3.2)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N |P_i - F_i| \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - F_i)^2} \quad (3.4)$$

$$RE = \sum_{i=1}^N \frac{P_i - F_i}{F_i} \times 100 \quad (3.5)$$

$$CORR_{P,F} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{P_i - \mu_P}{\sigma_P} \times \frac{F_i - \mu_F}{\sigma_F} \quad (3.6)$$

где N – число измерения

i – измерение

μ – среднее значение выборки

σ – стандартное отклонение выборки

Значения относительной и систематической ошибок позволяют оценить точность моделирования с точки зрения завышения или занижения количества осадков в точке, а среднеквадратическая и средняя абсолютная ошибка дают информацию о качестве прогноза по всей исследуемой области. Коэффициент корреляции позволяет оценить пространственное соответствие фактических и модельных осадков и менее чувствителен к неточностям в количестве осадков. Матрица сопряжённости (таблица 13) учитывает все возможные комбинации прогнозируемых и фактических событий выпадения осадков. Пусть А означает, что событие предсказано и произошло; С – событие произошло, но предсказано не было; В – событие предсказано, но не произошло; D – правильно предсказано, что событие не произойдёт.

Таблица 13 — Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений

		Наблюдение случая		
		Да	Нет	
Прогноз случая	Да	A	B	A + B
	Нет	C	D	C + D
		A + C	B + D	N

По матрице сопряжённости были рассчитаны следующие индексы:

- BIAS – отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий. Этот индекс демонстрирует завышение ($BIAS > 1$) или занижение ($BIAS < 1$) моделью количества наблюдаемых событий. $BIAS = 1$ означает совпадение числа прогнозируемых и наблюдаемых случаев осадков. BIAS не является мерой точности и необязательно $BIAS = 1$ соответствует идеальному прогнозу.

$$BIAS = \frac{A + B}{A + C} \quad (3.7)$$

- FAR – это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались (ложная тревога). Лучший результат соответствует $FAR = 0$, а наихудший при $FAR = 1$. $FAR = 0$ не обязательно соответствует совершенным прогнозам.

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (3.8)$$

- POD – это доля станций, на которых правильно смоделированы осадки. Лучший результат соответствует $POD = 1$, а наихудший при $POD = 0$. $POD = 1$ означает идеальный прогноз.

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (3.9)$$

- TS – это доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными. лучший результат соответствует $TS = 1$, худший – $TS = 0$; в этом случае $TS = 1$ означает идеальные прогнозы.

$$TS = \frac{A}{A + B + C} \quad (3.10)$$

- GSS – что включает коррекцию воздействия ложных осадков – E. Значения Gilbert Skill Score (GSS) колеблются от $-1/3$ до 1. При $GSS = 0$ результат моделирования осадков считается случайным, положительные значения GSS указывают на уровень точности прогноза, а идеальным прогноз осадков считается, когда GSS равняется 1 [140].

$$GSS = \frac{A - E}{A + B + C - E} \quad (3.11)$$

$$E = \frac{(A + B) \times (A + C)}{N} \quad (3.12)$$

В рамках данного исследования, статистические индексы BIAS, FAR, POD, TS и GSS рассчитывались для событий типа «количество осадков больше (меньше) порогового значения». В первой главе данной работы на основе статистических индексов доказано, что в северо-восточной части исследуемого района (станция Изе), благодаря горам Загрос, количество осадков, которое следует считать сильными (95-й перцентиль) самое высокое по сравнению с остальными частями исследуемого района. Исходя из результатов для «ст. Изе», показанных в таблице 4 и в рисунке 1.10, для анализа моделирования осадков в качестве пороговых выбраны значения:

1. 1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было,
2. 5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО) по значению 50-й перцентиль,

3. 15 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО) по значению 75-й перцентиль,
4. 40 мм/сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО) по значению 95-й перцентиль.

Оценки ME, RE, MAE, RMSE и CORR были рассчитаны для четырёх градаций: ГСО – 0-5 мм/сутки, ГУО – 5-15 мм/сутки, ГСИО – 15-40 мм/сутки (полуоткрытые интервалы, т. е. 0-5 понимается как $[0,5)$ и т. д.) и ГОСО – более 40 мм/сутки.

Глава 4. Моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана

Целью данной главы является оптимизация модели WRF-ARW для моделирования сильных дождей на юго-западе Ирана и оценка того, наиболее высокого качества расчёта осадков, которое в результате оптимизации можно получить.

Предыдущие исследования показали, что на моделирование интенсивности и структуры сильных осадков влияют физические процессы, параметризуемые в численных моделях [141], [142], взаимодействия между этими физическими процессами, а также размер домена и пространственное разрешение модели [71], [143]. В научном сообществе не существует единого мнения по поводу превосходства тех или иных схем параметризаций модели WRF-ARW [33], [49], [74], [89], [126], [138]. Каждое сочетание и параметризаций имеет сильные и слабые стороны в разных областях. Например, в работе Исаева [144] было указано, что нельзя считать, что оптимальный для одного горного региона набор параметризаций, обязательно сработает в той же конфигурации в другом горном регионе (особенно это касается параметризации ППС).

При использовании WRF-ARW в локальной области искусственно назначенный размер домена и интервал сетки для каждого вложенного домена могут вносить дополнительные неопределённости и ошибки. Размер домена явно определяет масштабную динамику и эффекты ландшафта, а вертикальный и горизонтальный шаг сетки определяет наименьший разрешимый масштаб [145]. Они вместе влияют на спектр разрешённых масштабов и характер масштабного взаимодействия в динамике модели [146], поэтому ответственны за образование и распределение осадков.

Чтобы получить адаптированную локальную модель WRF-ARW, для предсказания не только количества осадков, но и их пространственного распределения, к территории юго-запада Ирана в настоящей главе проводятся 3 этапа.

1. На первом этапе проводится оптимизация набора схем параметризации;
2. На втором этапе проверяется анализ и выбор оптимального размера и структуры расчётных областей модели;
3. На третьем этапе адаптация модели выполняется с целью оптимизации пространственного разрешения расчётных областей модели.

4.1 Оптимизация набора схем параметризации модели для юго-запада Ирана

В этом разделе изучается чувствительность модели WRF-ARW к выбору физических параметризаций на юго-западе Ирана по 6-и выбранным датам, указанным в таблице 12 для первого этапа. Для адаптации модели к конкретной экономически важной территории необходимо оценить качество краткосрочного прогнозирования осадков с высоким горизонтальным разрешением.

В численных экспериментах была использована трёхступенчатая телескопизация (рисунок 4.1). Три области расчётов были расположены так, чтобы наилучшим образом учесть свойства рельефа Ирана. Родительский домен (DO1) покрывает территорию 1800×1800 км с шагом сетки 15 км. Он охватывает большую часть Ближнего Востока для того, чтобы правильно описать синоптические условия, определяющие погоду региона. Первый вложенный домен (DO2) охватывает территорию 1100×1100 км с шагом сетки 5 км и представляет западный Иран. Сетка третьего домена (DO3) покрывает территорию 440×380 км, имеет шаг 1,7 км и охватывает юго-запад Ирана, включая центральную часть гор Загрос. Моделирование при этом высоком разрешении (шаг 1-2 км) использовано потому, что в работах [49], [147]—[149], где оценивалось качество прогноза осадков для периодов разной продолжительности, было установлено, что чем более высоко пространственное разрешение, тем лучше результаты. Кроме того, оно даёт более точное представление ландшафта.

Для изучения влияния выбора схем параметризации на результаты прогноза были выполнены 9 численных экспериментов (в таблице 14). Все параметризации и их комбинации для этих экспериментов выбраны на основании анализа литературных источников, приведённых в разделах 2.3 и 3.1. Контролируемыми параметрами выбраны характеристики, обозначаемые в модели, как «конвективный дождь» (RAIN) для доменов DO1 и DO2, и «не конвективный дождь» (RAINNC) для восьми различных конфигураций схем параметризации для всех доменов.

Таблица 14 — Набор параметризаций физических процессов в проведённых численных эксперимента

Численный эксперимент	Схемы			
	ПМО	ПКО	ППС	ППЗ
WRF1	Lin	KF	YSU	R_MM5
WRF2	Lin	GF	MYJ	Eta
WRF3	WSM6	BMJ	MYJ	Eta
WRF4	WSM6	GF	YSU	R_MM5
WRF5	Thompson	KF	MYJ	Eta
WRF6	Thompson	BMJ	YSU	R_MM5
WRF7	Thompson	BMJ	MYJ	Eta
WRF8	WSM6	KF	MYJ	Eta
WRF9	Thompson	GF	MYJ	Eta

Замечания по комбинациям, указанным в таблице 14:

1. ПКО используется только для двух крайних областей DO1 и DO2, но не используется для DO3.
2. Моделирование с использованием схем YSU использует пересмотренную ППЗ R_MM5, в то время как моделирование с использованием схемы MYJ использует схему ППЗ Eta. (в модели WRF некоторые схемы ППС привязаны к конкретным ППЗ [33], поэтому здесь нельзя использовать одну общую ППЗ)

Поскольку большинство РГМ доступны с пространственным разрешением 10 км или более, для учёта конвективного эффекта, который не может быть описан явно на крупной сетке, требуется схема ПКО. Значительные неопределённости до настоящего времени остаются в схемах ПКО и, следовательно, в осадках переходят в расчёт осадков. Моделирование с более высоким разрешением (шаг менее 4 км), по мнению некоторых авторов [147], [148], [150], позволяет удалить схему конвекции и связанные с ней неопределённости.

Использование модели WRF-ARW с разрешением 1,7 км, как считается, явно описывает экстремальные осадки, связанные с конвекцией, и не зависят от выбора ПКО. Следует также отметить, что все области (DO1, DO2 и DO3) используют аналогичные граничные условия и физические схемы, поэтому шаблоны циркуляции, имитируемые в DO1, напрямую связаны с сильными осадками, моделируемыми в DO3.

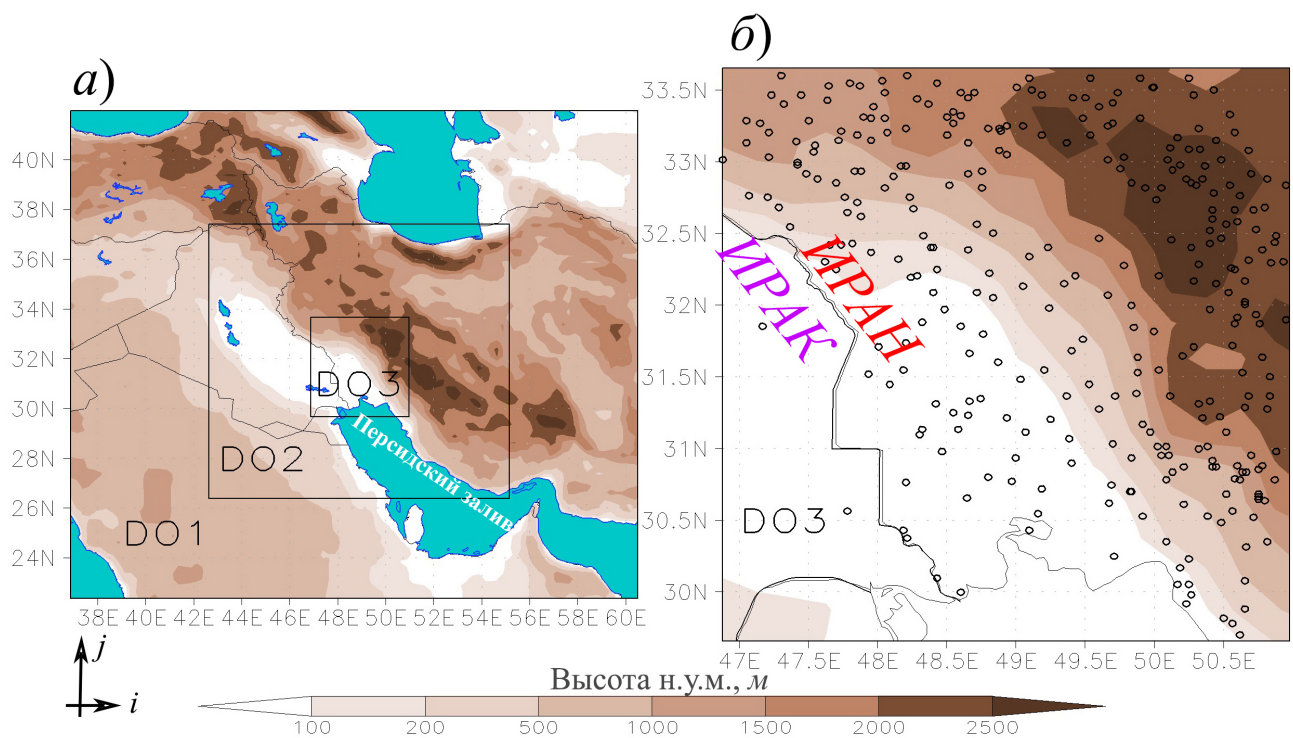


Рисунок 4.1 — (а) Рельеф местности и конфигурация доменов модели WRF: родительский домен (DO1), вложенные (DO2 и DO3); (б) DO3 с шагом сетки 0,017 градусов, в котором обозначены кружками станции, регистрирующие осадки

Всего проведено 54 численных экспериментов (6 случаев по 9 комбинаций параметризаций в каждом). После проведения численных экспериментов на основе анализа оценок ошибок удалось определить комбинацию параметризаций физических процессов, дающую наилучшие оценки прогноза осадков.

На рисунке 4.2, в качестве примера, показаны фактические (а, б и в) и модельные (г, д, е) поля суточного количества осадков на юго-западе Ирана для случая «№5» (см. таблицу 12) для комбинации «WRF5» (см. таблицу 14). Видно, что при всех разрешениях модель правильно воспроизводит пространственное распределение осадков. При доменах DO1 и DO2, максимальное количество осадков прогнозируется над прибрежной территорией Персидского залива на юге провинции. В домене DO3 с шагом сетки 1,7-км область максимального количества осадков перемещена над Персидскими заливом, вследствие чего в прибрежных территориях занижаются осадки, и они становятся несравнимыми с фактическими значениями. В этом домене оказалось возможным получить более правильное поле осадков в сравнении с другими доменами. Weisman и

др. [66] обнаружили, что более высокие разрешения, по-видимому, лучше описывают структурные особенности конвективных бурь. Однако это не приводило к улучшению прогнозов времени и местоположения бури.

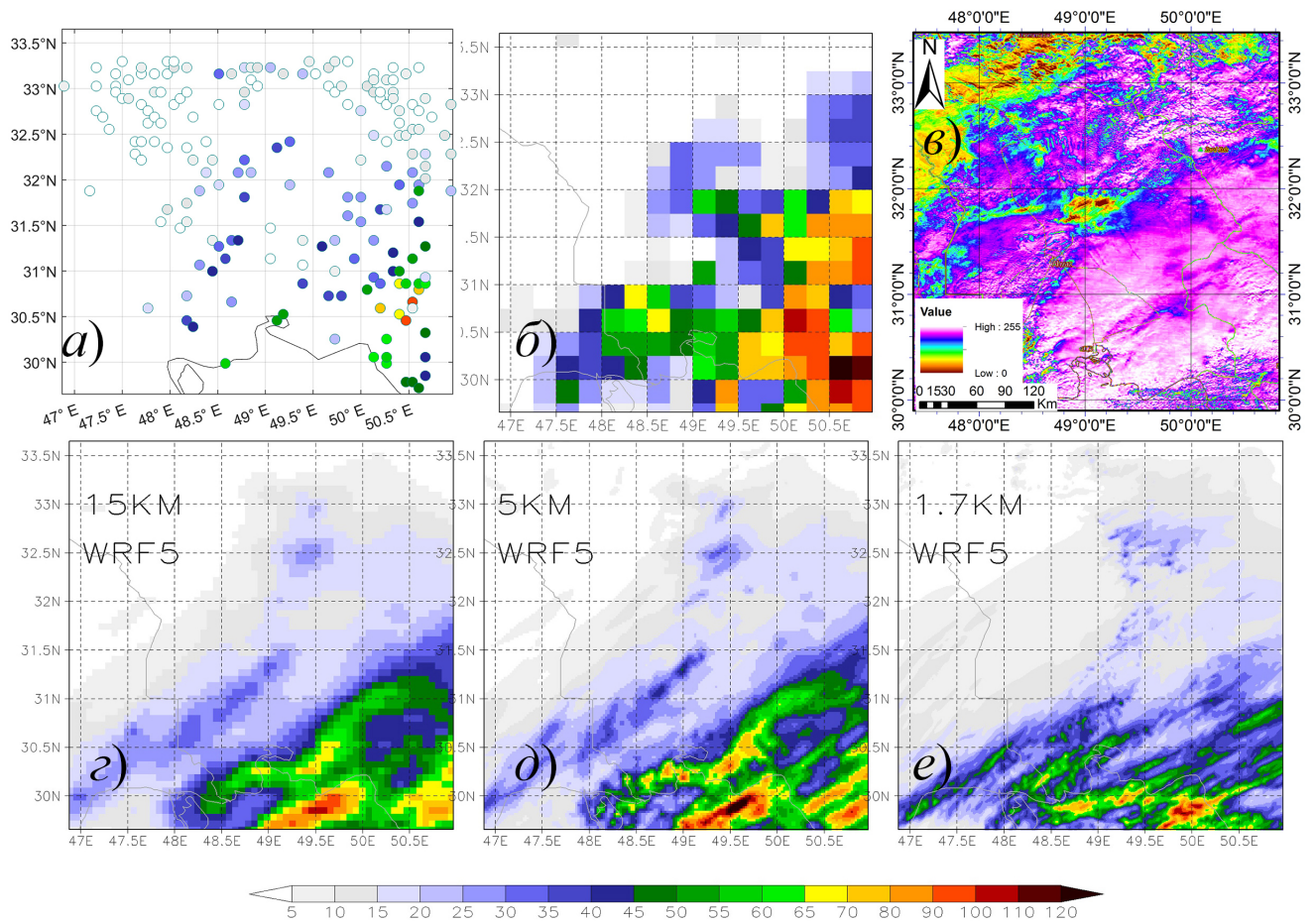


Рисунок 4.2 — Суточное количество осадков (мм) для случая «№5» при комбинации «WRF5» над юго-западом Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков и (г) DO1 (15-км); (д) DO2 (5-км) и (е) DO3 (1,7-км)

Как видно из рисунка 4.3 (а, д, е), во всех доменах значения осадков в градациях ГСО и ГУО завышены от полутора до трёх раз соответственно, и занижены в полтора раза в ГСИО и ГОСО. Значения CORR по всем доменам положительные, хотя в ГСО они варьируется от -0,09 до 0,20 (рисунок 4.3в). В домене DO2 ошибки прогноза осадков на всех градациях наименьшие. В этом домене, как и в других, наибольшие ошибки от 16 до 35 мм/сутки наблюдаются в ГОСО (рисунок 4.3б, 4.3д).

Индекс BIAS (рисунок 4.3е) подтверждает во всех доменах завышение моделью в ГСО (BIAS варьируется от 1,03 по 1,18) и занижение в ГОСО (BIAS

равен 0,66). ГУО воспроизводятся моделью хорошо, со средним значением BIAS 1,04. Индексы FAR и POD для всех типов доменов в ГСО не показывают значительной разницы. Но, начиная с ГУО, преимущество DO2 очевидны. По анализу коэффициента успешности GSS (рисунок 4.3к) так же лучшим доменом по всем градациям является, использующий шагом сетки равен 5 км. Для всех градаций значение GSS положительное, что показывает способность модели успешно прогнозировать осадки, причём домен с 5-км шагом сетки имеет лучшие оценки.

На рисунке 4.4 в качестве примера приведены поля суммарного количества осадков за сутки на юго-западе Ирана для случая №3 из таблицы 12 для первого этапа по всем комбинациям (см. таблицу 14) на сетках с 5-км шагом (DO2) и фактические данные наблюдений, TRMM и снимок Aqua/MODIS.

Проанализируем результаты в регионах, выделенным красным контуром, где наблюдаются сильные осадки. На основании сравнения фактических и модельных результатов видно, что по всем конфигурациям, неплохо воспроизводится пространственная структура поля осадков. Сравнивая между собой конфигурации WRF3, WRF6 и WRF7, использующие схему параметризации BMJ для конвекции, представленные на рисунках 4.4(е, и, й), можно сделать вывод о том, что качество прогноза сильно чувствительно к схеме ПКО, причём при использовании параметризации BMJ были получены худшие прогнозы. В этих комбинациях поле осадков сильно занижено. В подобном случае De Silva и др. [151] сообщили, что при использовании схемы BMJ в моделировании осадков на Шри-Ланке результаты были не высокого качества. Схема BMJ создаёт недостаточную влажность. Gilliland и Rowe [152] также указали, что схема BMJ затрудняет генерацию осадков в некоторых условиях, таких как тёплая и сухая атмосфера. Так же можно отметить, учитывая единственное отличие WRF6 от WRF7 в ППС, что относительное преимущество WRF7 над WRF6 может быть за счёт использования схемы MYJ в WRF7. Из сравнения между собой конфигурации WRF3, WRF4 и WRF8, использующих схему WSM6 для ПМО, можно отметить, что качество прогноза также зависит от схемы ПМО, так как использование схемы WSM6 привело к снижению качества результатов при применении разных схем ПКО и ППС в данных комбинациях. Комбинации WRF1 и WRF2 имеют одинаковую схему ПМО—Lin. Можно отметить, что они создавали правильное поле осадков, но количества осадков завышаются. Так же можно отметить, учитывая единственное отличие WRF5 от WRF9 в ПКО, что относительное преимущество WRF5 над WRF9 может

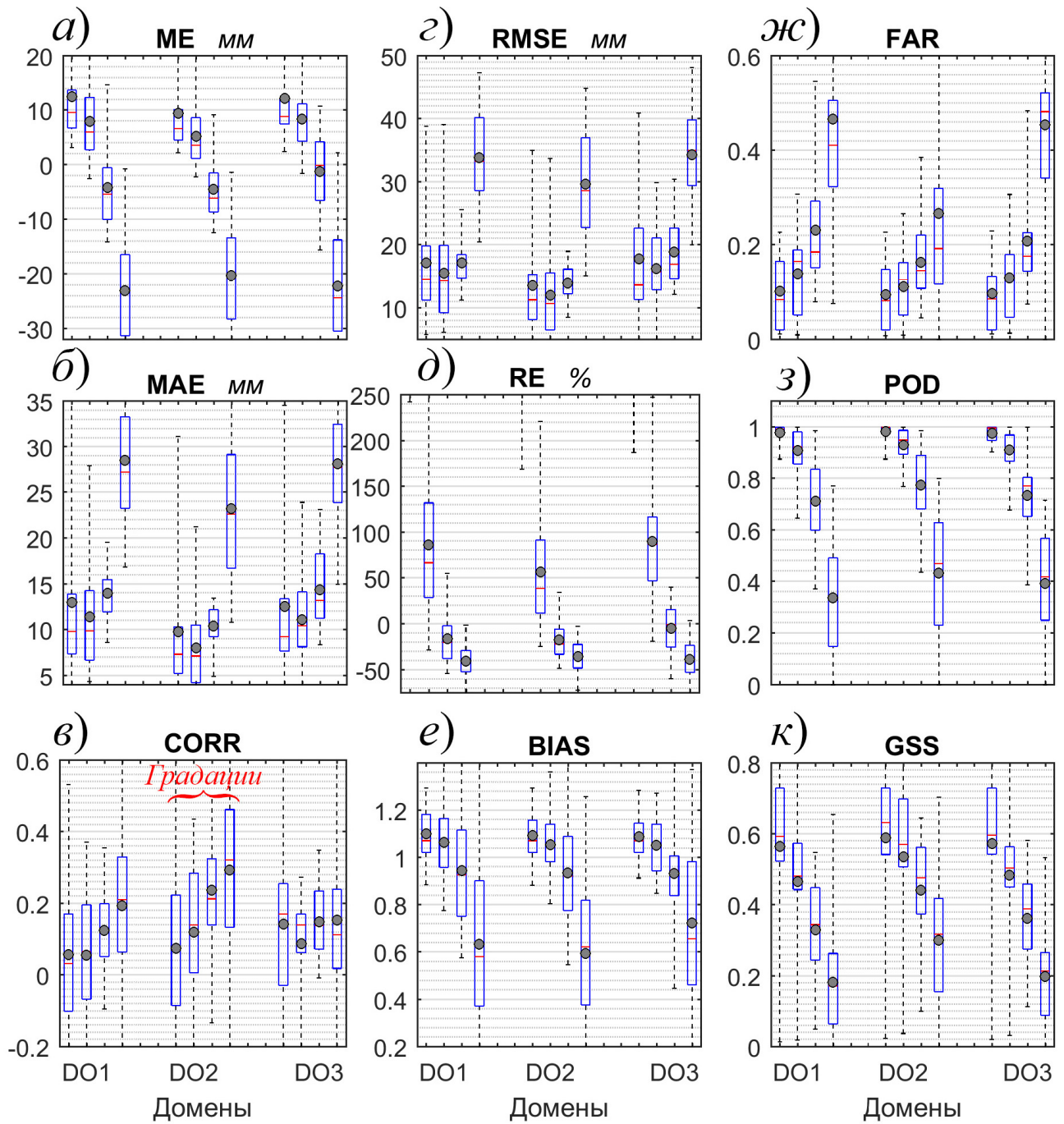


Рисунок 4.3 — Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE(г); RE(д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (и) для трёх доменов (DO1, DO2 и DO3). Прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и третьим квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение, выносными – область 10–90 %.

быть за счёт использования схемы KF в WRF5. Про комбинации WRF5, можно сказать, что она смогла воспроизводить в правильное место выпадения осадков и не показывает такую тенденцию к завышению количество осадков, как при использовании комбинаций WRF1, WRF2 и WRF4.

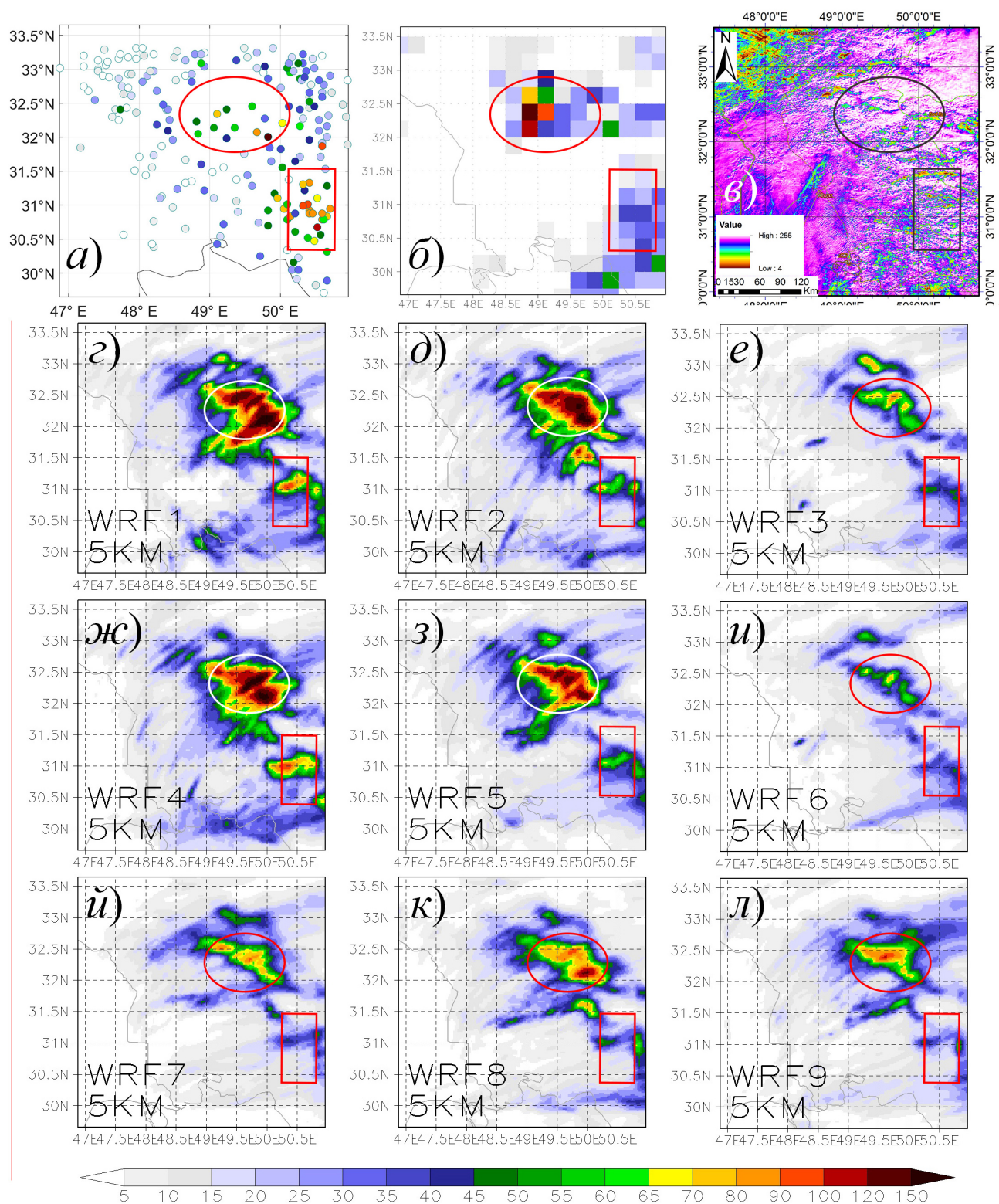


Рисунок 4.4 — Суммарное количество осадков за сутки для случая «№3» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS, модельные поля в домене DO2 в комбинациях: (г) «WRF1», (д) «WRF2», (е) «WRF3», (ж) «WRF4», (з) «WRF5», (и) «WRF6», (й) «WRF7», (к) «WRF8» и (л) «WRF9»

Можно сделать вывод о том, что при комбинациях WRF1, WRF2 и WRF4 количество осадков в регионе, выделенном эллипсоидом на рисунке 4.4, сильно завышается. Наименьшее завышение наблюдается при комбинациях WRF5, WRF8 и WRF9. В других комбинациях в этом же регионе занижается количество осадков. В регионе, выделенном прямоугольным на рисунке 4.4, комбинации WRF1 и WRF8 правильно смогли воспроизвести максимум осадков, хотя, возможно, это следствие общего завышения осадков при этой комбинации параметризаций. Комбинации WRF2 и WRF5 правильно описали поле осадков, хотя и занизили их. Остальные комбинации сильно занижают количество осадков в этом же регионе.

Анализ результатов расчётов (рисунок 4.5) с помощью линии регрессии по всем комбинациям в домене DO2, показывает, что для ГСО и ГУО модель завышает количество выпавших осадков, поскольку линия регрессии расположена выше линию идеала ($y = x$), а для ГСИО и ГОСО занижает их, так как линия регрессии расположена ниже линии идеала. Комбинации WRF5 и WRF2 имеют лучшие значения по R^2 и CORR.

На рисунке 4.6 представлены статистические индексы для разных градаций количества осадков по доменам DO2. На основе этого рисунка можно сделать вывод о том, что для ГСО меньшие ошибки получены в комбинациях «WRF2» и «WRF8», значения CORR (рисунок 4.6д) в этой градации худшие за счёт тенденции модели к завышению осадков (см. рисунок 4.6а, 4.6з). Для ГУО к этим комбинациям добавляется ещё и комбинации «WRF7» и «WRF3». Для ГСИО и ГОСО лучшие результаты получены в комбинации «WRF5», а следующим с точки зрения минимума ошибок является комбинация «WRF2».

Интересно дать сводную оценку качества воспроизведения осадков при разных комбинациях параметризаций. Однако простое осреднение оценок по всем случаям не позволяет чётко уловить отличия. Поэтому все оценки для каждого случая были ранжированы. Например, в случае №1 для ГУО самая маленькая ошибка ME была в комбинации WRF7, а самая большая—в комбинации WRF1. Поскольку было всего девять комбинаций, то лучшей WRF7 присвоено 9 баллов, а худшей WRF1—1 балл. Таким образом, если бы метод WRF7 оставался лучшим для всех случаев, то он набрал бы 54 балла, а худший метод мог бы получить 6 баллов. В таблице 15 для всех оценок приведены суммы баллов каждой комбинации по всем случаям, полученные по формуле (4.1):

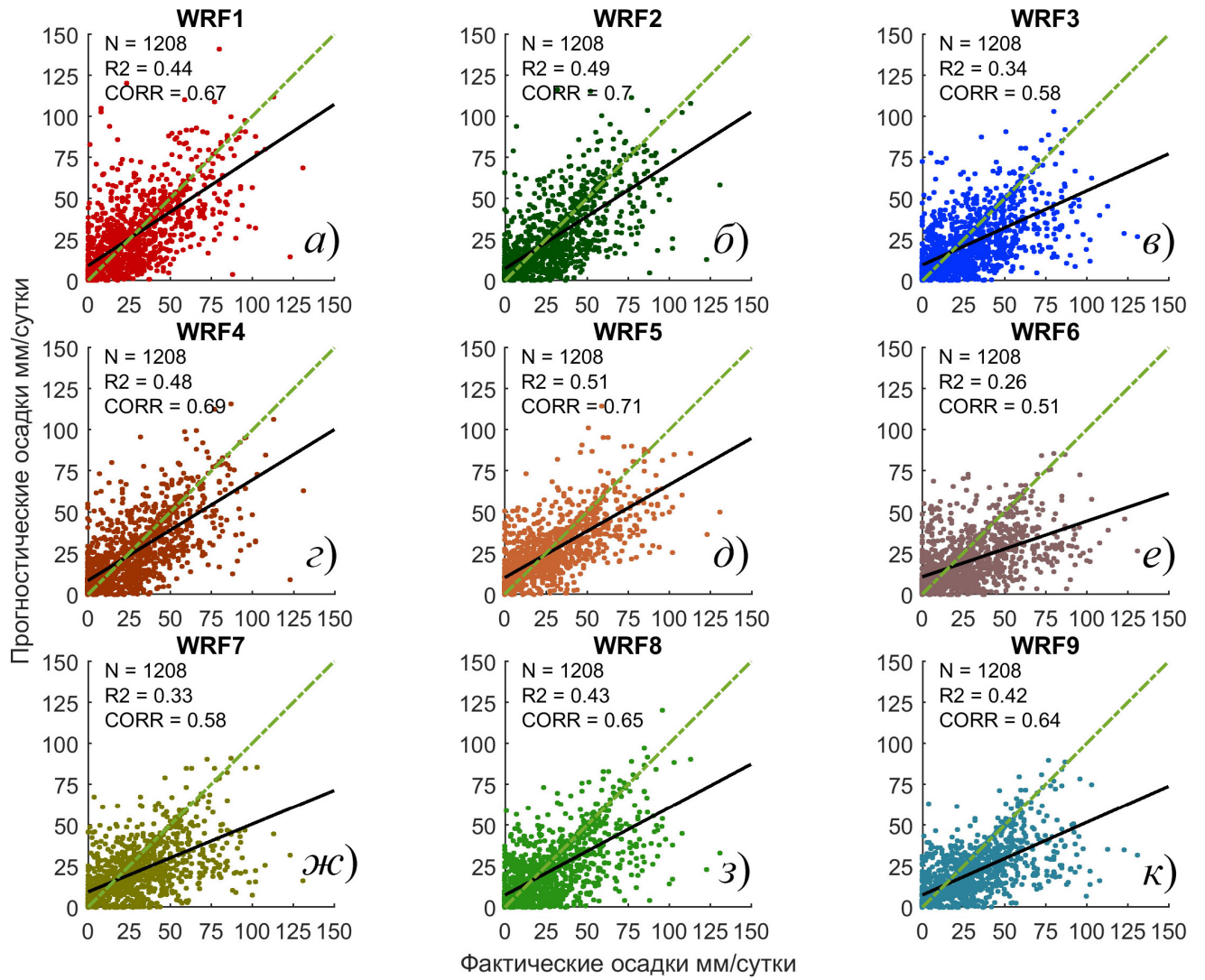


Рисунок 4.5 — Сравнение фактических осадков и осадков, рассчитанных для всех комбинаций по домену DO2: а) WRF1; б) WRF2; в) WRF3; г) WRF4; д) WRF5; е) WRF6; ж) WRF7; з) WRF8 и к) WRF9.

$$\psi_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} \quad (4.1)$$

где n — число прогнозируемых случаев,

α_i — количество баллов, набранное рассматриваемой оценкой в эксперименте i ($1 \leq \alpha_i \leq 9$, $\alpha_i \in \mathbb{N}$).

Не рассматривались случаи ГСО, так как результаты не сильно различаются, да и значение этих осадков для практики мало. В каждой клетке таблицы 15 вверху указано название комбинации, имеющей самую высокую оценку (лучшее качество), которая приведена в скобках. WRF9 демонстрирует лучшие оценки для ГУО, чем остальные комбинации. WRF2 для ГОСО даёт лучшие оценки, чем для ГСО и ГУО. Комбинация WRF2 — на второй месте по

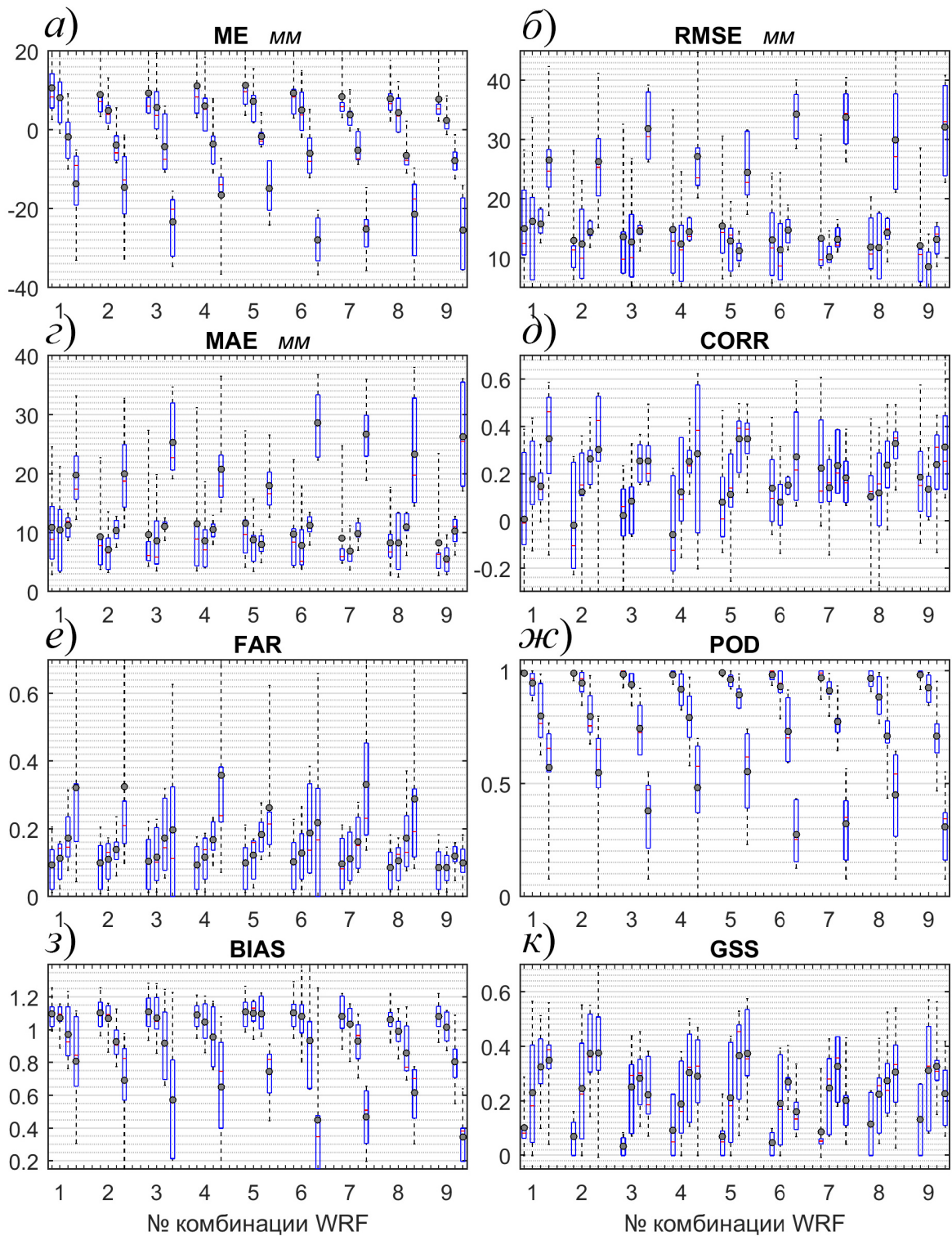


Рисунок 4.6 — Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); RMSE (б); MAE (в); CORR (г) и качественного анализа FAR (д); POD (е); BIAS (ж) и GSS (з) для восьми комбинаций физических параметризаций (WRF1, WRF2, WRF3, WRF4, WRF5, WRF6, WRF7, WRF8 и WRF9) в домене DO2 и по шести случаям

качеству. Комбинация WRF5 для ГСИО и ГОСО демонстрирует преимущество над другими комбинациями.

Таблица 15 — Ранжированный по Ψ_j список оценок совокупности комбинаций для доменов DO2.

Градация	ME	MAE	RMSE	CORR	BIAS	FAR	POD	GSS
ГУО	WRF9 (44)	WRF9 (41)	WRF9 (44)	WRF1 (43)	WRF9 (41)	WRF9 (46)	WRF5 (41)	WRF9 (48)
	WRF7 (37)	WRF2 (37)	WRF6 (40)	WRF7 (33)	WRF8 (39)	WRF8 (37)	WRF1 (39)	WRF3 (35)
	WRF8 (34)	WRF6 (36)	WRF7 (35)	WRF3 (31)	WRF1 (32)	WRF7 (34)	WRF2 (38)	WRF7 (34)
	WRF2 (32)	WRF7 (31)	WRF3 (30)	WRF9 (30)	WRF7 (32)	WRF2 (31)	WRF4 (32)	WRF8 (31)
	WRF6 (32)	WRF3 (30)	WRF8 (30)	WRF4 (29)	WRF3 (31)	WRF3 (31)	WRF6 (29)	WRF2 (30)
	WRF3 (27)	WRF8 (30)	WRF2 (25)	WRF2 (27)	WRF2 (27)	WRF1 (27)	WRF3 (28)	WRF1 (28)
	WRF4 (27)	WRF4 (22)	WRF4 (25)	WRF5 (27)	WRF4 (26)	WRF4 (26)	WRF9 (26)	WRF5 (25)
	WRF5 (20)	WRF5 (22)	WRF5 (22)	WRF8 (26)	WRF5 (23)	WRF5 (19)	WRF7 (19)	WRF4 (22)
	WRF1 (17)	WRF1 (21)	WRF1 (19)	WRF6 (24)	WRF6 (19)	WRF6 (19)	WRF8 (18)	WRF6 (17)
	WRF5 (44)	WRF5 (51)	WRF5 (52)	WRF5 (49)	WRF2 (42)	WRF9 (41)	WRF5 (50)	WRF5 (41)
	WRF7 (35)	WRF7 (33)	WRF9 (38)	WRF9 (34)	WRF7 (37)	WRF6 (36)	WRF2 (40)	WRF2 (40)
	WRF1 (34)	WRF9 (33)	WRF7 (36)	WRF4 (31)	WRF5 (34)	WRF3 (35)	WRF1 (38)	WRF7 (33)
ГСЮ	WRF2 (33)	WRF2 (32)	WRF3 (29)	WRF8 (31)	WRF1 (29)	WRF7 (35)	WRF4 (31)	WRF9 (31)
	WRF4 (30)	WRF4 (29)	WRF2 (28)	WRF2 (30)	WRF4 (29)	WRF2 (33)	WRF7 (28)	WRF3 (28)
	WRF6 (24)	WRF3 (27)	WRF4 (25)	WRF3 (29)	WRF8 (27)	WRF8 (25)	WRF3 (26)	WRF1 (26)

Продолжение Таблицы 15

ГОСО	WRF8 (24)	WRF8 (23)	WRF8 (24)	WRF7 (28)	WRF6 (26)	WRF5 (23)	WRF6 (21)	WRF4 (26)
	WRF3 (23)	WRF6 (22)	WRF6 (23)	WRF6 (22)	WRF3 (23)	WRF1 (22)	WRF8 (19)	WRF6 (23)
	WRF9 (23)	WRF1 (20)	WRF1 (15)	WRF1 (16)	WRF9 (23)	WRF4 (20)	WRF9 (17)	WRF8 (22)
	WRF1 (47)	WRF5 (44)	WRF5 (46)	WRF1 (38)	WRF1 (44)	WRF9 (40)	WRF1 (48)	WRF5 (42)
	WRF2 (44)	WRF2 (42)	WRF2 (39)	WRF4 (36)	WRF5 (43)	WRF3 (38)	WRF5 (42)	WRF2 (41)
	WRF5 (41)	WRF1 (40)	WRF1 (38)	WRF2 (35)	WRF2 (41)	WRF6 (33)	WRF2 (41)	WRF1 (38)
	WRF4 (38)	WRF4 (36)	WRF4 (37)	WRF8 (34)	WRF4 (35)	WRF5 (31)	WRF4 (34)	WRF4 (32)
	WRF8 (27)	WRF8 (33)	WRF8 (31)	WRF5 (32)	WRF8 (32)	WRF8 (30)	WRF8 (30)	WRF8 (31)
	WRF3 (25)	WRF3 (25)	WRF3 (23)	WRF9 (29)	WRF3 (26)	WRF2 (27)	WRF3 (26)	WRF3 (24)
	WRF7 (20)	WRF7 (19)	WRF9 (20)	WRF3 (27)	WRF7 (22)	WRF7 (27)	WRF7 (19)	WRF7 (24)
	WRF9 (18)	WRF9 (19)	WRF6 (18)	WRF6 (21)	WRF6 (16)	WRF1 (24)	WRF6 (16)	WRF9 (24)
	WRF6 (10)	WRF6 (12)	WRF7 (18)	WRF7 (18)	WRF9 (11)	WRF4 (20)	WRF9 (14)	WRF6 (14)

Замечание: в каждой клетке комбинации отсортированы от лучшего к худшему качеству моделирования осадков. В скобках приведены суммы баллов ψ_j .

По результатам из рисунка 4.6 и таблицы 15, в частности, можно согласиться с [92], о том, что использование параметризация ПКО—ППС: KF—MYJ (в комбинации WRF5) представляет собой самую успешную комбинацию для моделирования сильных осадков.

В этом разделе описана методика выбора лучшей комбинации параметризации при адаптации модели WRF к исследуемой территории. Согласно

полученным результатам, лучшей является следующая комбинация параметризаций физических процессов (комбинация параметризаций «WRF5» в этом разделе): ПМО—схема Thompson, ПДР—схема RRTM, ПКР—Dudhia, ППЗ—Eta, ППП—Noah, для ППС—схема MYJ и для ПКО—схема KF.

Преимущество схемы параметризации Kain—Fritsch может быть связано с тем, что, она учитывает комплексы микрофизических параметров, благодаря чему возможно описание мезомасштабных процессов, восходящих потоков и осадкообразования лучше, чем в других схемах. Преимущество схемы параметризации Thompson может быть связано с тем, что она описывает образование в облаке как водяных капель, так и ледяных кристаллов, а также эффективно учитывает превращение облачного льда в снег.

Эта комбинация параметризации будет использована в дальнейших исследованиях в разделах 4.2 и 4.3.

4.2 Влияние размера и структуры доменов на качество прогнозов

Известно, что увеличение размера модельных доменов и их пространственного разрешения сильно влияет на время, затрачиваемое на прогноз, и требует дополнительных вычислительных ресурсов. Например, каждый прогноз в численных экспериментах, приведённых в разделе 4.1, посвящённых выбору оптимальной комбинации параметризации для прогноза с заблаговременностью 30 часов, занимал около 24 часов на компьютерных ресурсах, предоставленных СПбГУ.

Следует отметить, что, с одной стороны, модельный домен с высоким пространственным разрешением, шаг сетки которого равен 1 – 2 км, был бы более желателен для изучения влияния орографии на атмосферные процессы и позволил бы избавиться от необходимости применения ПКО в численных экспериментах, но с другой стороне, такие эксперименты являются дорогостоящими и могут оказаться недоступными. Для оперативного же прогноза погоды, когда затрачиваемое на расчёт время имеет критичное значение, эффективность мелких шагов сетки требует специального изучения.

При моделировании были использованы граничные условия двухстороннего взаимодействия. Это означает, первый вложений домен (DO2), с шагом

сетки равен 5 км, испытывает влияние, как родительского (DO1), так и второго вложенного домена (DO3). Результаты моделирования в DO2 оказались ближе к фактическим полям, чем результаты моделирования в домене с наибольшим пространственным разрешением DO3. Это означает, что уместно оценить влияние структуры и размера выбираемых доменов, а также объясняет намерение исследовать взаимодействия полей родительского и каждого вложенного домена. Для проведения этих исследований рассматривались четыре разных модельных области (эксперименты А, В, С и D), характеристики которых представлены в таблице 16 и на рисунке 4.7.

Таблица 16 — Характеристики доменов в экспериментах

шаг сетки	45км	15км	15км	5км	5км	1,7км
число узлов	40x40	120x121	73x79	217x235	91x106	264x307
Эксперимент А		DO1		DO2		DO3
Эксперимент В		DO1		DO2		
Эксперимент С			DO1		DO2	
Эксперимент D	DO1		DO2		DO3	

Как известно, такого рода прогностические системы строятся по схеме «вложенных сеток». Выбранная конфигурация доменов объясняется целями, поставленными в каждом эксперименте:

1. Эксперимент А $\rightarrow$ соответствует ранее проведённым экспериментам, в которых оценивалась наилучшая комбинация параметризаций физических процессов. Всего используется три домена, первым вложенным из которых является исследуемый домен с шагом сетки 5 км.
2. Эксперимент В $\rightarrow$ изучает влияние отсутствия самого мелкого домена DO3 на качество моделирования в исследуемом домене DO2 при сравнении с экспериментом А. В нём используется всего два домена. Домен с шагом сетки 5 км является единственным вложенным.
3. Эксперимент С $\rightarrow$ по конфигурации такой же как эксперимент В. Отличаются только размеры доменов. Оценивается влияние изменения размера доменов на качество моделирования.
4. Эксперимент D $\rightarrow$ изучает влияние использования домена грубого разрешения (45 км) в качестве родительского домена по сравнению с

экспериментом С. Здесь домен с шагом сетки 5 км обладает самым высоким разрешением.

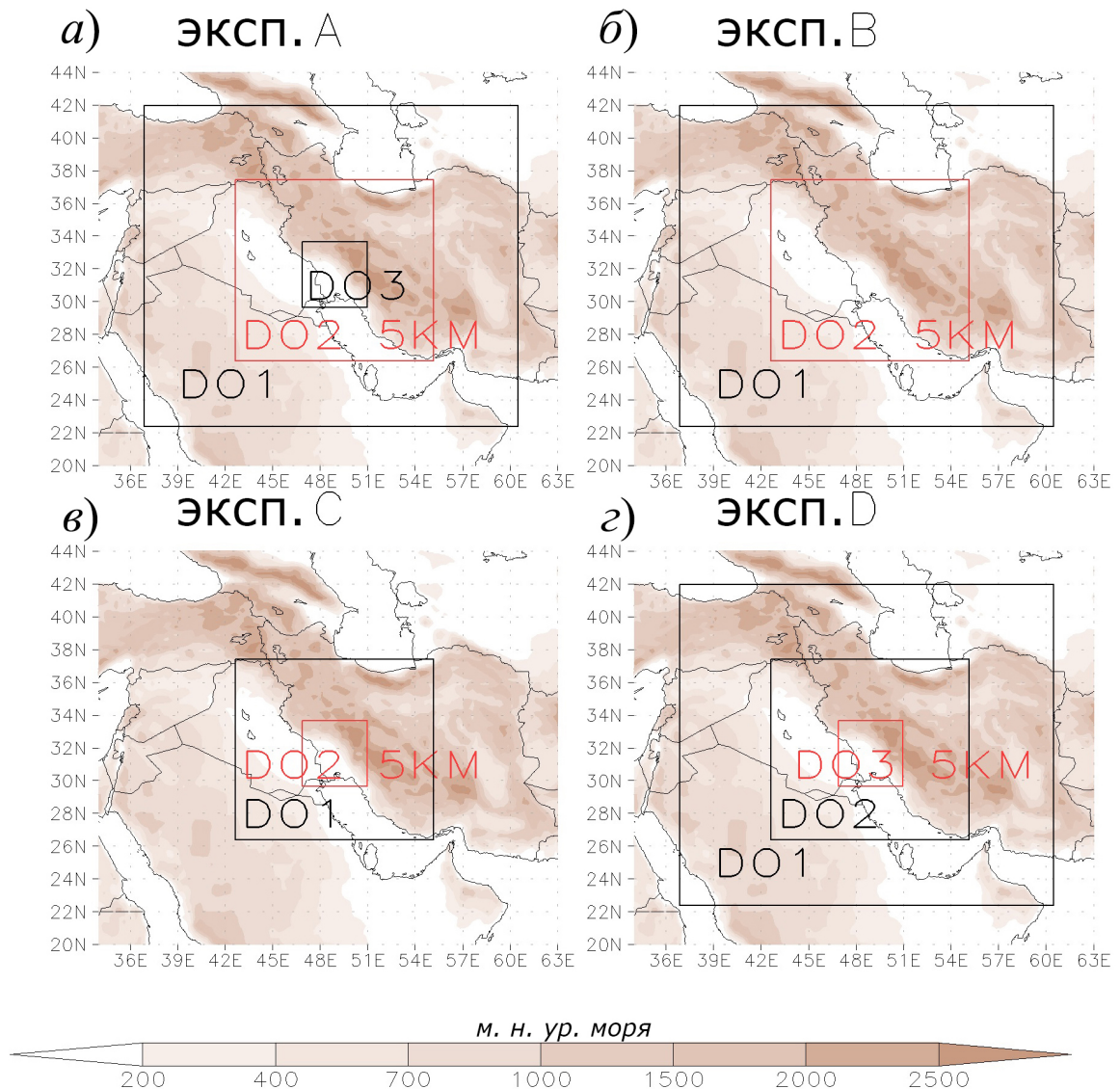


Рисунок 4.7 — Домены экспериментов: (а) эксперимент А, (б) эксперимент В, (в) эксперимент С и (г) эксперимент D; красным конторам выделен домен с 5-км шагом сети. Высота рельефа указана в метрах над уровнем моря

На рисунке 4.8 приведены фактические (а и б) и модельные (в, г, д, е) поля суточного количества осадков в домене шагом сетки 5-км для случая сильных осадков, выпавших 28.11.2009 на юго-западе Ирана.

Из визуального анализа рисунков 4.8д и 4.8е следует, что эксперименты С и D лучше воспроизводят поле осадков в юго-восточной части домена, выделенном контуром, где по фактическим данным наблюдений (4.8а), TRMM (4.8б) и снимок MODIS (4.8в) были зарегистрированы максимальные осадки, но их количество занижается. В экспериментах А и В (рисунки 4.8г и 4.8д) структура

осадков воспроизводится неправильно — минимум модельных осадков соответствует максимуму фактических (юго-восточная часть), а максимум модельных соответствует минимуму фактических (юго-западная часть домена).

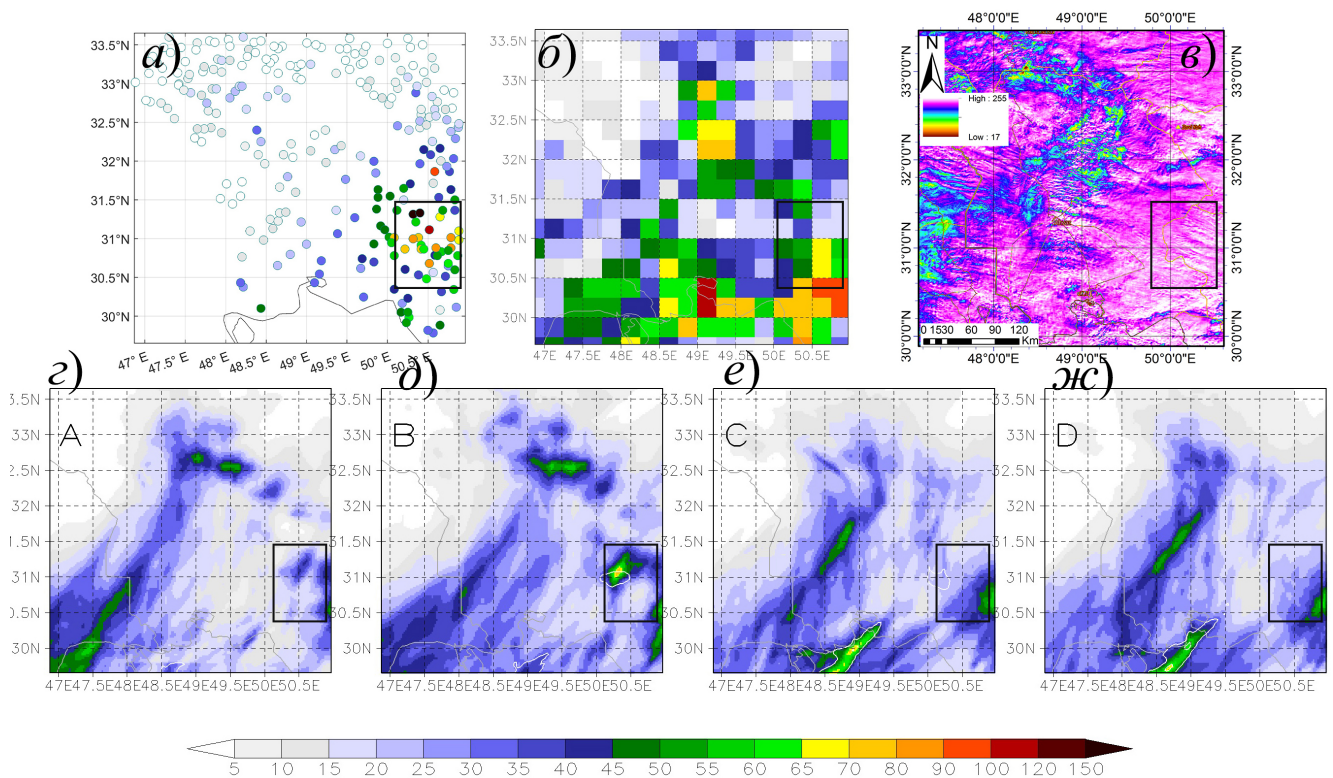


Рисунок 4.8 — Суточное количество осадков для случая сильных осадков 28.11.2009 на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM, (в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков; и по домен с 5-км шагом сетки экспериментов: (г) эксперимент А; (д) эксперимент В; (е) эксперимент С и (ж) эксперимент D.

Результаты сопоставления измеренных и рассчитанных для всех экспериментов по домену с шагом сетки 5 км приведены на рисунке 4.9. На рисунке приведены следующие данные: количество измерений — N , коэффициент детерминации — R^2 и коэффициенты корреляции Пирсона — $CORR$.

Рассматривая линию регрессии, проведённую по всем экспериментам, можно заметить, что для ГСО и ГУМ модель завышает количество выпавших осадков, а для ГСИО занижает их. Эксперименты С и D имеют лучшие значения по R^2 и $CORR$.

После проведения расчётов на основе анализа оценок ошибок удалось определить эксперимент, дающий лучшие оценки прогноза осадков. На рисунке 4.10

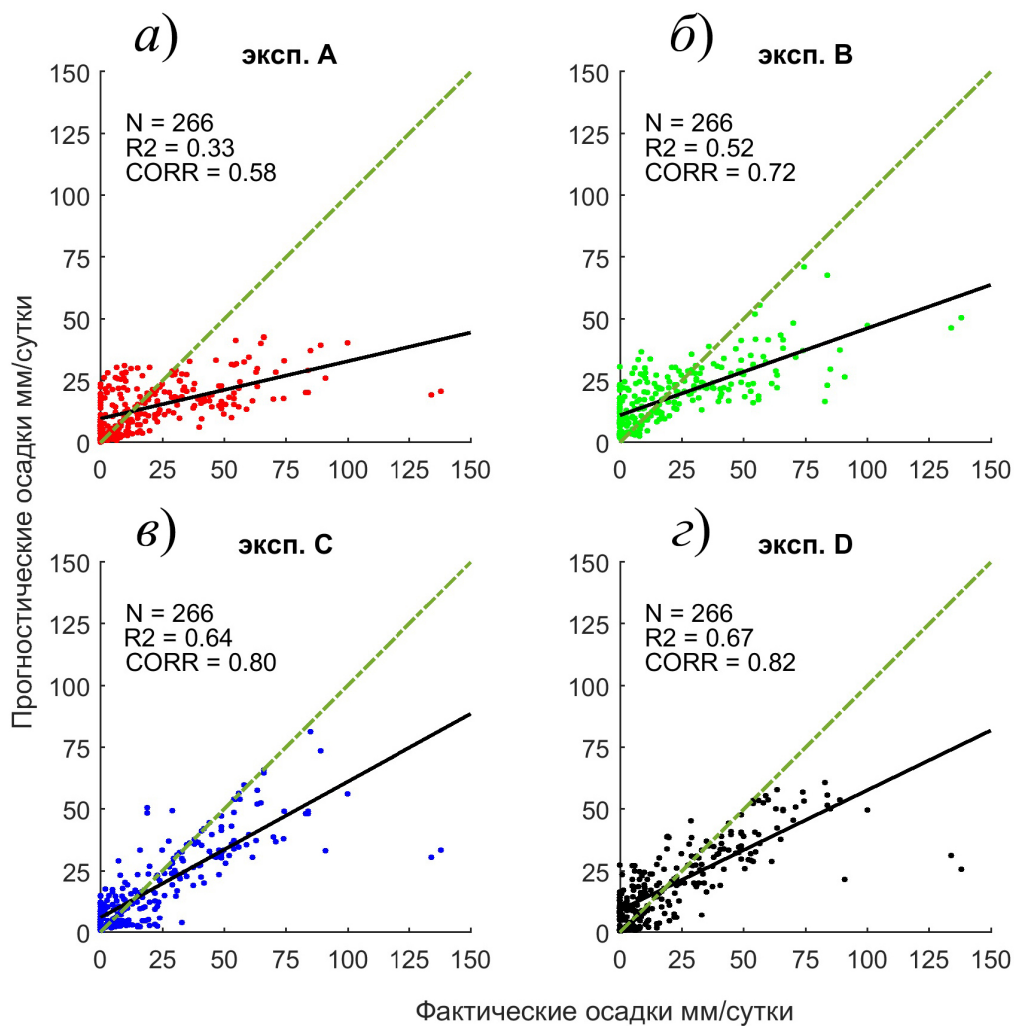


Рисунок 4.9 — Сравнение фактических осадков и осадков, рассчитанных для всех экспериментов по домен с 5-км шагом сетки: а) – эксперимент А, б) эксперимент В, в) эксперимент С и г) эксперимент D.

представлены статистические индексы оценок результатов моделирования осадков 28.11.2009. В этот день на большей территории юго-запада Ирана выпало большое количество осадков.

Анализируя статистические индексы ME, MAE и RMSE, представленные на рисунках 4.10а, 4.10б и 4.10в, можно сделать вывод о том, в эксперименте С для ГСО и ГУМ получены наименьшие ошибок. Следующий за ним по качеству эксперимент D. В эксперименте В в этих градациях ошибки меньше, чем в эксперименте А.

Для ГСИО и ГОСО наилучшие оценки получены в эксперименте D, за ним следуют по возрастанию ошибок: эксперименты С, В и А. Во всех экспериментах модель завышает осадки в ГСО и занижает ГОСО.

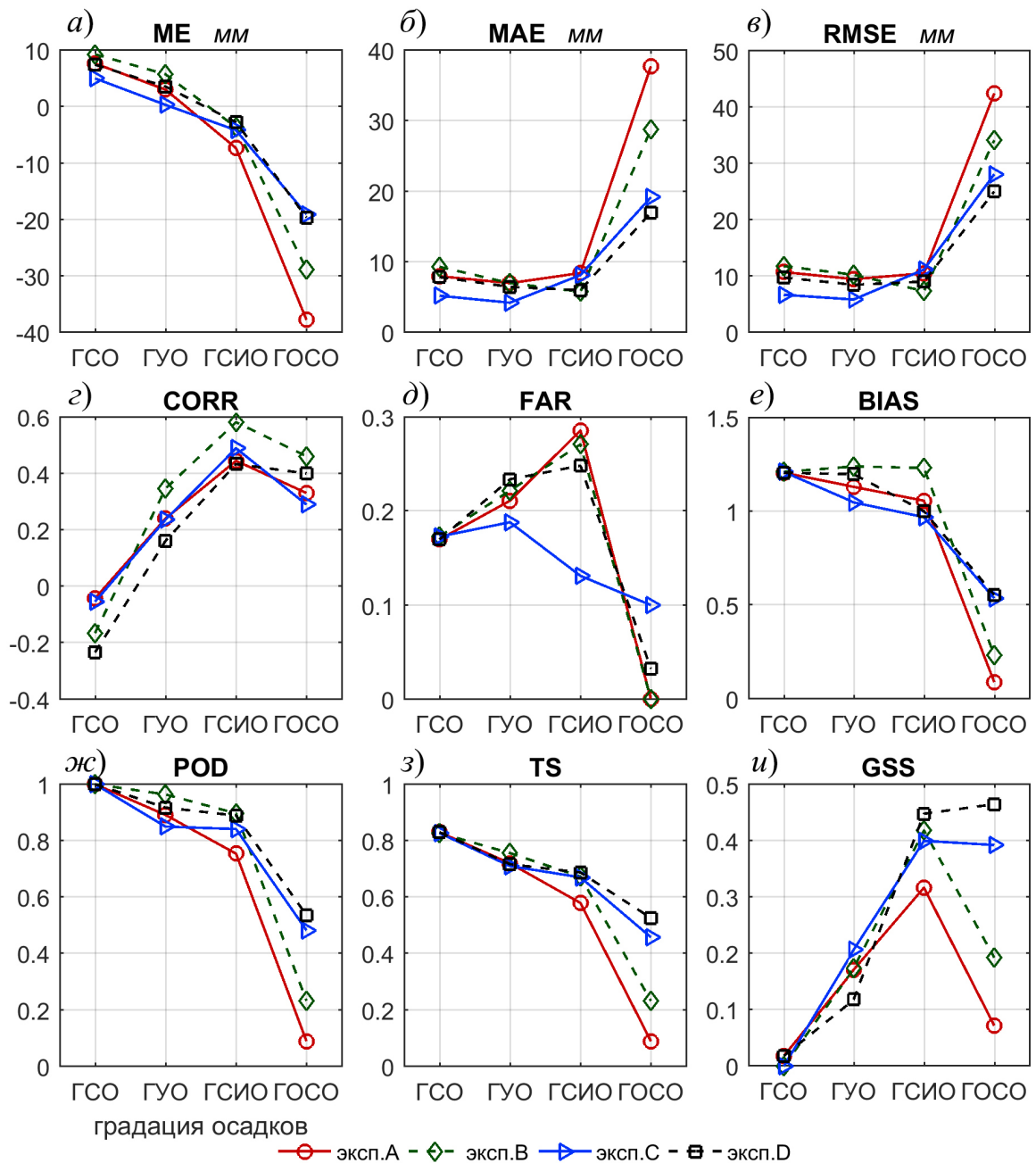


Рисунок 4.10 — Оценки ME (а); MAE (б); RMSE (в); CORR (г); FAR (д); BIAS (е); POD (ж); TS (з) и GSS (и), для случая сильных осадков в 28.11.2009 на юго-западе Ирана по разным градиациям осадков для домена с шагом сетки 5 км в каждом эксперименте.

Значения коэффициента корреляции CORR (рисунок 4.10г) очень маленькие и отрицательные для ГСО. Это связано с тем, что модель завышает значения в этой градиации и часто отсутствие осадков (0 мм) принимает за небольшие осадки (менее 5 мм), что приводит к отрицательным значениям

CORR. Для остальных градаций коэффициент корреляции имеет положительные значения и в ГСИО и ГОСО, где модель с меньшими ошибками воспроизводит осадки, лучшие результаты получены в эксперименте В.

Из анализа FAR (рисунок 4.10д) можно сделать вывод, что в ГСО все эксперименты имеют похожие и неплохие оценки (0,18), но для ГУО и ГСИО эксперимент С отличается меньшими ошибками, чем в остальных экспериментах. В ГОСО индекс FAR в экспериментах А и В имеет нулевое значение, что означает отсутствие ложных тревог, а значит по этому индексу названные эксперименты являются лучшими. Но не учитываются случаи пропуска явления, которые описываются индексом POD и TS.

По индексам POD и TS (рисунок 4.10ж и 4.10з) видно, что для ГСО во всех экспериментах получены похожие значения. Для ГУО эксперимент В — самый лучший, на втором месте эксперимент D. Для ГСИО и ГОСО эксперименты С и D, лучше других. Эксперимент А по всем градациям является худшим.

Индекс BIAS (рисунок 4.10е) оценивает отношение модельных осадков к наблюдавшимся. Для ГСО, ГУМ и ГСИО во всех экспериментах завышается количество осадков ($BIAS > 1$). Лучшие результаты отмечены в эксперименте С. В экспериментах С и D для ГСИО: $BIAS \approx 1$. В ГОСО наблюдается занижение количества во всех экспериментах. Эксперименты С и D дают лучшие и близкие между собой оценки. Эксперимент А — самый худший.

Из значения GSS (рисунок 4.10и) видно, что эксперимент С в ГСО и ГУО, даёт лучшие значения. Для ГСИО и ГОСО эксперимент D занимает первое место по эффективности. Резюмируя результаты можно сказать что:

- Для градаций ГСО и ГУО лучшим С, т.е. не следует использовать домен DO3, а шаг сетки в домене DO2 следует взять равным 5 км.
- Для ГСИО и ГОСО, градаций чрезвычайно важных для прогнозов опасных явления, эксперимент D оказывался самым лучшим. За ним по качеству следует эксперимент С. Это значит, что наилучшие результаты при прогнозах ГСИО и ГОСО, получаются, если использовать родительский домен с шагом 45 км, а для промежуточного домена выбрать шаг 15 км. Если сразу переходить от данных разрешением 1 градус (NCEP/NCAR) на домен с высоким разрешением, то возникают дополнительные ошибки.
- Эксперимент В показал лучшее качество прогнозов, чем эксперимент А, что доказывает положительное влияние отсутствия домена с высоким

разрешением на изучаемый домен (5-км шаг сетки). Высокое разрешение самого мелкого домена вносит в решение лишние шумы и ухудшает прогноз в исследуемом домене (шаг сетки 5 км). Генерация шума может быть связана и с отсутствием параметризации конвекции в домене DO3, хотя конвективные явления мелкого масштаба могут иметь место и в случае, когда ожидается, что конвекция хорошо описывается сеточными процессами.

Для такого сложного района, как юго-запад Ирана, представляется разумным выбрать «родительский домен» (большая часть Ближнего Востока) с пространственным разрешением 45 км, «первый вложенный домен» (с западного Ирака по центральному Ирану) 15 км, «второй вложенный домен», охватывающий область юго-запада Ирана, включая центральная часть гор Загрос порядка 5 км. Однако в этом случае описание горного рельефа будет произведено недостаточно точно, что может существенно сказаться на прогнозе осадков. Далее будет описано дополнительное исследование по оценке влияния ПКО и шага сетки в домене с высоким пространственным разрешением.

4.3 Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков

Интуитивно, можно было бы ожидать, что использование более высокого разрешения обеспечит более точное моделирование. Однако ранее выяснилось, что это не всегда так. Другие авторы, например, Pennelly и др. [153] и Cassola и др. [147] в своих исследованиях обнаружили, что более высокое пространственное разрешение позволило получить более точные результаты, хотя Roberts и Lean [154] описали случаи, когда использование более мелкой сетки не повысило, а понизило точность моделирования. Schlüter и Schädler [155] также не обнаружили улучшения в моделировании сильных осадков при уменьшении шага сетки с 7 до 2,8 км. Аналогичное наблюдение было сделано в работе Маддах и др. [139], где рассмотрено изменение точности прогноза осадков при увеличении пространственного разрешения модели (шаги сетки 5 и 1,7 км). Roberts и др. [156] опубликовали такой же вывод, когда горизонтальный шаг сетки уменьшался с 4 до 1 км.

Также известно, что на прогноз интенсивности экстремальных осадков влияет ПКО [143], [153]. Davis и Bosart [71] утверждали, что прогноз интенсивности и следа тропического циклона Диана (1984 г.) с помощью модели WRF-ARW чувствителен к используемым схемам параметризации. В частности, использование схемы KF [72] позволило хорошо предсказать интенсивность циклона Диана. Поскольку для точного прогноза интенсивности сильных осадков обычно стремятся использовать негидростатический вариант модели и высокое пространственное разрешение, то важно выяснить – действительно ли необходимо при этом использовать ПКО или можно надеяться на то, что такая модель без ПКО правильно опишет процесс образования сильных осадков.

Целью данного раздела является анализ влияния повышения разрешающей способности модели WRF-ARW на точность прогноза осадков при наличии или отсутствии ПКО. Поскольку в разделе 4.1 была получена оптимальная комбинация параметризаций, а в разделе 4.2 была получена оптимальная конфигурация доменов модели, то они будут использована далее.

На рисунке 4.7г представлена структура сеток модели, центр которых находится на юго-западе Ирана. Использовано три домена, обозначаемые в дальнейшем DO1, DO2 и DO3. Для изучения влияния пространственного разрешения на качество моделирования осадков были созданы четыре типа пространственного разрешения доменов, характеристики которых представлены в таблице 17.

Хотя по публикациям хорошо известно, что все физические процессы важны в мезомасштабном гидродинамическом моделировании сильных осадков, существуют разные мнения относительно использования или не использования схемы для ПКО в моделях с высоким разрешением. В частности, обычно не рекомендуется использовать ПКО при численном моделировании с горизонтальным шагом сетки менее 5 км [157], [158]. Считается, что, когда горизонтальные шаги сетки достаточно малы, конвекция становится сеточным процессом и, следовательно, не нуждается в параметризации. Поэтому многие предыдущие исследования, например, [49], [159], [160] были выполнены без использования схем ПКО в моделях с высоким разрешением (с шагом 3 – 4 км). Тем не менее, есть также недавние исследования, в которых использовались схемы ПКО в моделях с горизонтальным разрешением 3,3 км [147] и даже в 3 км [149]. В статье Nasrollahi и др. [49] показано, что использование схем ПКО улучшает результаты моделирования, когда шаг сетки меньше 10 км. Li и Pu [143]

указали, что даже при небольших шагах сетки ПКО полезна для описания конвективных систем и реалистического воссоздания структуры осадков. Однако они же отметили, что присутствие ПКО при 9-километровом шаге сетки улучшило результаты моделирования, в то время как эффект использования такой параметризации при шаге 3 км оказал небольшое влияние на результат.

Поэтому в описываемых экспериментах для тщательного сравнения результатов моделирования с различным разрешением во всех модельных доменах конвекция была параметризована (таблица 17 «III+», «IV+», «V+» и «VI+»). Были проведены и контрольные эксперименты, когда в наименьшей модельной области (DO3) ПКО не использована (см. таблицу 17 «III-», «IV-», «V-» и «VI-»).

Всего проведено 80 численных экспериментов (10 случаев $\times$ 8 типов домена).

Таблица 17 — Перечень экспериментов и их характеристики домена

Наименование экспери- мента	Шаг сетки по горизонтали, км			Количество узлов сетки; ixj			Размер, ис- следуемой территории; км x км		
	DO1	DO2	DO3	DO1	DO2	DO3	DO1	DO2	DO3
III–	27	9	3	67x67	121x130	147x168			
III+									
IV–	36	12	4	50x51	94x100	115x133	1800x1800	1100x1100	440x380
IV+									
V–	45	15	5	40x40	73x79	91x106			
V+									
VI–	54	18	6	34x34	61x67	76x91			
VI+									

Замечание: знак «–/+» в наименовании экспериментов обозначает, что в эксперименте не используется (–) или используется (+) ПКО в домене DO3.

Сначала проводился предварительный качественный визуальный анализ результатов моделирования осадков – анализировалось пространственное

распределение модельных и фактических осадков, которые определялись по TRMM и данным наблюдений.

Для примера на рисунке 4.11 показано фактическое (а, б и е) и модельное (в, г, д) поля суточного количества осадков на юго-западе Ирана для случая «№ 6» (см. таблицу 12, третий этап) в эксперименте «IV-» (см. таблицу 17). Видно, что при всех разрешениях модель правильно воспроизводит пространственное распределение осадков. При всех разрешениях сетки максимальное количество осадков прогнозируется над внутренними горными районами, значит, доминирующим является процесс орографического усиления, особенно на сетке, где конвекция описывается сеточным процессом (рисунок 4.11д). В рассмотренном на рисунке случае такого усиления не наблюдается, что может быть связано с отсутствием и неточностью наблюдений в высокогорных районах. Для удобства анализа во всех полях рисунка 4.11 выделен квадрат, который соответствует области максимального количества осадков по данным наблюдений и TRMM. Видно, что только при шаге сетки 12 км в этой области появляются значимые осадки, а становятся они сравнимыми с фактическими значениями, хотя и занижаются, только при шаге 4 км. Очевидно, что моделирование с более высоким разрешением способно обеспечить более реалистичные поля осадков [161].

Аналогичные соображения можно высказать и в отношении других рассматриваемых экспериментов (таблица 12, третий этап) и случаев выпадения осадков, указанных в таблице 12.

После проведения расчётов на основе анализа оценок ошибок удалось определить эксперимент, дающий лучшие оценки прогноза осадков. На рисунке 4.12 представлены бокс-диаграммы количественных оценок прогноза осадков. Приведены ошибки прогноза количества осадков для десяти случаев по данным станций, характеристика которых приведена в таблице 17. В каждом квадрате рисунка 4.12 приведена оценка конкретной ошибки для трёх доменов и четырёх градаций суточного количества осадков.

Как видно из рисунка 4.12а и 4.12д, во всех доменах значения осадков в ГСО завышены в 3 – 5 раз, а в ГУМ в 0,5–1,5 раза. В ГСИО ошибки наименьшие, а для ГОСО занижены в 0,5 раза (рисунок 4.12а и 4.12д). Значения коэффициента корреляции (CORR, рисунок 4.12в) в основном по всем доменам положительные. Прогноз в домене DO3 демонстрирует лучшее качество.

Индекс BIAS (рисунок 4.12е) подтверждает во всех доменах завышение моделью ГСО (BIAS варьируется от 1,03 по 1,2) и занижение количества ГСИО

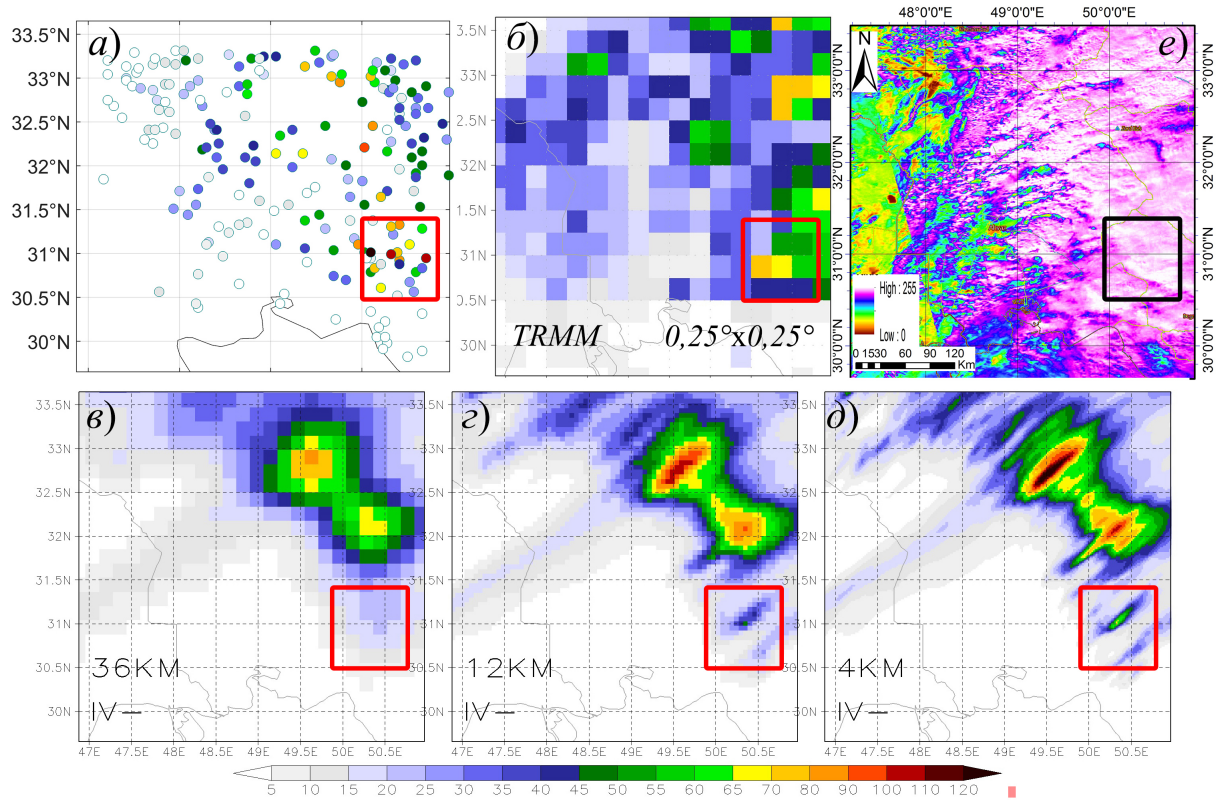


Рисунок 4.11 — Суточное количество осадков для случая «№6» по эксперименту «IV-» над юго-западом Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM; (е) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков и (в) DO1, шаг 36-км; (г) DO2, шаг 12-км и (д) DO3, шаг 4-км.

(0,63). ГУО же воспроизводятся моделью очень хорошо (0,93 – 1,3, со средним значением 1,05). Индексы FAR и POD для всех типов доменов в ГСО и ГУМ не показывают значительной разницы. Но, начиная с ГСИО, преимущество самой мелкой сетки (DO3) очевидны.

Суммируя вышесказанное, для ГОСО можно отметить выполнение неравенств:

$$0 < FAR_{DO3} < FAR_{DO2} < FAR_{DO1} < 1 \quad (4.2)$$

$$0 < POD_{DO1} < POD_{DO2} < POD_{DO3} < 1 \quad (4.3)$$

$$0 < BIAS_{DO1\&DO2} < BIAS_{DO3} < 1 \quad (4.4)$$

Из (4.2), (4.3) и (4.4) следует, что-либо «число пропусков цели» во внешних доменах было больше, чем во внутреннем ($C_{DO1\&DO2} > C_{DO3}$), либо число

успешных прогнозов во внешних доменах было меньше, чем во внутреннем ($A_{DO1\&DO2} < A_{DO3}$). В обоих вариантах можно отметить преимущество внутреннего домена DO3 над внешними доменами (DO1, DO2).

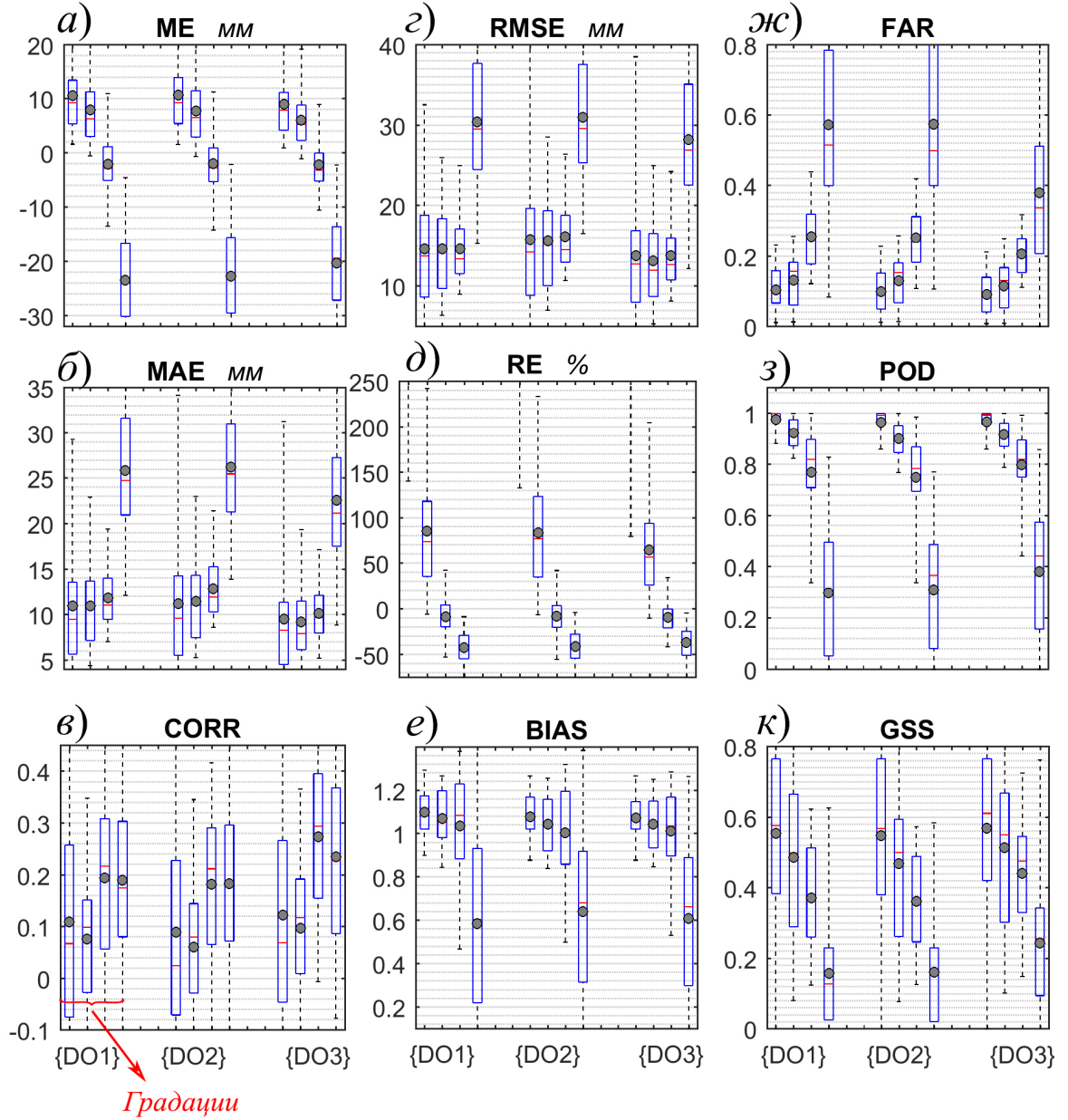


Рисунок 4.12 — Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE(г); RE(д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (к) для трёх типов доменов (DO1, DO2 и DO3) по десяти случаям (таблица 12, третий этап). Прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и третьим квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение.

Для всех градаций и всех доменов значение критерия GSS положительно, что подтверждает способность модели успешно прогнозировать осадки. По анализу коэффициента успешности GSS (рисунок 4.12к) лучшим по всем градациям также является домен DO3.

По результатам анализа всех оценок, представленных на рисунке 4.12, можно сделать вывод о том, что домен с самым меньшим шагом сетки (DO3) позволяет моделировать осадки с наименьшими ошибками. Наибольшая чувствительность к шагу сетки наблюдается при прогнозе осадков ГОСО.

На рисунке 4.13 в качестве примера приведены поля суммарного количества осадков за сутки на юго-западе Ирана для случая №1 (таблица 12, третий этап) во всех экспериментах (таблица 17) на сетках с самым хорошим разрешением (домены DO3) и фактические данные наблюдений, TRMM и снимок Aqua/MODIS.

На основании сравнения фактических и модельных результатов видно, что во всех внутренних доменах DO3 неплохо воспроизводится пространственная структура поля осадков. Сравнивая между собой поля, представленные на рисунок 4.13г и 4.13д, 4.13е и 4.13ж, 4.13з и 4.13е, а также на рисунках 4.13й и 4.13к, можно отметить, что точность прогноза зависит не только от шага самой мелкой сетки, но и от разрешения родительских доменов.

Ни в одном из представленных модельных полей нет полного соответствия данным наблюдений. Не наблюдается чёткой зависимости улучшения качества моделирования при уменьшении шага сетки. Можно сделать вывод о том, что во всех экспериментах количество осадков завышается. Наименьшее завышение максимальных значений количества осадков наблюдается в эксперименте эксперимент «VI+».

На всех полях рисунка 4.13 символом «*» отмечена точка с координатами 31° с.ш., 49° в.д., где прогнозировались осадки, либо не наблюдавшиеся, либо смещённые относительно наблюдавшихся, а количества осадков оказались завышенным. При этом отсутствие ПКО приводило к повышению модельного количества осадков, что особенно хорошо прослеживается в экспериментах «III-», «IV-» и «VI-» (рисунок 4.13г, 4.13е и 4.13к). Наиболее близкие к действительности результаты этой точке получены при моделировании с шагом 3 км без ПКО.

Как и ранее, проанализируем результаты в регионе, выделенным красным контуром, где наблюдаются сильные осадки. В этом регионе прогнозируются осадки только в экспериментах с шагом сетки 3 и 5 км.

Очевидно, что лучшие результаты получены на сетках с шагами 5, 6 и 3 км (эксперименты «V+», «VI+» и «III+»), худший – эксперимент «VI-», а моделирование на сетке с шагом 4 км показывает промежуточные по своему качеству результаты. Можно утверждать, что для используемых шагов сетки наличие ПКО во внутреннем домене позволяет приблизить результаты моделирования осадков и их фактическим значениям.

Обобщая анализ всех экспериментов можно сделать вывод о том, что лучшее качество моделирования ГСО (например, пункт, отмеченным символом «*») получено в экспериментах без ПКО. Использование ПКО приводит к завышению количества слабых осадков. Для ГСИО лучшие результаты достигнуты в эксперименте «VI+», использующем более грубую сетку и ПКО в домене DO3.

На рисунке 4.14 представлены статистические индексы для разных градаций количества осадков по доменам DO3. В результате анализа, можно отметить, что для ГСО меньшие ошибки получены в экспериментах «IV-» и «VI-», для ГУО к этим экспериментам добавляется ещё и эксперименты «IV-» и «III-». Для ГСИО и ГОСО лучшие результаты получены в эксперименте «VI+», а следующим с точки зрения минимума ошибок является эксперимент «III+».

В таблице 18 приведены результаты ранжирования экспериментов. Для всех оценок приведены суммы баллов по всем случаям, полученные по формуле (4.1) в разделе 4.1. Не рассматривались случаи ГСО, так как результаты не сильно различаются. В каждой клетке таблицы 18 на самой верхней строке указано название эксперимента, имеющего самую высокую оценку (лучшее качество), которая приведена в скобках. Эксперимент «VI+» позволяет получать хорошие результаты для большинства градаций и индексов. Нужно отметить, что в эксперименте «VI+» внутренний домен имеет больший шаг по горизонтали (6 км) и используется ПКО.

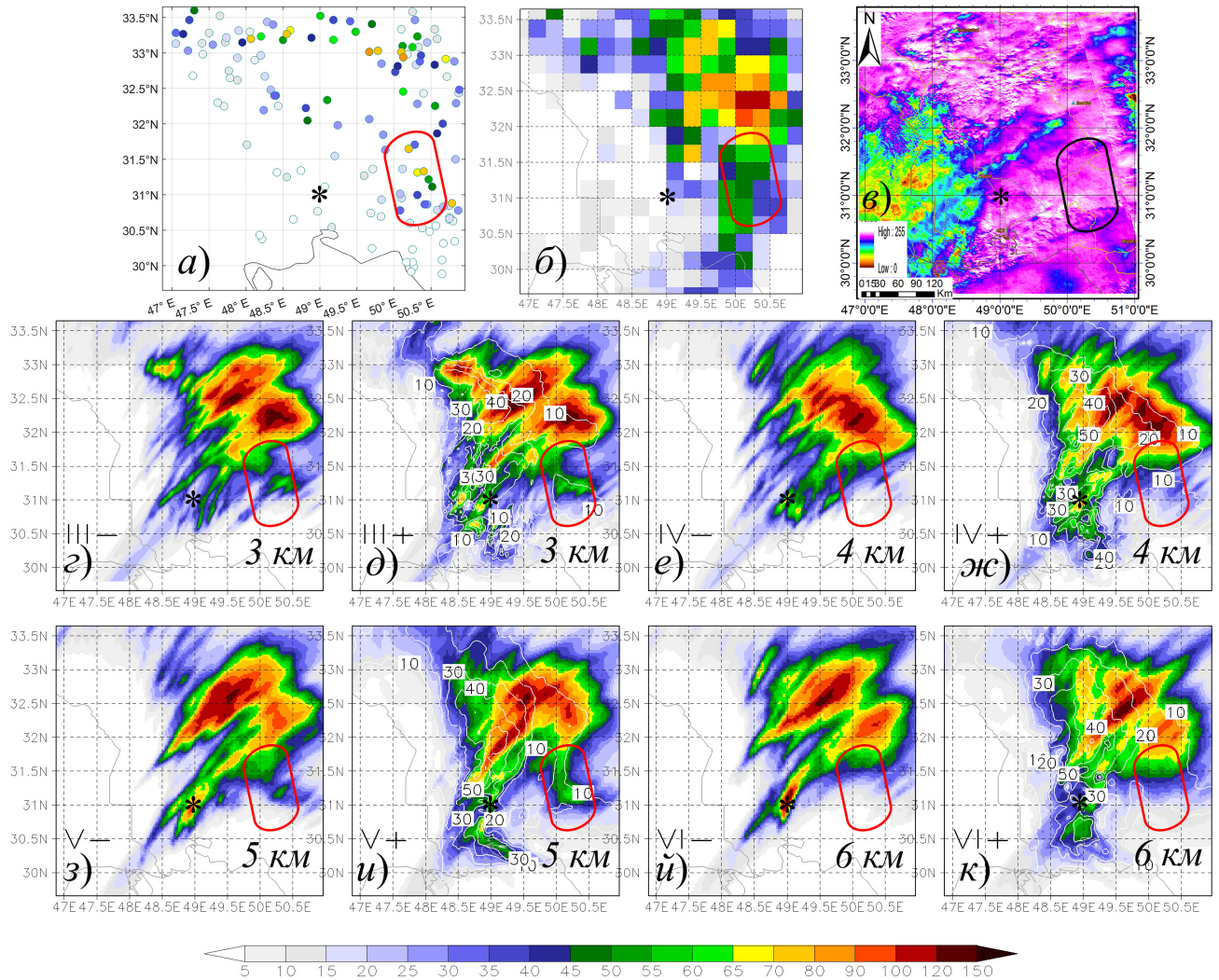


Рисунок 4.13 — Суммарное количество осадков за сутки для случая «№1» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS, модельные поля в домене DO3 в экспериментах: (г) «III-», (д) «III+», (е) «IV-», (ж) «IV+», (з) «V-», (и) «V+», (й) «VI-» и (к) «VI+»; — белым контуром (с интервалом 10 мм/сутки) обозначены изолинии количества конвективных осадков.

Таблица 18 — Ранжированный по Ψ_j список оценок совокупности экспериментов для доменов DO3

	Градация ME	MAE	RMSE	CORR	BIAS	FAR	POD	GSS
ГУО	VI-	IV-	IV-	V+	III-	VI-	VI+	VI-
	(62)	(61)	(57)	(55)	(63)	(72)	(64)	(56)
	IV-	VI-	VI-	VI+	III+	V-	V+	IV-
	(56)	(56)	(54)	(51)	(54)	(59)	(60)	(46)
	V-	VI+	VI+	IV+	IV-	IV-	III+	V-
	(56)	(49)	(53)	(50)	(54)	(56)	(58)	(46)
	III-	V-	V+	VI-	V-	III-	IV+	V+
	(49)	(48)	(53)	(46)	(48)	(46)	(52)	(46)
	V+	III-	III-	III-	IV+	V+	VI-	III+
	(44)	(46)	(43)	(43)	(39)	(37)	(36)	(44)
	VI+	V+	V-	III+	V+	III+	III-	VI+
	(42)	(45)	(42)	(43)	(36)	(34)	(32)	(44)
	III+	IV+	III+	IV-	VI-	IV+	IV-	III-
	(27)	(29)	(33)	(40)	(36)	(29)	(31)	(41)
	IV+	III+	IV+	V-	VI+	VI+	V-	IV+
	(24)	(26)	(25)	(32)	(30)	(27)	(27)	(37)
ГСЮ	VI-	V+	VI+	V+	VI-	VI-	VI+	VI-
	(62)	(69)	(66)	(61)	(58)	(68)	(67)	(64)
	IV-	VI+	V+	VI+	V-	V-	V+	VI+
	(56)	(66)	(63)	(56)	(58)	(59)	(63)	(55)
	V-	VI-	VI-	VI-	IV-	IV-	III+	V-
	(56)	(54)	(52)	(53)	(49)	(55)	(56)	(50)
	III-	IV-	IV-	V-	VI+	III-	IV+	V+
	(49)	(42)	(44)	(48)	(47)	(48)	(43)	(48)
	V+	V-	III+	IV-	V+	VI+	VI-	IV-
	(44)	(40)	(39)	(42)	(40)	(40)	(41)	(42)
	VI+	III+	V-	III-	III-	V+	V-	IV+
	(42)	(32)	(37)	(34)	(38)	(36)	(34)	(39)
	III+	IV+	IV+	III+	IV+	IV+	IV-	III+
	(27)	(32)	(30)	(33)	(38)	(30)	(31)	(38)

Продолжение Таблицы 18

ГОСО	IV+	III-	III-	IV+	III+	III+	III-	III-
	(24)	(25)	(29)	(33)	(32)	(24)	(25)	(24)
	III+	VI+	VI+	III+	III+	VI+	VI+	VI+
	(64)	(72)	(64)	(53)	(52)	(54)	(60)	(59)
	IV+	V+	III+	IV+	VI+	III-	III+	III+
	(61)	(59)	(63)	(50)	(51)	(52)	(59)	(51)
	VI+	III+	V+	VI+	IV+	IV-	VI-	V+
	(60)	(57)	(59)	(49)	(51)	(52)	(45)	(48)
	V+	IV+	IV+	V+	VI-	V+	V+	VI-
	(55)	(49)	(54)	(47)	(46)	(50)	(43)	(46)
	VI-	VI-	VI-	V-	V+	VI-	III-	IV-
	(39)	(45)	(38)	(44)	(43)	(49)	(40)	(45)
	V-	V-	V-	III-	V-	III+	IV+	III-
	(33)	(31)	(33)	(42)	(40)	(37)	(40)	(43)
	IV-	IV-	IV-	VI-	IV-	V-	IV-	V-
	(25)	(26)	(25)	(39)	(39)	(36)	(38)	(36)
	III-	III-	III-	IV-	III-	IV+	V-	IV+
	(23)	(21)	(24)	(36)	(38)	(30)	(35)	(32)

Замечание: в каждой клетке эксперименты отсортированы от лучшего к худшему качеству моделирования осадков. В скобках приведены суммы баллов ψ_j .

Как из таблицы 18, так и из рисунка 4.14 можно сделать следующие выводы:

- Для ГСО и ГУО не включение ПКО в ДОЗ при любом пространственном шаге улучшает качество прогноза.
- Для ГСИО и ГОСО при любом пространственном шаге имеют место меньшие ошибки моделирования, когда ПКО в ДОЗ включалась.

При этом в ГСО и ГУО лучшие оценки качества прогноза получены в эксперименте «IV-», а для ГСИО и ГОСО в экспериментах «VI+» и «III+». Это значит, что ПКО на мелкой сетке позволяет улучшить качество прогноза сильных осадков, но может приводить и к ложному прогнозу слабых осадков (ошибка «ложная тревога»).

Несколько неожиданный результат состоит в том, что сетки с чётным шагом (4 и 6 км) показывают лучшие результаты при моделировании. Конечно, для уточнения и объяснения этого факта нужно провести дополнительные и детальные исследования.

В анализируемых экспериментах домен с шагом 6 км (DO3) имеет материнский домен (DO1) с шагом 54 км. Это значит, что данные FNL (в Иране, примерно, 100x100 км) сначала интерполируются на более грубую сетку (54 км), а потом на сетку 18 и 6 км. А, например, для экспериментов «III+» (3 км), DO1 имеет шаг 27 км. Значит, первоначальная интерполяция производится с сетки с шагом 100 км на сетку с шагом 27 км, что может сказаться на ухудшении качества моделирования. Это тоже требует дальнейших исследований.

Сведения для дополнительного анализа приведены на рисунке 4.15. Там показаны индексы GSS и RMSE для доменов DO3 по всем случаям. Из анализа рисунка 4.15а, где представлены значения GSS для ГСО, видно, что для случаев №№ 1 – 6 GSS положительные, а для остальных равны нулю. Такие значения индекса объясняется тем, что осадки были обширные, и модель правильно прогнозировала факт наличия/отсутствия осадков, но этот индекс не характеризует прогноз количества осадков для этой градации и не может быть использован для сравнения экспериментов. Сравнить эксперименты можно проанализировав значения RMSE, которые в случаях нулевых GSS больше других (см рисунок 4.15д), а значит, модель завышает ГСО за счёт чего и получается $GSS = 0$.

Для ГУО (рисунок 4.15б) получены хорошие оценки экспериментов «IV-», «V+» и «VI+». В большинстве случаев эксперимент «IV-» при меньших RMSE характеризуется большими GSS (см. рисунки 4.15а, 4.15д, 4.15б и 4.15е). Это подтверждает вывод, что для прогноза осадков этой градации лучшие результаты можно получить, если не использовать ПКО в домене DO3.

Для ГСИО (рисунок 4.15в и 4.15з) эксперименты «VI+» и «IV-» показывают результаты по GSS лучшие, чем остальные. Однако в эксперименте «VI+» значение RMSE меньше, чем в эксперименте «IV-». Значит ГСИО лучше воспроизводятся моделью с включением ПКО.

Для ГОСО (см. рисунки 4.15г и 4.15ж), видно, что эксперимент «VI+» даёт хорошие оценки GSS. Однако, возникают случаи с отрицательными значениями GSS (случай №2). А для случая №5 значение GSS не удовлетворительны для всех экспериментах, в том числе и для эксперимента «VI+». Это связано с

тем, что очень сильные осадки наблюдались на малом количестве (15 %) станций (см. таблицу 12) и полученные для случая №5 оценки не информативны.

Таким образом, как и по предыдущим анализам, видно, что для более успешного прогноза ГСИО и ГОСО даже в домене с самым малым шагом ДОЗ следует включать ПКО. При этом оказалось, что в домене ДОЗ в экспериментах с шагом 6 км моделирование точнее, чем в экспериментах с меньшими шагами сетки.

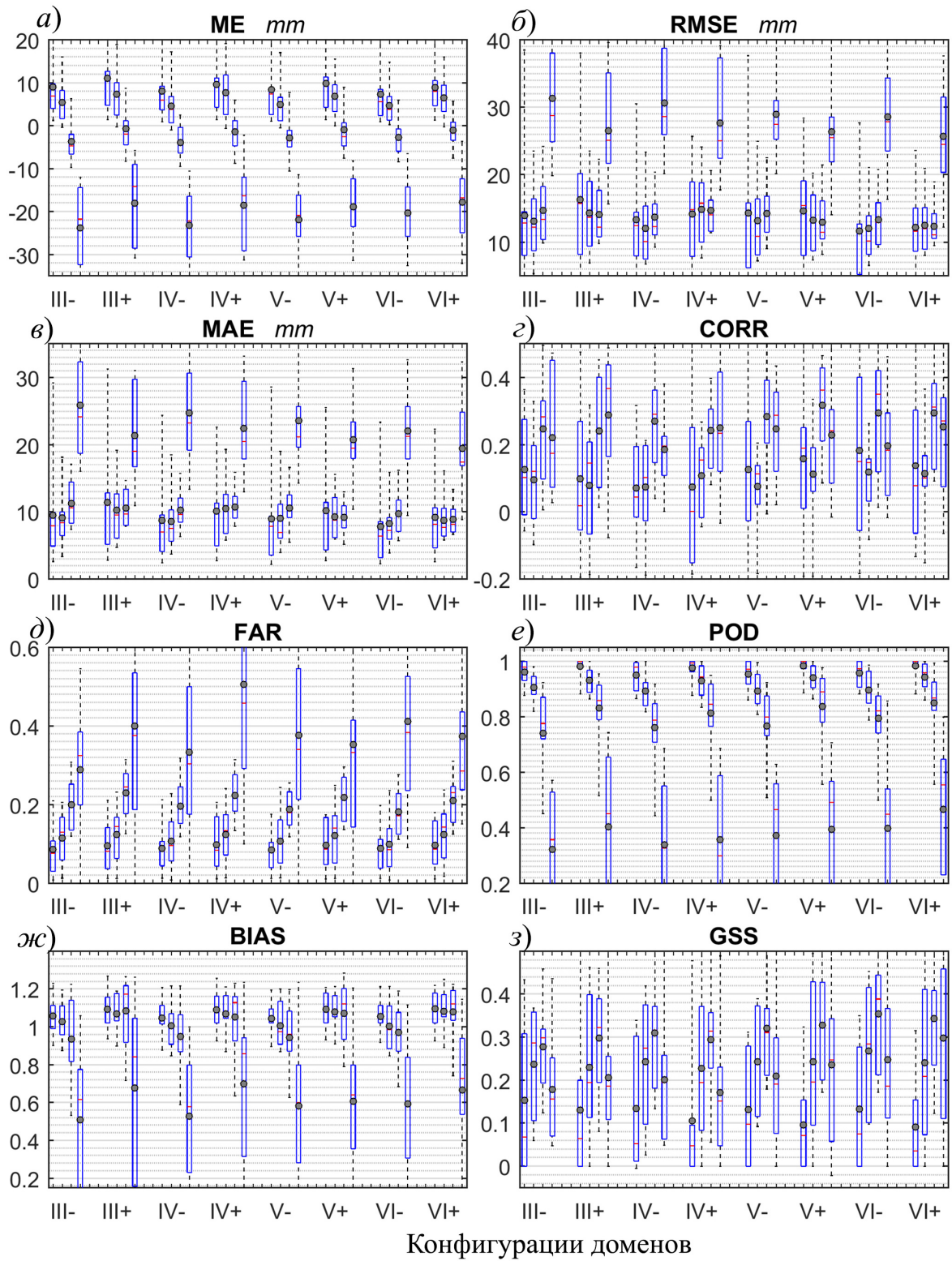


Рисунок 4.14 — Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); RMSE (б); MAE (в); CORR (г) и качественного анализа FAR (д); POD (е); BIAS (ж) и GSS (з) для шести типов доменов DO3 (III-, III+, IV-, IV+, V-, V+, VI-, VI+) и по десяти случаям.

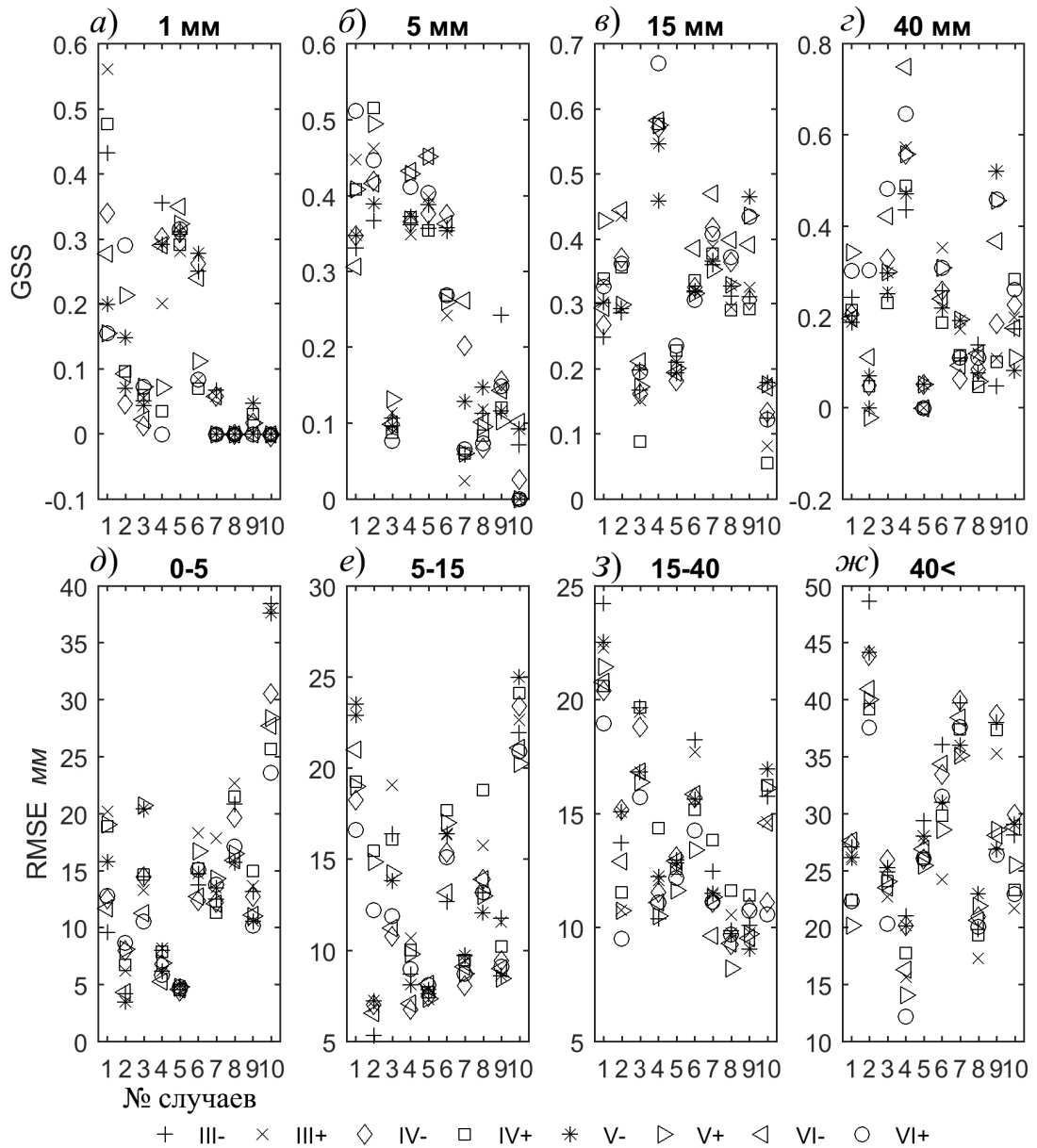


Рисунок 4.15 — Оценки GSS для: ГСО (а); ГУО (б); ГСИО (в) и ГОСО (г), и RMSE для ГСО (д); ГУО (е); ГСИО (з) и ГОСО (ж) для каждого случая из таблицы 12 для третьего этапа.

Заключение

В ходе выполнения исследований по диссертации были решены все поставленные задачи и достигнута цель. Резюмируя все вышесказанное в данной диссертации, можно привести основные результаты и выводы в заключении о том, что:

1. Изучен режим осадков в одной из важнейших экономических зон Исламской республики Иран – юго-запад Ирана. По данным метеорологических станций, имеющих наиболее длинные ряды наблюдений, получены характеристики средних и максимальных значений суточного количества осадков за месяц и год, а также эмпирические вероятности дней с дождём, средние значения количества осадков за день с дождём и их изменчивость. Результаты статистического анализа показывают, что средние значения суточного количества осадков зависят от высоты станции, тогда как максимальные значения от высоты станции не зависят.
2. Получены теоретические законы распределения вероятностей, хорошо приближающие эмпирическое распределение вероятностей. Подбор параметров теоретических распределений вероятностей проведён путём минимизации критерия расхождения функций распределения Пирсона-Романовского. Наиболее подходящими законами распределения вероятностей для описания ежедневных сумм осадков в районе исследования оказались закон распределения Вейбулла и логарифмически нормальный закон. Однако оба они дают значительные расхождения с эмпирическим распределением в области больших значений количества осадков. Полученные теоретические функции распределения позволят оценить с 95 % вероятностью осадки в пунктах, где наблюдения проводятся недостаточное время или совсем отсутствуют. Проанализировав полученные результаты, было принято решение использовать для определения порогового значения обильных осадков 90, 95 и 99-й перцентили количества осадков за сутки, полученные по эмпирическому распределению вероятностей.
3. Получены соотношения между максимальными и средними ежедневными количествами осадков и построены карты пороговых значений

обильных осадков за сутки по рассматриваемой территории. Полученные результаты необходимы как для совершенствования моделей прогноза осадков, так и для выявления климатических изменений режима обильных осадков в рассматриваемом регионе. Использование этих карт может быть полезно также для проектирования мероприятий по защите населённых пунктов Хузестана (территории юго-запада Ирана) от возможных паводковых наводнений.

4. Показано, что для сравнения степени экстремальности осадков в различных географических пунктах наиболее удобен индекс экстремальности осадков R_{T90} %, рассчитываемый по формуле (1.9). Показано, что сравнение индексов R_{T90} % позволяет ранжировать станции наблюдений по вкладу экстремальных осадков в общее количество осадков, что важно для оценки необходимости защитных мероприятий.
5. Анализ воспроизведения поля сильных осадков в численных экспериментах показал, что для рассматриваемой территории со сложным рельефом модель WRF-ARW более чувствительна к схемам параметризации конвекции, чем к схемам параметризации микрофизики облаков.
6. Статистический анализ полученных результатов показал, что для прогноза сильных осадков (свыше 15 мм/сутки) на территории юго-западного Ирана оптимально использовать следующие схемы параметризации:
 - Параметризация микрофизики облаков – Thompson,
 - Параметризация конвекции – KF,
 - Параметризация планетарного пограничного слоя – MYJ,
 - Параметризация приземного слоя – Eta,
 - Параметризация длинноволновых радиаций – RRTM,
 - Параметризация коротковолновых радиаций – Dudhia,
 - Параметризация подстилающей поверхности и почвы – Noah.

Однако даже в таком варианте модели модельные значения количества сильных осадков оказываются ниже фактических, полученных по данным наблюдений на метеорологических станциях.

7. Выяснилось, что преимущество более высокого пространственного разрешения (1 – 2 км) не очевидно. Потенциал для улучшения прогностических качеств модели за счёт более высокого пространственного разрешения может быть потерян за счёт ошибок, например, ошибок

- инициализации. Этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании.
8. Оценка влияния структуры доменов показывают, что при прогнозах в градах сильных и очень сильных осадков (более 15 мм/сутки), которые чрезвычайно важны для прогнозов опасных явления, наилучшие результаты получены при использовании трёхступенчатой телескопизация. Для такого сложного района, как юго-запад Ирана оптимальным расположением представляется следующее. «Родительский домен» должен охватывать большую часть Ближнего Востока с пространственным разрешением около половины значения пространственного разрешения исходных данных NCEP/NCAR (разрешение 1 градус) – 54 км. Для промежуточного, первого вложенного домена нужно выбрать территорию от западного Ирака до центрального Ирана, а для второго вложенного домена – самого мелкого – выбрать область, охватывающую юго-запад Ирана, включая центральную часть гор Загрос. При моделировании целесообразно использовать граничные условия двухстороннего взаимодействия и отношение шагов родительского и вложенных доменов – 3.
 9. Результаты оценок разных структур доменов доказывают, что отсутствие домена с высоким разрешением (1 – 2 км) в случае двухстороннего взаимодействия вложенных сеток оказывает положительное влияние на изучаемый домен. Это связано с тем, что высокое разрешение самого мелкого домена вносит в решение лишние шумы и ухудшает прогноз в промежуточном домене (шаг сетки 5 км). Генерация шума может быть связана также и с отсутствием параметризации конвекции в самом мелком домене, хотя конвективные явления мелкого масштаба могут требовать параметризации даже в случае, когда конвекция является сеточными процессами.
 10. Показано, что качество моделирования осадков значительно и нелинейно зависит от разрешения модели. Важен не только выбор шага сетки наименьшего домена, принятого для получения окончательного результата моделирование, но и то, какое разрешение было у материнских сеток.
 11. Слабые и умеренные осадки (меньше 15 мм/сутки) оказались лучше воспроизведены, когда параметризация конвекции не была включена.

Включение этой параметризации особенно сильно повлияло на улучшение качества прогнозов осадков в градации очень сильных осадков. Важно отметить, что во всех доменах, включая внутренний, оказалось полезным использовать параметризацию конвекции при прогнозе сильных осадков, хотя конвекция на мелких сетках может считаться сеточным явлением. Можно рекомендовать проводить исследования влияния параметризации конвекции и для внутреннего домена при каждой настройке модели.

В заключение автор выражает благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю, профессор, д.г.н. Русину И. Н. за постановку задачи, внимание к работе, терпение, поддержку, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит за оказанную помощь и обсуждение результатов доцента метеорологического факультета РГГМУ, к.ф.-м.н. Анискиной О. Г., к.ф.-м.н. Мостаманди Мохаммада С. В. за технические консультации, ресурсный центр «Вычислительный центр СПбГУ» (<http://cc.spbu.ru>), за предоставленную возможность провести необходимый объём расчётов.

Список сокращений и условных обозначений

В.Д.	Восточная Долгота
ВСВ	Всемирное координированное время
ГОСО	Градация Очень Сильных Осадков
ГСИО	Градация Сильных Осадков
ГСО	Градация Сильных Осадков
ГУМ	Градация Умеренных Осадков
КМ	Крупномасштабная модель
ПДР	Параметризация длинноволновых радиаций
ПКО	Параметризация конвекции
ПКР	Параметризация коротковолновых радиаций
ПМО	Параметризация микрофизики облаков
ППЗ	Параметризация приземного слоя
ППП	Параметризация подстилающей поверхности и почвы
ППС	Параметризация планетарного пограничного слоя
РГМ	Региональная Климатическая Модель
С.Ш.	Северная Широта
ЧПП	Численный прогноз погоды
ARW	Advanced Research WRF
DO1	Родительский домен
DO2	Первый вложенный домен
DO3	Второй вложенный домен
MM5	Fifth-Generation Pennsylvania State University—NCAR Mesoscale Model
MODIS	Moderate-resolution imaging spectroradiometer
NCAR	Национальный центр атмосферных исследований
NCEP	Национальный центр прогнозирования окружающей среды
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NOAA	Национальное управление океанических и атмосферных исследований
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	Weather Research Forecasting model

Список литературы

- [1] M. Houghghi, “Khuzestan and its potential for development of agriculture”, persian, *Water resources and development*, т. 4, № 1/2, с. 17—25, 1995.
- [2] Р. Зандидарагариби, *Пыльные бури в Хузестане и их изучение с помощью радаров в условиях современных климатических изменений : дис. ... канд. географических наук : 25.00.30*. Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет., 2015.
- [3] Ю. П. Переведенцев, К. М. Шанталинский, З. Рахман и Т. Р. Аухадеев, “Долгопериодные изменения приземной температуры, влажности воздуха и скорости ветра на территории стран Персидского залива”, *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*, т. 157, № 1, 2015.
- [4] K. E. Trenberth, “Changes in precipitation with climate change”, *Climate Research*, т. 47, № 2, с. 123—138, 2011.
- [5] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor и H. Miller, *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*, 2007.
- [6] T. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex и P. Midgley, *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535 pp*, 2013.
- [7] P. Huang, S.-P. Xie, K. Hu, G. Huang и R. Huang, “Patterns of the seasonal response of tropical rainfall to global warming”, *Nature Geoscience*, т. 6, № 5, с. 357, 2013.
- [8] T. Jiang, Z. W. Kundzewicz и B. Su, “Changes in monthly precipitation and flood hazard in the Yangtze River Basin, China”, *International Journal of Climatology*, т. 28, № 11, с. 1471—1481, 2008.

- [9] A. Zarasvandi, E. Carranza, F. Moore и F. Rastmanesh, “Spatio-temporal occurrences and mineralogical-geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran)”, *Journal of geochemical exploration*, т. 111, № 3, с. 138—151, 2011.
- [10] О. Дроздов, В. Васильев, Н. Кобыщева, А. Раевский, Л. Смекалова и Е. Школьный, *Климатология*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1989.
- [11] Y. Dinpashoh, A. Fakheri-Fard, M. Moghaddam, S. Jahanbakhsh и M. Mirnia, “Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran’s precipitation climate using multivariate methods”, *Journal of Hydrology*, т. 297, № 1-4, с. 109—123, 2004.
- [12] H. Jahanbakhsh и S. Zolfaghari, “Study of daily rainfall patterns in west Iran”, *Geographical research Journal*, т. 63, с. 233—258, 2002.
- [13] B. Alijani и M. Kaviani, “Principles of Climatology”, *SAMT Organization, Tehran, Iran*, 2006.
- [14] B. Alijani, J. O’Brien и B. Yarnal, “Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran”, *Theoretical and Applied Climatology*, т. 94, № 1-2, с. 107—124, 2008.
- [15] M. Domroes, M. Kaviani и D. Schaefer, “An analysis of regional and intra-annual precipitation variability over Iran using multivariate statistical methods”, *Theoretical and Applied Climatology*, т. 61, № 3-4, с. 151—159, 1998.
- [16] G. Azizi, M. Arsalani, A. Brauning и E. Moghimi, “Precipitation variations in the central Zagros Mountains (Iran) since AD 1840 based on oak tree rings”, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, т. 386, с. 96—103, 2013.
- [17] Ю. Переведенцев, Р. Занди и Т. Р. Аухадеев, “Особенности климатических условий в юго-западной части Ирана (на примере провинции Хузестан)”, *ученые записки казанского университета*, т. 155, № 4, 2013.
- [18] P.-S. Katiraie-Boroujerdy, N. Nasrollahi, K.-l. Hsu и S. Sorooshian, “Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran”, *Journal of arid environments*, т. 97, с. 205—219, 2013.
- [19] E. Ghasemifar, S. Naserpour и L. Arezomandi, “Analysis of synoptic patterns related to extreme precipitation over west of Iran”, *Isach*, т. 4, № 2, с. 69—86, 2017.

- [20] S. Moazami, S. Golian, M. R. Kavianpour и Y. Hong, “Uncertainty analysis of bias from satellite rainfall estimates using copula method”, *Atmospheric research*, т. 137, с. 145—166, 2014.
- [21] T. Peterson, C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit и N. Plummer, *Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs*. World Meteorological Organization Geneva, 2001.
- [22] И. Н. Русин и М. А. Маддах, “Количественные характеристики максимальных осадков юго-западного Ирана”, *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.*, т. 2, с. 142—157, 2017.
- [23] IASI, “Institute for applied system analysis [Электронный ресурс]”, *Вестник Финансовой академии*, Режим доступа: <http://iasa.org.ua/lections/iso/6/6.7.htm> (дата обращения: 2.11.2016).
- [24] А. М. Геворгян, “Территориальное распределение обильных осадков в Армении”, *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, № 12, с. 60—73, 2010.
- [25] A. Klein Tank и G. Konnen, “Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99”, *Journal of climate*, т. 16, № 22, с. 3665—3680, 2003.
- [26] L. Alexander, X. Zhang, T. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh и др., “Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 111, № D5, 2006.
- [27] G. BoroumandJazi, R. Saidur, B. Rismanchi и S. Mekhilef, “A review on the relation between the energy and exergy efficiency analysis and the technical characteristic of the renewable energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, т. 16, № 5, с. 3131—3135, 2012.
- [28] A. Singleton и R. Toumi, “Super-Clausius–Clapeyron scaling of rainfall in a model squall line”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, т. 139, № 671, с. 334—339, 2013.
- [29] К. Рубинштейн и А. Шмакин, “Динамико-статистический метод детализации метеорологических параметров”, *Вычислительные технологии*, т. 10, № S3, 2005.

- [30] C. Frei, R. Scholl, S. Fukutome, J. Schmidli и P. L. Vidale, “Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 111, № D6, 2006.
- [31] S. Westra, H. Fowler, J. Evans, L. Alexander, P. Berg, F. Johnson, E. Kendon, G. Lenderink и N. Roberts, “Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall”, *Reviews of Geophysics*, т. 52, № 3, с. 522—555, 2014.
- [32] G. A. Grell, J. Dudhia, D. R. Stauffer и др., “A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)”, 1994.
- [33] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang и J. G. Powers, “A description of the advanced research WRF version 2”, National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale и Microscale Meteorology Div, тех. отч., 2005.
- [34] S. Kirkwood, M. Mihalikova, T. Rao и K. Satheesan, “Turbulence associated with mountain waves over Northern Scandinavia—a case study using the ESRAD VHF radar and the WRF mesoscale model”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, т. 10, № 8, с. 3583—3599, 2010.
- [35] P. A. Jimenez, J. F. Gonzalez-Rouco, E. Garcia-Bustamante, J. Navarro, J. P. Montavez, J. V.-G. De Arellano, J. Dudhia и A. Muñoz-Roldan, “Surface wind regionalization over complex terrain: Evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, т. 49, № 2, с. 268—287, 2010.
- [36] M. I. Richardson, A. D. Toigo и C. E. Newman, “PlanetWRF: A general purpose, local to global numerical model for planetary atmospheric and climate dynamics”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, т. 112, № E9, 2007.
- [37] X.-Y. Huang, Q. Xiao, D. M. Barker, X. Zhang, J. Michalakes, W. Huang, T. Henderson, J. Bray, Y. Chen, Z. Ma и др., “Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results”, *Monthly Weather Review*, т. 137, № 1, с. 299—314, 2009.

- [38] J. D. Fast, W. I. Gustafson, R. C. Easter, R. A. Zaveri, J. C. Barnard, E. G. Chapman, G. A. Grell и S. E. Peckham, “Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 111, № D21, 2006.
- [39] D. Gochis, W. Yu и D. Yates, *The WRF-Hydro Model Technical Description and User’s Guide, Version 3.0, NCAR Technical Document, 120 pp*, 2015.
- [40] J. L. Coen, M. Cameron, J. Michalakes, E. G. Patton, P. J. Riggan и K. M. Yedinak, “WRF-Fire: coupled weather–wildland fire modeling with the weather research and forecasting model”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, т. 52, № 1, с. 16—38, 2013.
- [41] V. Tallapragada, L. Bernardet, S. Gopalakrishnan, Y. Kwon, Q. Liu, T. Marchok, D. Sheinin, M. Tong, S. Trahan, R. Tuleya и др., “Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model: 2013 scientific documentation”, *Developmental Testbed Center: Boulder, CO, USA*, т. 99, 2013.
- [42] F. Chen, H. Kusaka, R. Bornstein, J. Ching, C. Grimmond, S. Grossman-Clarke, T. Loridan, K. W. Manning, A. Martilli, S. Miao и др., “The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems”, *International Journal of Climatology*, т. 31, № 2, с. 273—288, 2011.
- [43] P. A. Jimenez, J. P. Hacker, J. Dudhia, S. E. Haupt, J. A. Ruiz-Arias, C. A. Gueymard, G. Thompson, T. Eidhammer и A. Deng, “WRF-Solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, т. 97, № 7, с. 1249—1264, 2016.
- [44] J. Mirocha, J. Lundquist и B. Kosovic, “Implementation of a nonlinear subfilter turbulence stress model for large-eddy simulation in the Advanced Research WRF model”, *Monthly Weather Review*, т. 138, № 11, с. 4212—4228, 2010.
- [45] K. M. Hines и D. H. Bromwich, “Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting (WRF) model. Part I: Greenland ice sheet meteorology”, *Monthly Weather Review*, т. 136, № 6, с. 1971—1989, 2008.

- [46] J. B. Klemp, W. C. Skamarock и J. Dudhia, “Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations”, *Monthly Weather Review*, т. 135, № 8, с. 2897—2913, 2007.
- [47] Z. Janjic, T. Black, M. Pyle, H.-Y. Chuang, E. Rogers и G. DiMego, “The NCEP WRF core”, *In Preprints, 16th Conf. on Numerical Weather Prediction, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc.*, т. 12, 2004.
- [48] D. J. Stensrud, *Parameterization schemes*. Cambridge University Press, 2007.
- [49] N. Nasrollahi, A. AghaKouchak, J. Li, X. Gao, K. Hsu и S. Sorooshian, “Assessing the impacts of different WRF precipitation physics in hurricane simulations”, *Weather and Forecasting*, т. 27, № 4, с. 1003—1016, 2012.
- [50] Н. Вельтищев и В. Жупанов, “Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM”, в *кн. 80 лет Гидрометцентру России*, 2010, с. 95.
- [51] C. Prigent, “Precipitation retrieval from space: An overview”, *Comptes Rendus Geoscience*, т. 342, № 4-5, с. 380—389, 2010.
- [52] N. Brunzell, “A multiscale information theory approach to assess spatial-temporal variability of daily precipitation”, *Journal of Hydrology*, т. 385, № 1-4, с. 165—172, 2010.
- [53] S. Kandahari, A. Mushkhati и M. Mazraeh Ee Farahani, “Case Study of the MM5 Interim Scale Model Simulation of rainfall”, persian, *Conference for Numerical prediction simulation Air Center of Meteorology*, 2007.
- [54] J. G. Powers, J. B. Klemp, W. C. Skamarock, C. A. Davis, J. Dudhia, D. O. Gill, J. L. Coen, D. J. Gochis, R. Ahmadov, S. E. Peckham и др., “The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, т. 98, № 8, с. 1717—1737, 2017.
- [55] D.-L. Zhang и K. Gao, “Numerical simulation of an intense squall line during 10–11 June 1985 PRE-STORM. Part II: Rear inflow, surface pressure perturbations and stratiform precipitation”, *Monthly Weather Review*, т. 117, № 9, с. 2067—2094, 1989.

- [56] R. T. Bruintjes, T. L. Clark и W. D. Hall, “Interactions between topographic airflow and cloud/precipitation development during the passage of a winter storm in Arizona”, *Journal of the atmospheric sciences*, т. 51, № 1, с. 48—67, 1994.
- [57] B. A. Colle и C. F. Mass, “An observational and modeling study of the interaction of low-level southwesterly flow with the Olympic Mountains during COAST IOP 4”, *Monthly weather review*, т. 124, № 10, с. 2152—2175, 1996.
- [58] B. Gaudet и W. R. Cotton, “Statistical characteristics of a real-time precipitation forecasting model”, *Weather and forecasting*, т. 13, № 4, с. 966—982, 1998.
- [59] B. A. Colle, C. F. Mass и K. J. Westrick, “MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997–99 cool seasons”, *Weather and Forecasting*, т. 15, № 6, с. 730—744, 2000.
- [60] C. F. Mass, D. Ovens, K. Westrick и B. A. Colle, “Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, т. 83, № 3, с. 407—430, 2002.
- [61] W. A. Gallus Jr, J. Correia Jr и I. Jankov, “The 4 June 1999 derecho event: A particularly difficult challenge for numerical weather prediction”, *Weather and forecasting*, т. 20, № 5, с. 705—728, 2005.
- [62] C. A. Davis, K. W. Manning, R. E. Carbone, S. B. Trier и J. D. Tuttle, “Coherence of warm-season continental rainfall in numerical weather prediction models”, *Monthly weather review*, т. 131, № 11, с. 2667—2679, 2003.
- [63] R. Carbone, J. Tuttle, D. Ahijevych и S. Trier, “Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 59, № 13, с. 2033—2056, 2002.
- [64] J. W. Wilson и R. D. Roberts, “Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective”, *Monthly weather review*, т. 134, № 1, с. 23—47, 2006.

- [65] M. Xue и W. J. Martin, “A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 dryline case during IHOP. Part I: Numerical simulation and general evolution of the dryline and convection”, *Monthly weather review*, т. 134, № 1, с. 149—171, 2006.
- [66] M. L. Weisman, C. Davis, W. Wang, K. W. Manning и J. B. Klemp, “Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model”, *Weather and Forecasting*, т. 23, № 3, с. 407—437, 2008.
- [67] C. M. Shafer, A. E. Mercer, C. A. Doswell III, M. B. Richman и L. M. Leslie, “Evaluation of WRF forecasts of tornadic and nontornadic outbreaks when initialized with synoptic-scale input”, *Monthly Weather Review*, т. 137, № 4, с. 1250—1271, 2009.
- [68] S.-Y. Hong и J.-W. Lee, “Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea”, *Atmospheric Research*, т. 93, № 4, с. 818—831, 2009.
- [69] M. Challa и R. L. Pfeffer, “The effect of cumulus momentum mixing on the development of a symmetric model hurricane”, *Journal of the atmospheric sciences*, т. 41, № 8, с. 1312—1319, 1984.
- [70] V. M. Karyampudi, G. S. Lai и J. Manobianco, “Impact of initial conditions, rainfall assimilation, and cumulus parameterization on simulations of Hurricane Florence (1988)”, *Monthly weather review*, т. 126, № 12, с. 3077—3101, 1998.
- [71] C. A. Davis и L. F. Bosart, “Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part I: Control simulation”, *Monthly weather review*, т. 129, № 8, с. 1859—1881, 2001.
- [72] J. S. Kain, “The Kain–Fritsch convective parameterization: an update”, *Journal of applied meteorology*, т. 43, № 1, с. 170—181, 2004.
- [73] V. V. Guryanov, M. A. Maddah и Y. P. Perevedentsev, “Torrential rain forecast using the mesoscale model WRF-ARW”, *Biosci., Biotechnol. Res. Asia*, т. 11, с. 181—187, 2014.
- [74] F. Taghavi, A. Neyestani и S. Ghader, “Short-range precipitation forecasts evaluation of WRF model over IRAN”, persian, *The Journal of the Earth and Space Physics*, т. 39, № 2, 2013.

- [75] E. Tan, “Microphysics parameterization sensitivity of the WRF Model version 3.1.7 to extreme precipitation: evaluation of the 1997 New Years flood of California”, *Geoscientific Model Development Discussions*, т. 2016, с. 1—29, 2016.
- [76] А. Кондове, *Гидродинамическое моделирование и прогноз осадков на территории восточной Африки (на примере Танзании): дис. ... канд. географических наук : 25.00.30*. Санкт-Петербург, Российский государственный гидрометеорологический университет, 2017.
- [77] Э. К. Исаев, М. С. В. Мостаманди и О. Г. Анискина, “Оценка влияния параметризаций физических процессов в гидродинамической модели на качество прогноза атмосферных процессов в районе со сложной орографией”, *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, № 40, с. 30—41, 2015.
- [78] A. Neyestani, S. Ghader и A. Mohebalhojeh, “Application of data assimilation using WRF model to simulate precipitations caused by synoptic systems in the western regions of Iran”, persian, *Iranian Journal of Geophysics*, т. 11, № 1, с. 101—123, 2017.
- [79] M. Azadi, M. Soufiyani, G. Vakili и H. Ghaemi, “case study on the impact of synoptic and upper air data assimilation in WRF output for precipitation over Iran”, persian, *Iranian Journal of Geophysics*, т. 2, № 2, 2016.
- [80] M. Azadi, N. Kaffash и I. Abdollahzadeh, “Probabilistic precipitation forecasting using ensemble forecasting system over Iran”, persian, *8th Conference on Numerical Weather Prediction, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.*, 2009.
- [81] Y.-L. Lin, R. D. Farley и H. D. Orville, “Bulk parameterization of the snow field in a cloud model”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, т. 22, № 6, с. 1065—1092, 1983.
- [82] Z. I. Janic, *Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model*. US Department of Commerce, National Oceanic и Atmospheric Administration, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction, 2001.

- [83] F. Chen и J. Dudhia, “Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity”, *Monthly Weather Review*, т. 129, № 4, с. 569—585, 2001.
- [84] M.-D. Chou и M. J. Suarez, “A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies”, *NASA Tech. Memo*, т. 10460, с. 48, 1999.
- [85] E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono и S. A. Clough, “Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 102, № D14, с. 16 663—16 682, 1997.
- [86] A. Shabanian, M. Nasr-Esfahany и F. Arkian, “Factors Affecting the summer rainfall in a region with complex topography (Case Study: Golestan Province)”, *Journal of the Earth and Space Physics*, т. 41, № 3, с. 565—577, 2015.
- [87] B. Layeghi, S. Ghader, A. A. Ali Akbari Bidokhti и M. Azadi, “Sensitivity of WRF model simulations to physical parameterization over the Persian Gulf and Oman Sea during summer monsoon”, *Iranian Journal of Geophysics*, т. 11, с. 1—19, 2017.
- [88] S.-Y. Hong и H.-L. Pan, “Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model”, *Monthly weather review*, т. 124, № 10, с. 2322—2339, 1996.
- [89] P. A. Jimenez, J. Dudhia, J. F. Gonzalez-Rouco, J. Navarro, J. P. Montavez и E. Garcia-Bustamante, “A revised scheme for the WRF surface layer formulation”, *Monthly Weather Review*, т. 140, № 3, с. 898—918, 2012.
- [90] J. E. Pleim, “A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, т. 46, № 9, с. 1383—1395, 2007.
- [91] J. E. Pleim, “A simple, efficient solution of flux–profile relationships in the atmospheric surface layer”, *Journal of applied meteorology and climatology*, т. 45, № 2, с. 341—347, 2006.

- [92] S. Sasanian, M. Azadi, H. Asgarishirazee и E. Mirzaee, “Evaluating the Performance of a WRF Physics Ensemble with nine Schemes for Precipitation over Southwest of Iran in winter”, persian, *J. of meteorological origination Nivar*, т. 39,
- [93] G. A. Grell и D. Devenyi, “A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques”, *Geophysical Research Letters*, т. 29, № 14, 2002.
- [94] E. Kessler, “On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations”, в *On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations*, Springer, 1969, с. 1—84.
- [95] A. Monin и A. Obukhov, “Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere”, *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, т. 151, № 163, e187, 1954.
- [96] Z. Ghassabi, A.-H. Meshkatee, S. Hajam, N. Javaheri и др., “Time distribution of heavy rainfall events in south west of Iran”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, т. 145, с. 53—60, 2016.
- [97] T. Raziei, B. Saghafian, A. A. Paulo, L. S. Pereira и I. Bordi, “Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran”, *Water Resources Management*, т. 23, № 3, с. 439, 2009.
- [98] K. Madani, “Water management in Iran: what is causing the looming crisis?”, *Journal of environmental studies and sciences*, т. 4, № 4, с. 315—328, 2014.
- [99] R. Ardakanian, “Overview of water management in Iran”, в *Water conservation, reuse, and recycling, Proceeding of an Iranian American workshop*, The National Academies press Washington, DC, 2005, с. 153—172.
- [100] I. Ahvaz, “Iranian Meteorological Office Data Processing Center. Islamic Republic of Iran Meteorological Office [Электронный ресурс]”, Режим доступа: <http://irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>.
- [101] P. Alpert и H. Shafir, “Mesoscale distribution of orographic precipitation: Numerical study and comparison with precipitation derived from radar measurements”, *Journal of applied meteorology*, т. 28, № 10, с. 1105—1117, 1989.

- [102] P. Alpert и H. Shafir, “Role of detailed wind-topography interaction in orographic rainfall”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, т. 117, № 498, с. 421—426, 1991.
- [103] M. R. Sinclair, “A diagnostic model for estimating orographic precipitation”, *Journal of applied meteorology*, т. 33, № 10, с. 1163—1175, 1994.
- [104] G. R. Pandey, D. R. Cayan и K. P. Georgakakos, “Precipitation structure in the Sierra Nevada of California during winter”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 104, № D10, с. 12 019—12 030, 1999.
- [105] P. J. Neiman, F. M. Ralph, A. White, D. Kingsmill и P. Persson, “The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California’s coastal mountains: Observations during CALJET”, *Monthly Weather Review*, т. 130, № 6, с. 1468—1492, 2002.
- [106] И. Н. Русин, *Синоптическая интерпретация данных при расчете ливневых осадков в горах*. РГГМУ, 2003.
- [107] M. Moradi, A. Meshkati, M. Azadi и B. A. A. Aliakbari, “Numerical simulation of the impact of orography on active synoptic weather systems over IRAN”, 2008.
- [108] P. Ghafarian, M. Azadi, A. Meshkatee и M. Farahani, “Numerical simulation of the impact of Anatolian and Caucasus Mountains on the precipitation distribution over the Black Sea”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, т. 12, № 3, с. 607—613, 2012.
- [109] T. K. Flesch и G. W. Reuter, “WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography”, *Journal of Hydrometeorology*, т. 13, № 2, с. 695—708, 2012.
- [110] S. A. Rutledge и P. V. Hobbs, “The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 41, № 20, с. 2949—2972, 1984.
- [111] W.-K. Tao, J. Simpson и M. McCumber, “An ice-water saturation adjustment”, *Monthly Weather Review*, т. 117, № 1, с. 231—235, 1989.

- [112] J. Dudhia, S.-Y. Hong и K.-S. Lim, “A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations”, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, т. 86, с. 33—44, 2008.
- [113] S.-Y. Hong и J.-O. J. Lim, “The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)”, *J. Korean Meteor. Soc*, т. 42, № 2, с. 129—151, 2006.
- [114] G. Thompson, R. M. Rasmussen и K. Manning, “Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis”, *Monthly Weather Review*, т. 132, № 2, с. 519—542, 2004.
- [115] J. Reisner, R. M. RaSmuSSen и R. Bruintjes, “Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, т. 124, № 548, с. 1071—1107, 1998.
- [116] W. A. Cooper, “Ice initiation in natural clouds”, в *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge*, Springer, 1986, с. 29—32.
- [117] J. S. Kain и J. M. Fritsch, “A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 47, № 23, с. 2784—2802, 1990.
- [118] J. Fritsch и C. Chappell, “Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part II. Mesoscale model”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 37, № 8, с. 1734—1762, 1980.
- [119] J. S. Kain, M. E. Baldwin и S. J. Weiss, “Parameterized updraft mass flux as a predictor of convective intensity”, *Weather and forecasting*, т. 18, № 1, с. 106—116, 2003.
- [120] J. S. Kain и J. M. Fritsch, “Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme”, в *The representation of cumulus convection in numerical models*, Springer, 1993, с. 165—170.
- [121] G. A. Grell и S. R. Freitas, “A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling.”, *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, т. 13, № 9, 2013.
- [122] Z. I. Janjic, “The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes”, *Monthly Weather Review*, т. 122, № 5, с. 927—945, 1994.

- [123] A. Betts и M. Miller, “A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, т. 112, № 473, с. 693—709, 1986.
- [124] S. Vaidya и S. Singh, “Applying the Betts–Miller–Janjic scheme of convection in prediction of the Indian monsoon”, *Weather and Forecasting*, т. 15, № 3, с. 349—356, 2000.
- [125] Z. I. Janjic, “Comments on “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models””, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 57, № 21, с. 3686—3686, 2000.
- [126] S.-Y. Hong, Y. Noh и J. Dudhia, “A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes”, *Monthly weather review*, т. 134, № 9, с. 2318—2341, 2006.
- [127] S.-Y. Hong, “Stable boundary layer mixing in a vertical diffusion scheme”, *Extended abstract 18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, с. 70—71, 2007.
- [128] G. L. Mellor и T. Yamada, “Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems”, *Reviews of Geophysics*, т. 20, № 4, с. 851—875, 1982.
- [129] Z. I. Janjic, “The step-mountain coordinate: Physical package”, *Monthly Weather Review*, т. 118, № 7, с. 1429—1443, 1990.
- [130] Z. I. Janjic, J. Gerrity Jr и S. Nickovic, “An alternative approach to nonhydrostatic modeling”, *Monthly Weather Review*, т. 129, № 5, с. 1164—1178, 2001.
- [131] J. Dudhia, “Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, т. 46, № 20, с. 3077—3107, 1989.
- [132] C. R. D. Archive, “National Centers for Atmospheric Research’s [Electronic resource]”, Режим доступа: <http://www.rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>.
- [133] R. Courant, K. Friedrichs и H. Lewy, “Über die partiellen Differenzen gleichungen der mathematischen Physik”, нем., *Mathematische annalen*, т. 100, № 1, с. 32—74, 1928.

- [134] A. Gruber и V. Levizzani, “Assessment of Global Precipitation Products A project of the World Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Radiation Panel”, 2008.
- [135] M. Lockhoff, O. Zolina, C. Simmer и J. Schulz, “Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations”, *Journal of Climate*, т. 27, № 2, с. 607—623, 2014.
- [136] K. Wapler и P. James, “Thunderstorm occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions”, *Atmospheric Research*, т. 158, с. 231—244, 2015.
- [137] B. Thies и J. Bendix, “Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives”, *Meteorological Applications*, т. 18, № 3, с. 262—295, 2011.
- [138] T. M. Giannaros, V. Kotroni и K. Lagouvardos, “Predicting lightning activity in Greece with the Weather Research and Forecasting (WRF) model”, *Atmospheric Research*, т. 156, с. 1—13, 2015.
- [139] М. Маддах, И. Русин и А. Ахунд-Али, “Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана”, *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, т. 586, с. 191—204, 2017.
- [140] J. T. Schaefer, “The critical success index as an indicator of warning skill”, *Weather and Forecasting*, т. 5, № 4, с. 570—575, 1990.
- [141] X. Li и Z. Pu, “Sensitivity of numerical simulation of early rapid intensification of Hurricane Emily (2005) to cloud microphysical and planetary boundary layer parameterizations”, *Monthly Weather Review*, т. 136, № 12, с. 4819—4838, 2008.
- [142] G. M. McFarquhar, H. Zhang, G. Heymsfield, J. B. Halverson, R. Hood, J. Dudhia и F. Marks Jr, “Factors affecting the evolution of Hurricane Erin (2001) and the distributions of hydrometeors: Role of microphysical processes”, *Journal of the atmospheric sciences*, т. 63, № 1, с. 127—150, 2006.
- [143] X. Li и Z. Pu, “Sensitivity of numerical simulations of the early rapid intensification of Hurricane Emily to cumulus parameterization schemes in different model horizontal resolutions”, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, т. 87, № 3, с. 403—421, 2009.

- [144] Э. Исаев, О. Анискина и С. Мостаманди, “Исследование чувствительности гидродинамического моделирования в районе со сложным рельефом к параметрам планетарного пограничного слоя”, *Труды Главной геофизической обсерватории им. АИ Воейкова*, № 584, с. 123—141, 2017.
- [145] P. Goswami, H. Shivappa и S. Goud, “Comparative analysis of the role of domain size, horizontal resolution and initial conditions in the simulation of tropical heavy rainfall events”, *Meteorological Applications*, т. 19, № 2, с. 170—178, 2012.
- [146] M. Leduc и R. Laprise, “Regional climate model sensitivity to domain size”, *Climate Dynamics*, т. 32, № 6, с. 833—854, 2009.
- [147] F. Cassola, F. Ferrari и A. Mazzino, “Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches”, *Atmospheric Research*, т. 164, с. 210—225, 2015.
- [148] А. Кондове, “Сравнение схем физических параметризаций в модели WRF”, *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, № 44, с. 149—156, 2016.
- [149] M. Hernandez-Ceballos, J. Adame, J. Bolivar и B. De la Morena, “A mesoscale simulation of coastal circulation in the Guadalquivir valley (southwestern Iberian Peninsula) using the WRF-ARW model”, *Atmospheric Research*, т. 124, с. 1—20, 2013.
- [150] A. B. Pieri, J. von Hardenberg, A. Parodi и A. Provenzale, “Sensitivity of precipitation statistics to resolution, microphysics, and convective parameterization: A case study with the high-resolution WRF climate model over Europe”, *Journal of Hydrometeorology*, т. 16, № 4, с. 1857—1872, 2015.
- [151] G. De Silva, S. Herath, S. Weerakoon и U. Rathnayake, “Application of WRF with different cumulus parameterization schemes for precipitation forecasting in a tropical river basin”, в *Proceedings of the 13th Asian Congress of fluid Mechanics*, т. 514, 2010.
- [152] E. K. Gilliland и C. M. Rowe, “A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model”, в *Proceedings of the 87th AMS Annual Meeting & 21th Conference on Hydrology*, т. 2, 2007.

- [153] C. Pennelly, G. Reuter и Т. Flesch, “Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta”, *Atmospheric Research*, т. 135, с. 172—192, 2014.
- [154] N. M. Roberts и H. W. Lean, “Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events”, *Monthly Weather Review*, т. 136, № 1, с. 78—97, 2008.
- [155] I. Schluter и G. Schadler, “Sensitivity of heavy precipitation forecasts to small modifications of large-scale weather patterns for the Elbe River”, *Journal of Hydrometeorology*, т. 11, № 3, с. 770—780, 2010.
- [156] N. M. Roberts, S. J. Cole, R. M. Forbes, R. J. Moore и D. Boswell, “Use of high-resolution NWP rainfall and river flow forecasts for advance warning of the Carlisle flood, north-west England”, *Meteorological Applications*, т. 16, № 1, с. 23—34, 2009.
- [157] Y. Sun, L. Yi, Z. Zhong, Y. Hu и Y. Ha, “Dependence of model convergence on horizontal resolution and convective parameterization in simulations of a tropical cyclone at gray-zone resolutions”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, т. 118, № 14, с. 7715—7732, 2013.
- [158] X. Yu и T.-Y. LEE, “Role of convective parameterization in simulations of a convection band at grey-zone resolutions”, *Tellus A*, т. 62, № 5, с. 617—632, 2010.
- [159] G. Efstathiou, N. Zoumakis, D. Melas, C. Lolis и P. Kassomenos, “Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes. Effect on large-scale processes”, *Atmospheric research*, т. 132, с. 125—143, 2013.
- [160] A. Gsella, A. de Meij, A. Kerschbaumer, E. Reimer, P. Thunis и C. Cuvelier, “Evaluation of MM5, WRF and TRAMPER meteorology over the complex terrain of the Po Valley, Italy”, *Atmospheric Environment*, т. 89, с. 797—806, 2014.
- [161] P. Chatterjee, D. Pradhan и U. De, “Simulation of hailstorm event using mesoscale model MM5 with modified cloud microphysics scheme”, в *Annales geophysicae: atmospheres, hydrospheres and space sciences*, т. 26, 2008, с. 3545.

Список рисунков

1.1	Расположение Хузестана на карте мира и место расположения 13 метеостанции, данные которых использовались в данной главе	11
1.2	Средняя температура ($^{\circ}\text{C}$) воздуха. а—весна, б—лето, в—осень, г—зима, д—год	14
1.3	Атмосферное давление (гПа) на уровне моря. а—весна, б—лето, в—осень, г—зима, д—год	18
1.4	Роза ветров в провинции Хузестан с учётом скоростей ветра по восьми румбам	19
1.5	Годовой ход количества атмосферных осадков и температуры воздуха в Хузестане (На бокс-диаграмме прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и вторым квантилем; крестики – выброс)	25
1.6	Средняя значения сумм атмосферных осадков (мм). а—Весна, б—осень, в—зима, г—год	27
1.7	Числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм (левее) и высоты станции (правее) 1994—2010 гг.	28
1.8	Линия тренда числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм 1994—2010 гг.	28
1.9	Выборочные функции распределения количества осадков за сутки по данным наблюдений (гистограммы) и плотности распределения вероятностей Вейбулла (красные линии)	37
1.10	Распределение порогового значения обильных осадков (мм) на территории Хузестан по эмпирическому распределению на уровне 90 % (а) и 95 % (б).	38
1.11	Годовой ход индексов $R_{95} \%$ и $R_{90} \%$ на станциях Ахваз (А) и Изе (И)	39
1.12	Представление межгодовой изменчивости экстремальных осадков с помощью индексов $R_{90} \%$ (верхний) и $R_{T90} \%$ (нижний) в пунктах наблюдений Ахваз (А), Изе (И), Дизфуль (Д).	41

- 3.1 Схема выбора оценочного узла сетки. Обозначения: кружки – 9 окружающих узлов для станции, треугольник – станция, с известными осадками, жирный кружок – ближайший узел из четырёх узлов сетки, окружающих станцию. 64
- 4.1 (а) Рельеф местности и конфигурация доменов модели WRF: родительский домен (DO1), вложенные (DO2 и DO3); (б) DO3 с шагом сетки 0,017 градусов, в котором обозначены кружками станции, регистрирующие осадки 71
- 4.2 Суточное количество осадков (мм) для случая «№5» при комбинации «WRF5» над юго-западом Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков и (г) DO1 (15-км); (д) DO2 (5-км) и (е) DO3 (1,7-км) 72
- 4.3 Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE(г); RE(д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (з) для трёх доменов (DO1, DO2 и DO3). Прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и третьим квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение, выносными – область 10–90 %. 74
- 4.4 Суммарное количество осадков за сутки для случая «№3» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS, модельные поля в домене DO2 в комбинациях: (г) «WRF1», (д) «WRF2», (е) «WRF3», (ж) «WRF4», (з) «WRF5», (и) «WRF6», (й) «WRF7», (к) «WRF8» и (л) «WRF9» 75
- 4.5 Сравнение фактических осадков и осадков, рассчитанных для всех комбинаций по домену DO2: а) WRF1; б) WRF2; в) WRF3; г) WRF4; д) WRF5; е) WRF6; ж) WRF7; з) WRF8 и к) WRF9. 77
- 4.6 Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); RMSE (б); MAE (в); CORR (г) и качественного анализа FAR (д); POD (е); BIAS (ж) и GSS (з) для восьми комбинаций физических параметризаций (WRF1, WRF2, WRF3, WRF4, WRF5, WRF6, WRF7, WRF8 и WRF9) в домене DO2 и по шести случаям 78

- 4.7 Домены экспериментов: (а) эксперимент А, (б) эксперимент В, (в) эксперимент С и (г) эксперимент D; красным контурам выделен домен с 5-км шагом сети. Высота рельефа указана в метрах над уровнем моря 83
- 4.8 Суточное количество осадков для случая сильных осадков 28.11.2009 на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM, (в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков; и по домен с 5-км шагом сетки экспериментов: (г) эксперимент А; (д) эксперимент В; (е) эксперимент С и (ж) эксперимент D. 84
- 4.9 Сравнение фактических осадков и осадков, рассчитанных для всех экспериментов по домен с 5-км шагом сетки: а) – эксперимент А, б) эксперимент В, в) эксперимент С и г) эксперимент D. 85
- 4.10 Оценки ME (а); MAE (б); RMSE (в); CORR (г); FAR (д); BIAS (е); POD (ж); TS (з) и GSS (и), для случая сильных осадков в 28.11.2009 на юго-западе Ирана по разным градациям осадков для домена с шагом сетки 5 км в каждом эксперименте. 86
- 4.11 Суточное количество осадков для случая «№6» по эксперименту «IV-» над юго-западом Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM; (е) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков и (в) DO1, шаг 36-км; (г) DO2, шаг 12-км и (д) DO3, шаг 4-км. 92
- 4.12 Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE(г); RE(д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (к) для трёх типов доменов (DO1, DO2 и DO3) по десяти случаям (таблица 12, третий этап). Прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и третьим квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение. 93
- 4.13 Суммарное количество осадков за сутки для случая «№1» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в)снимок Aqua/MODIS, модельные поля в домене DO3 в экспериментах: (г) «III-», (д) «III+», (е) «IV-», (ж) «IV+», (з) «V-», (и) «V+», (й) «VI-» и (з) «VI+»; – белым контуром (с интервалом 10 мм/сутки) обозначены изолинии количества конвективных осадков. 96

- 4.14 Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); RMSE (б); MAE (в); CORR (г) и качественного анализа FAR (д); POD (е); BIAS (ж) и GSS (з) для шести типов доменов DO3 (III-, III+, IV-, IV+, V-, V+, VI-, VI+) и по десяти случаям. 101
- 4.15 Оценки GSS для: ГСО (а); ГУО (б); ГСИО (в) и ГОСО (г), и RMSE для ГСО (д); ГУО (е); ГСИО (з) и ГОСО (ж) для каждого случая из таблицы 12 для третьего этапа. 102

Список таблиц

1	Информация о пунктах наблюдения, данные которых использованы для исследования в настоящей главе.	13
2	Средняя месячная и годовая температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) для станций Хузестана за период 1994–2010 гг.	17
3	Атмосферное давление (гПа) на уровне моря (1994–2010 гг.)	20
4	Средняя скорость (м/с) ветра на территории Хузестана (1994–2010 гг.)	21
5	Средние многолетние (1994–2010 гг.) значения месячных, сезонных и годовых сумм атмосферных осадков (мм/год)	26
6	Экстремальные значения (1994–2010 гг.) месячных, сезонных и годовых атмосферных осадков (мм).	29
7	Суммарное число случаев (дней) с осадками больше 10 мм за период 1994–2010 гг.	30
8	Максимальные (числитель) и средние (знаменатель) месячные и годовые суммы осадков (мм).	33
9	Статистические характеристики дневных осадков для важнейших пунктов провинции Хузестан	34
10	Характеристики эмпирической (Θ) и теоретических функций распределения Вейбулла (B) и логарифмически (L) нормального закона ежедневных осадков в Хузестане с критериями согласования по критерию Пирсона-Романовского.	36
11	Эмпирические обеспеченности и критерии экстремальности для станций, расположенных в районах с разным микроклиматом провинции Хузестан	40
12	Перечень случаев, отобранных для оценки качества прогноза максимального количества осадков и связанных с ними наблюдений максимального количества осадков.	61
13	Матрица сопряжённости результатов прогнозирования и наблюдений	65
14	Набор параметризаций физических процессов в проведённых численных эксперимента	70

15	Ранжированный по ψ_j список оценок совокупности комбинаций для доменов DO2.	79
16	Характеристики доменов в экспериментах	82
17	Перечень экспериментов и их характеристики домена	90
18	Ранжированный по ψ_j список оценок совокупности экспериментов для доменов DO3	97

Приложение А

Система уравнений WRF

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$P_0 \left(\frac{R_d}{P_0} \frac{\Theta_m}{\alpha_d} \right)^y = P$$

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

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

В вышеуказанных уравнениях использованы следующие обозначения:

$V = V_{u,v,w}$ компоненты трёхмерного вектора скорости;

- F — слагаемые форсинга для u , v , w , и Θ ;
 P — давление;
 P_0 — давление на уровне моря;
 Φ — геопотенциал;
 Θ — потенциальная температура;
 g — ускорение свободного падения;
 R_d — универсальная газовая постоянная для сухого воздуха;
 Q — отношение смеси водяного пара, частиц облаков, дождя, льда, бал
 облачности и т.д.;
 t — время;
 η — аналог вертикальной скорости.

удельный объем сухого воздуха

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

виртуальная потенциальная температура

$$\Theta_m = (1 + \frac{R_{\Pi}}{R})q_v \approx \Theta(1 + 1,61q_v)$$

Приложение Б

Список станций на юго-западе Ирана

Список станций на юго-западе Ирана, указанных на рисунке 4.1, данные которых применялись при оценках моделирования осадков:

№	Станций	В.д.	С.ш.	№	Станций	В.д.	С.ш.
1	Ab_anar	47,7694	32,7557	2	Abadan	48,2199	30,3773
3	Abbasabad	49,9857	33,5124	4	Abdanan	47,4271	32,9899
5	Abdolkhane_payin	48,328	31,8728	6	Abganji	49,0667	31,116
7	Abkhizdari_zay	50,7244	32,6656	8	Abolfars	49,9136	31,1701
9	Abooghadir	47,6974	32,2512	10	Adl_dezak	50,9586	32,8277
11	Afoos	50,0938	33,0079	12	Afrine_damrood	47,8956	33,3142
13	Aghajari	49,8235	30,7016	14	Ahvaz	48,7424	31,3503
15	Ahvaz_agri	48,5442	31,2421	16	Alam_abad	48,2019	32,9719
17	Alamdardar	50,4902	30,4854	18	Alavijeh	50,1658	33,1701
19	Aligudarz	49,6974	33,4043	20	Amalehseyfe	48,2559	32,2151
21	Amirkabir	48,31	31,098	22	Anjireh	47,2109	33,0259
23	Arab_hassan	48,8685	31,8187	24	Ardal	50,6523	31,9989
25	Ardel	50,6523	32,0169	26	Armande_olia	50,7784	31,6385
27	Arvand_kenar	48,5983	29,9989	28	Asgaran	50,8145	32,8818
29	Ashen	50,6884	33,08	30	Aziz_chahar	50,4001	31,9629
31	Aziz_abad	49,4811	33,2962	32	Azna	49,4091	33,4403
33	Aznavaleh	50,1118	33,098	34	Babazeyd	47,7334	33,2061
35	Badamak	47,9496	33,1521	36	Badijan	50,328	33,08
37	Badreh	47,0487	33,2782	38	Bagh_malek	49,8775	31,5304
39	Baghyek	50,0037	33,5124	40	Bahram_abad	49,7514	32,9539
41	Deylam	50,1658	30,053	42	Bandar_e_mahshahr	49,1568	30,5394
43	Bardeh	50,5262	32,5575	44	Bardgar_varak	48,0757	33,2061
45	Bazmeh	50,2739	32,8457	46	Behbahan	50,2199	30,6115
47	Ben	50,7424	32,5214	48	Bibi_zoleykhatee	50,4181	30,9178
49	Bibihakimeh	50,6523	30,071	50	Bidou	50,6523	29,8728
51	Bidroobeh	48,2379	32,7557	52	Boluran	47,301	33,6025
53	Bon_ahmad	50,2739	29,9809	54	Bone_pir	50,6884	30,125
55	Borom_sabz	50,4181	30,8638	56	Bostan	48,0037	31,7106
57	Buyeen_gorji	50,2559	33,08	58	Chadegan_faridan	50,6163	32,7557
59	Chaghbel	47,4992	33,2782	60	Chalashtar	50,7784	32,3773
61	Cham_hendi	47,6253	32,3052	62	Cham_mehr	47,5532	33,116
63	Chaman_goli	50,0397	32,1971	64	Chamgerdab	47,8775	32,9358
65	Chamkhalfe_easa	49,6793	30,6115	66	Chamshalan	47,8775	32,6115
67	Charam	50,6703	30,8277	68	Charat	49,3911	31,062
69	Chehel_cheshmeh	50,4181	32,5935	70	Chehraz	50,7604	31,8728
71	Chenar_kol	48,5983	33,3142	72	Chenar_papa	48,5082	33,1881
73	Chenar_shoureh	48,7965	33,2241	74	Cheshmak	48,2019	33,2241
75	Cheshmeh_ali	48,5442	33,2602	76	Cheshmeh_shirin	47,1568	33,2602

Продолжение Таблицы Б

77	Cheshmeh_sorkheh	48,0577	33,2962	78	Chitab	50,2199	30,8638
79	Dahanoo_lodab	50,8866	30,9719	80	Damaneh_faridan	50,4902	33,0079
81	Daneshgah_chamran	48,6703	31,3322	82	Daneshg_molasany	48,8685	31,6025
83	Daran	50,364	32,9719	84	Darghak	50,346	31,2061
85	Darkhoyen	48,4361	30,7376	86	Darreh_badam_olia	49,6613	33,0079
87	Darreh_buri	49,2289	32,3953	88	Darrehshahr	47,4091	33,134
89	Daryacheh_namak	49,1028	30,4313	90	Dasht_abbas	47,8235	32,4313
91	Dashtak	50,4001	31,3322	92	Dashtechamran	47,5352	33,062
93	Debal_khazae	48,5802	31,134	94	Deh_nowrooz	48,4361	33,5484
95	Dehdasht	50,5802	30,7917	96	Dehdez	50,292	31,7106
97	Dehestane_avi	50,1839	30,1611	98	Dehloran	47,283	32,6836
99	Dehnou	49,8956	33,5845	100	Dehsoor_oliya	50,2379	32,8818
101	Dej_soleyman	50,6703	30,3052	102	Dezful(keshavarzi)	48,4001	32,3953
103	Dezful_(airport)	48,3821	32,3953	104	Dil	50,7604	30,6836
105	Dishmook	50,328	31,3142	106	Dogonbadan	50,8145	30,3412
107	Dolat_abad	50,4001	32,4313	108	Dooplan	50,5983	31,9088
109	Doosh_kharat	50,4541	33,1521	110	Dorud	49,0127	33,5124
111	Einkhosh	47,6613	32,4133	112	Elhaee	48,6703	31,6566
113	Emamhassan	50,2739	29,8187	114	Emamzadeh_abd	50,2019	31,4944
115	Emamzadeh_pah	50,6163	30,7737	116	Eslamabade_pishk	49,7875	33,0259
117	Fakhravari	50,6163	29,6926	118	Faramooshjan	50,4181	32,6656
119	Farsan	50,5622	32,2512	120	Fereidunshahr	50,1298	32,9358
121	Feshiyan	50,7604	30,6656	122	Filgah	50,5262	30,6836
123	Gargari_oliya	49,9136	30,5214	124	Garmdareh	50,7965	32,6836
125	Gelgir	49,4811	31,7647	126	Ghal_eh_lor	48,328	32,4854
127	Ghal_eh_mohebbi	49,9676	31,116	128	Ghal_eh_nar	48,9406	33,2421
129	Ghal_eh_tal	49,8775	31,6385	130	Ghal_eh_zarrass	49,355	32,143
131	Ghale_reeisi	50,4721	31,2241	132	Ghaleh_dokhtar	50,5802	31,8728
133	Ghalereesi	50,6523	31,2782	134	Ghalibaf	49,1028	33,5845
135	Ghizaniyeh	49,2469	31,2061	136	Ghoodejan	50,328	32,2872
137	Golpayegan	50,292	33,4584	138	Gorabe_koohdasht	47,2289	33,4584
139	Gorgore	48,9766	30,7737	140	Gotvand	48,8145	32,2151
141	Hafireh	48,9947	30,9358	142	Haft_tapeh	48,4001	32,089
143	Haftgol	49,5352	31,4403	144	Haftshahidan	49,0487	32,125
145	Haliveh	47,8595	32,7196	146	Hamidiyeh	48,328	31,134
147	Hamzeh_sharouyeh	47,9496	32,3593	148	Hendijan	49,7154	30,2512
149	Heshmat_abad	49,1929	33,4584	150	Heydari	50,5802	32,6656
151	Hezarani	47,4811	32,9178	152	Hezaveh	49,5352	33,1881
153	Hoseyniyeh	48,2559	32,6656	154	Hosseini	48,7965	30,7917
155	Howeyzeh	48,0938	31,4403	156	Imanabad	48,364	33,4043
157	Izeh	49,8595	31,8367	158	Javardeh	50,5262	31,116
159	Jayzan	49,8415	30,9358	160	Jonaghan	50,6523	32,1611
161	Kalbali	50,31	32,8277	162	Kamar_gap	49,0487	33,2421
163	Kamaran	50,0217	32,7376	164	Kashkak	49,6073	33,3863
165	Kat	50,0217	31,0079	166	Katoola(karoon)	50,5802	31,5304
167	Kesht_s_emam	48,7604	31,8007	168	Kesht_s_karoon	48,7244	32,089
169	Keshvar	48,6523	33,134	170	Khalfabad_jarrahi	49,4091	30,8998
171	Khanabad	49,6613	33,2421	172	Khansar	50,328	33,2241
173	Khasraj_mazban	48,4361	31,7286	174	Kheymand	50,7965	30,6295

Продолжение Таблицы Б

175	Kheyrabade_olya	50,3821	30,5214	176	Khomeh_oliya	49,7334	33,4764
177	Khonsar	50,328	33,2241	178	Khoramshahr	48,1839	30,4313
179	Khorramabad	48,292	33,4403	180	Kigaran	49,373	33,134
181	Kofani(tarjan)	47,319	33,4043	182	Konjed_jan	50,4361	33,4944
183	Kooshk	50,5983	30,8818	184	Koot_sheykh	49,373	31,3683
185	Kordeolya	50,7064	32,9178	186	Kuhdasht	47,6433	33,5304
187	Kuhrang	50,1298	32,4493	188	Lali	49,1028	32,3412
189	Landeh	50,3821	31,0079	190	Likak	50,1118	30,9539
191	Liltin	50,2379	29,9088	192	Lishtar	50,7244	30,5214
193	Liyus	48,7244	32,5575	194	Loler	49,6073	32,4674
195	Lordegan	50,8325	31,4944	196	Mahour_berenji	48,6523	32,3773
197	Malagha	50,0397	31,5484	198	Mamoolan	47,9676	33,3863
199	Mandan	50,7784	30,8818	200	Marg_sar_mahrou	48,9406	33,0439
201	Marghe_gol	50,2559	33,5845	202	Mashmi_sofla	50,6884	31,3683
203	Masir	49,8415	32,8457	204	Masjedsoleyman	49,2469	31,9809
205	Mazoo	48,5262	32,8277	206	Mianab	48,4902	31,9629
207	Midavood_sofla	49,8775	31,3863	208	Mirza_koochek	48,2019	30,7557
209	Mohammad_abad	48,6523	33,4403	210	Momenabad	49,5352	33,5845
211	Monj_bare_aftab	50,6343	31,5304	212	Morgh_malek	50,4902	32,4674
213	Moshrehat(ghatea)	48,9406	31,2061	214	Mousian	47,373	32,5394
215	Naghan	50,7424	31,9268	216	Nasereddine_doroud	49,1208	33,4944
217	Nazmakan	50,7604	30,6475	218	Omidiyeh_(aghajari)	49,6974	30,7376
219	Ommol_dabas	48,2019	31,7286	220	Oshtor_golgol	47,4451	33,4584
221	Pa_alam	48,0577	32,8097	222	Padok	50,5622	30,5575
223	Pahleh_zarinabad	46,8866	33,0079	224	Pas_golam_korki	48,1658	32,9719
225	Piazkar	50,0938	30,7737	226	Pir_mousa	49,7154	31,3683
227	Pol_zamankhan	50,8866	32,4854	228	Poldokhtar	47,7154	33,1521
229	Poletang(polezal)	48,1118	32,8998	230	Poole_zeylaei	50,8145	31,2782
231	Raghiveh	49,2109	31,5484	232	Rahmat_abad	50,5802	33,2061
233	Ramhormoz	49,6073	31,2782	234	Razveh_chadegan	50,5442	32,8277
235	Romeshkan	47,4992	33,2782	236	Rostam_abad	50,5442	32,089
237	Sadate_dalpari	47,7334	32,4133	238	Sadde_shaver	48,5983	31,8548
239	Sade_abbaspour	49,6613	32,071	240	Safiabad_dezful	48,4361	32,2512
241	Salehabad_zari	50,2739	32,3953	242	Salman	48,4721	30,9719
243	Saman	50,8685	32,4313	244	Samsami	50,292	32,1611
245	Sangbaran	50,1839	32,9719	246	Sarab_bagh	47,5712	32,8818
247	Sarab_chenar_oliya	47,8055	33,5484	248	Sarabedoreh	48,0397	33,5665
249	Saranjeh	48,5082	33,3142	250	Sarasiyabe_usefi	50,328	30,9899
251	Sarcheshmeh_zaruni	47,6433	33,4223	252	Sardab_sofla	50,0577	32,8097
253	Sardahi	49,0307	31,4764	254	Sardasht(charmahal)	50,8325	31,3683
255	Sardasht_dezful	48,8325	32,5034	256	Sardasht_zaedon	50,2559	30,2331
257	Sarfaryab	50,8685	30,7737	258	Sarkhoon	50,5622	31,7106
259	Sarmargh	48,2199	33,6025	260	Savarane_faridan	50,346	32,8818
261	Seidoon	50,1118	31,3683	262	Sepiddasht	48,8866	33,2061
263	Sepiddashte_lorestan	48,8866	33,2241	264	Sevak	50,0037	31,8187
265	Shadegan	48,6523	30,6475	266	Shahidali_dashti	47,0667	32,7557
267	Shahrake_almahdi	49,4992	33,4403	268	Shahrake_emam	49,8956	33,2962
269	Shahrakevaliasr	47,9496	33,2962	270	Shahrekord	50,8505	32,2872
271	Sharakabazar	49,6974	33,2602	272	Sheykh_shaban	50,5983	32,5755

Продолжение Таблицы Б

273	Shivand	50,2019	31,6385	274	Shiyan	48,8866	33,08
275	Shool	50,5082	29,8187	276	Shulabad	49,1929	33,1881
277	Shush	48,2379	32,1971	278	Shushtar	48,8325	32,053
279	Singerd	50,4361	32,7737	280	Siyah_makan	50,2559	30,053
281	Siyahgav	47,6974	32,8457	282	Soltanabad	49,6974	31,0259
283	Soodjan	50,4001	32,5214	284	Soosan	49,8415	31,9989
285	Soosangerd	48,1839	31,5484	286	Sorkheh_ilm	48,1478	32,3232
287	Sorshjan	50,6884	32,3052	288	Suogh	50,4541	30,8638
289	Taherieh	48,4181	31,3142	290	Taj_maleki	50,5622	29,7827
291	Takht_abad	47,8595	33,1881	292	Takhtan	47,0487	33,134
293	Taleghan_abestan	48,5983	33,4764	294	Talehzang	48,7604	32,8097
295	Tamtam_ab	47,2109	32,7557	296	Tang_maghar	50,0757	31,0259
297	Tange_pirzal	50,7604	30,8457	298	Tangpanj	48,7604	32,9358
299	Tappeh_hammam	47,7875	32,6475	300	Tappehdare	48,5442	33,3503
301	Tashan	50,1298	30,8277	302	Tiken	50,5442	33,3322
303	Varak_papey	48,4721	33,2241	304	Varkamareh_mazhin	47,8415	32,9358
305	Veist_khonsa	50,0938	33,3322	306	Visiyan	48,0577	33,4764
307	Yancheshmeh	50,7244	32,6656	308	Yazd_now	47,9316	31,5124
309	Zaghehe_khorra	48,7064	33,4764	310	Zamzam_kafer	47,8775	33,5304
311	Zarangoush	47,2109	33,2061	312	Zemestaneh	49,9316	32,8097