

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный руководитель: Доктор географических наук, профессор
Русин Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: **Крыжов Владимир Николаевич**,
доктор географических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», г. Москва.

Козырева Людмила Владимировна,
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая сектором ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «___» _____ 2018 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: **195196, Россия, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: **192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79**, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.197.01.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.
Телефон для справок: +7 (812) 633-01-82, 372-50-92.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.197.01,
к.г.н., доцент



Кашлева Л. В.

Общая характеристика работы

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 прогноз опасных осадков 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, для многоуровневой телескопизации результатов, для 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 расчет 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 все 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 (ГУО) 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 суточного количества осадков на территории юго-западного Ирана.

2. Анализ воспроизведения поля сильных осадков в численных экспериментах для территории юго-западного Ирана со сложным рельефом с помощью модели WRF-ARW при различных схемах параметризаций.

3. Выбор шага сетки наименьшего домена, принятого для получения окончательного результата моделирование. Анализ влияния более высокого

пространственного разрешения (1—2 км) на результаты прогнозов осадков.

4. Оценка точности прогноза осадков различной градации при включении и отключении параметризации конвекции в домене высокого разрешения.

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 независимых исследований по данной тематике.

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.

Благодарности. 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 в обсуждении 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.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, описываются рассматриваемые проблемы, излагается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определяются положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена особенностям климатических условий юго-запада Ирана.

В разделе 1.1 даётся краткая физико-географическая характеристика юго-западного Ирана (Рисунок 1). Для каждого сезона года построены средние многолетние карты (осреднение проводилось за период 1994–2010 гг.).

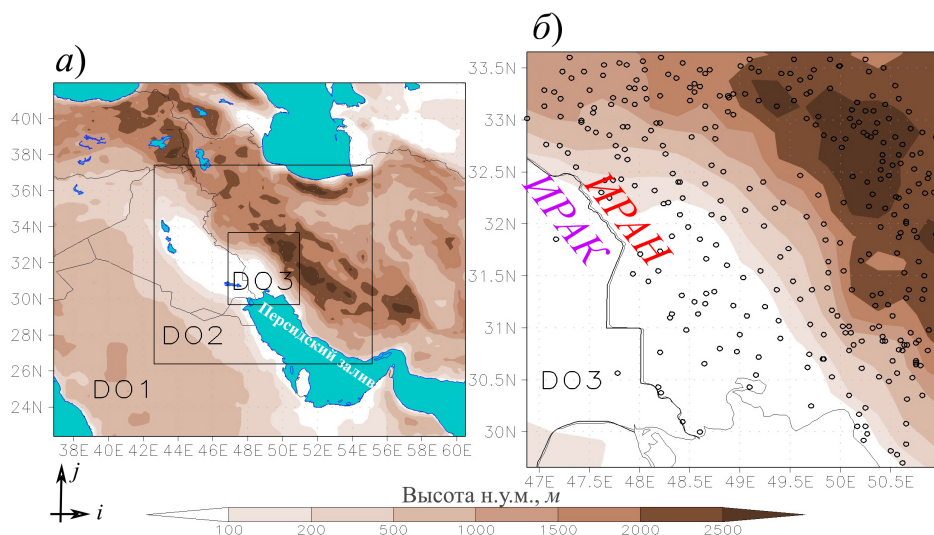


Рис. 1 — (а) Расположение Хузестана, Рельеф местности и конфигурация доменов модели WRF: родительский домен (DO1), вложенные (DO2 и DO3); (б) DO3 с шагом сетки 0,017 градусов, в котором обозначены кружками станции, регистрирующие осадки

Из проведённого анализа можно сделать вывод о том, что ввиду больших разностей высот (между Хузестанской равниной и горами Загроса) влияние рельефа на микроклиматический режим оказывается преобладающим.

В разделе 1.2 Изучен барико-циркуляционный режим юго-западного Ирана. Получены таблицы и карты температуры, давления и скорости ветра в различные месяцы и по сезонам. Отмечено, что на территории Хузестана среднемесячные скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли, характеризуются слабыми значениями в зимний период (0,6–3,6 м/с) и умеренными – в летний (до 5,3–5,7 м/с). Преобладают ветры западного направления (вероятность составляет около 36 %). При этом, повторяемость северо-западного направления ветра составляет около 32 %.

В разделе 1.3 приводится климатологический анализ осадков над территорией юго-запада Ирана. Получены таблицы, карты и графики распределения количества осадков по месяцам и сезонам. Распределение осадков в Иране характеризуется высокой пространственно-временной изменчивостью. Оценка степени континентальности климата Хузестана с помощью индекса континентальности С.П. Хромова показывает значение 88–89 %. Следовательно, по этому показателю климат Хузестана является резко континентальным.

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. Осадки связаны с конвективными кучево-дождевыми облаками, по времени не продолжительные, но интенсивные и имеют локальное, очаговое распространение. Ливневые осадки сопровождаются градом, шквалом и грозой.

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.

Получено, 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.

В провинции Хузестан наблюдается очень хорошее соответствие между количеством сильных осадков и высотой пункта над уровнем моря. Коэффициент корреляции равен 0,93.

На рисунке 2, 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.

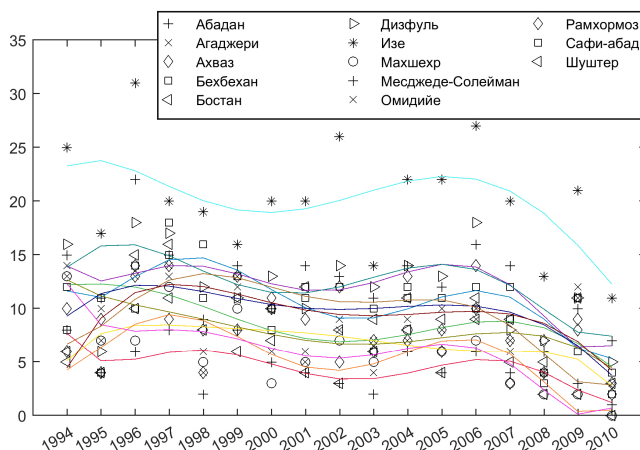


Рис. 2 — Линия тренда числа случаев (дней) с осадками больше 10 мм 1994—2010 гг.

В разделе 1.4 представляются количественные характеристики сильных осадков юго-западного Ирана. Наиболее опасными явлениями для этого региона являются сильные дожди (ливни), вызывающие катастрофические наводнения. Анализ синоптических условий, связанных с экстремальными осадками над Западом Ирана, позволил 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 %,
- Восходящее вертикальное движение — dp/dt меньше $-0,3$ Па/с
- Во всех случаях западная часть Ирана расположена перед ложбиной на уровнях 500 и 850 гПа.

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.

Автор данной диссертации получил эмпирические и теоретические функции распределения осадков в дни с дождём с количеством осадков более 0,1 мм

и оценил 90, 95 и 99-й перцентили суточных сумм осадков и построил карты пороговых значений сильных осадков по исследуемой территории.

В качестве исходной информации были использованы массивы ранее не обрабатывавшихся данных о суточных суммах осадков по восьми метеорологическим станциям Хузестана, имеющим наиболее длинные ряды наблюдения и равномерно расположенным по всей провинции.

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 3.

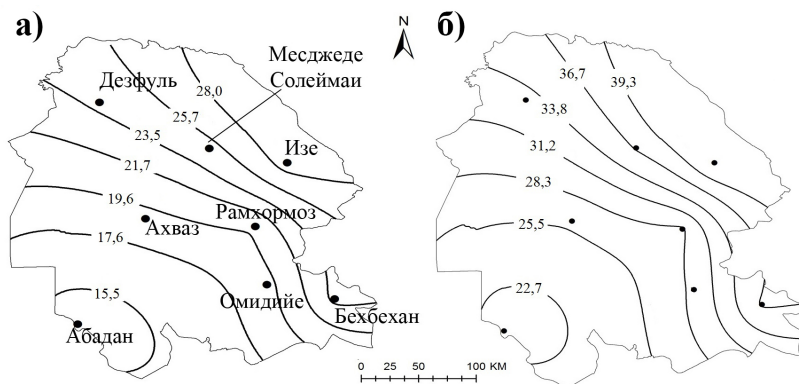


Рис. 3 — Распределение порогового значения обильных осадков (мм) на территории Хузестан по эмпирическому распределению на уровне 90 % (а) и 95 % (б).

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. 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:

$$Y_{10\%} = 2,59X, (R^2 = 0,97). Y_{5\%} = 3,76X, (R^2 = 0,96). Y_{1\%} = 6,92X, (R^2 = 0,92)$$

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.

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

Вторая глава посвящена описанию гидродинамического моделирования атмосферных процессов над территорией юго-запада Ирана.

В разделе 2.1 описаны различные подходы для уменьшения погрешностей прогноза осадков, применяемые в ведущих прогностических центрах. Описываются глобальные и региональные гидрометеорологические модели. Указывается, что для уточнения результатов грубого моделирования часто сегодня используются статистический или динамический даунскейлинг.

в разделе 2.2 даётся краткое описание мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы WRF. В данном исследовании используется модель WRF-ARW (версия 3.6.1), техническое описание которой широко известно.

в разделе 2.3 обобщается имеющийся опыт использования численных моделей в прогнозах и исследованиях осадков. 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.

В рассмотренных работах было изучено качество моделирования осадков моделью WRF на длительные сроки для всей территории Ирана. С помощью модели WRF, было изучено 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. Был сделан вывод о необходимости детализации описания осадков в юго-западном Иране.

Третья глава посвящена методике адаптации модели WRF-ARW для юго-запада Ирана.

В разделе 3.1 на основе сравнения характеристик и согласно литературным источникам выбраны следующие параметризации:

- Для моделирования мезомасштабной конвекции, 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. 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 осаднения, так и для аккреции.

в. Схема «Thompson», схема одномоментная, модифицирована из объёмной микрофизической схемы. 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.

- 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). Схема KF запускает глубокую конвекцию, когда перемешивающаяся частица имеет положительную вертикальную скорость на высоте, превышающей заданную толщину облака, обычно 3 – 4 км. 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.

б. Схема «Grell-Freitas» (GF), основана на параметризации, 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) является продолжением схемы BM, 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. Новые изменения, внесённые в схему BMJ, оказались полезными и при прогнозировании осадков на суше.

- 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.

б. Схема «Mellor-Yamada-Janjic Eta» (MYJ), одномерная прогностическая схема, основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентных пульсаций и учитывающая перемешивание по вертикали. Схема MYJ 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, 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», 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.

В разделе 3.2 описана общая настройка модели по всем экспериментам.

Для корректного описания процессов используется равноугольная коническая 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. NCER/NCAR рекомендует применять нечётное отношение, например, шаг родительского домена может быть в 3 (использовано в работе) 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 – NCER 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.

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

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.

В каждом этапе данного исследования были рассмотрены случаи выпадения сильных атмосферных осадков, указанные нумерациями в таблице 1, которые вызвали локальные наводнения на юго-западе Ирана и нанесли значительный ущерб экономике региона. Грозы обычно происходят зимой и весной

на юго-западе Ирана, 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). Дополнительно к анализу привлекались данные 250 осадкомерных станций, расположенные в ДОЗ (в Хузестан и его сопредельных провинциях см. рисунок 1), в том числе 18 климатологических.

Таблица 1 — Перечень случаев, отобранных для оценки качества прогноза максимального количества осадков и связанных с ними наблюдений максимального количества осадков.

№ случаев, отобранные для этапа:			Дата	Число надёжных наблюдений	Максимальное количество осадков (мм/сутки)	Число станций, на которых наблюдалось количество осадков выше 40 мм/сутки
1-ого	2-ого	3-его				
	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

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.

В разделе 3.3 описаны методы верификации. 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*.

Качественный анализ проведён путём получения для каждой станции матриц сопряжённости рассчитанных и фактических осадков. По ним были вычислены индексы, рекомендуемые ВМО:

BIAS – отношение между количеством прогнозируемых событий и количеством наблюдаемых событий. FAR – это доля прогнозируемых событий, которые были предсказаны, но не наблюдались (ложная тревога). POD – это доля станций, на которых правильно смоделированы осадки. TS – это доля всех прогнозируемых или наблюдаемых событий, которые были правильными. GSS – что включает коррекцию воздействия ложных осадков – Е. Значения 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.

В качестве пороговых значения для этих критериев выбраны:

1 мм/сутки – градация слабых осадков (ГСО) было/не было, 5 мм/сутки – градация умеренных осадков (ГУО) по значению 50-й перцентиль, 15 мм/сутки – градации сильных осадков (ГСИО) по значению 75-й перцентиль, 40 мм/сутки – градация очень сильных осадков (ГОСО) по значению 95-й перцентиль.

Количественный анализ выполнялся на основе расчёта общепринятых статистических критериев, а именно: относительная (RE) и средняя абсолютная (MAE), систематическая (ME) и средняя квадратичная (RMSE) ошибки прогнозов, коэффициенты корреляции Пирсона (CORR) между прогностическими и фактическими полями метеорологических величин.

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.

В **четвертой главе** приведено описание результатов 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.

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.

В разделе 4.1 изучается чувствительность модели WRF-ARW к выбору физических параметризаций на юго-западе Ирана по 6-и выбранным датам, указанным в таблице 1 для первого этапа – 54 численных экспериментов (6 случаев по 9 комбинаций параметризаций (таблица 2) в каждом). Для адаптации

модели к конкретной экономической важной территории необходимо оценить качество краткосрочного прогнозирования осадков с высоким горизонтальным разрешением.

В численных экспериментах была использована трёхступенчатая телескопизация (рисунок 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, 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.

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» (RAINС) для доменов DO1 и DO2, и «не конвективный дождь» (RAINNC) для восьми различных конфигураций схем параметризации для всех доменов.

Таблица 2 — Комбинации наборов 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

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, переходят в расчёт осадков. Считается, что моделирование с более высоким

разрешением (шаг менее 4 км), позволяет удалить схему конвекции и связанные с ней неопределённости.

На рисунке 4, 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 1) для комбинации «WRF5» (см. таблицу 2).

В домене DO3 с шагом сетки 1,7-км область максимального количества осадков перемещена на Персидский залив, вследствие чего в прибрежных территориях занижаются осадки. В этом домене оказалось возможным получить наиболее правильное поле осадков в сравнении с другими доменами. Было обнаружено, что более высокие разрешения, по-видимому, лучше описывают структурные особенности конвективных явлений. Однако это не приводило к улучшению прогнозов их времени и местоположения.

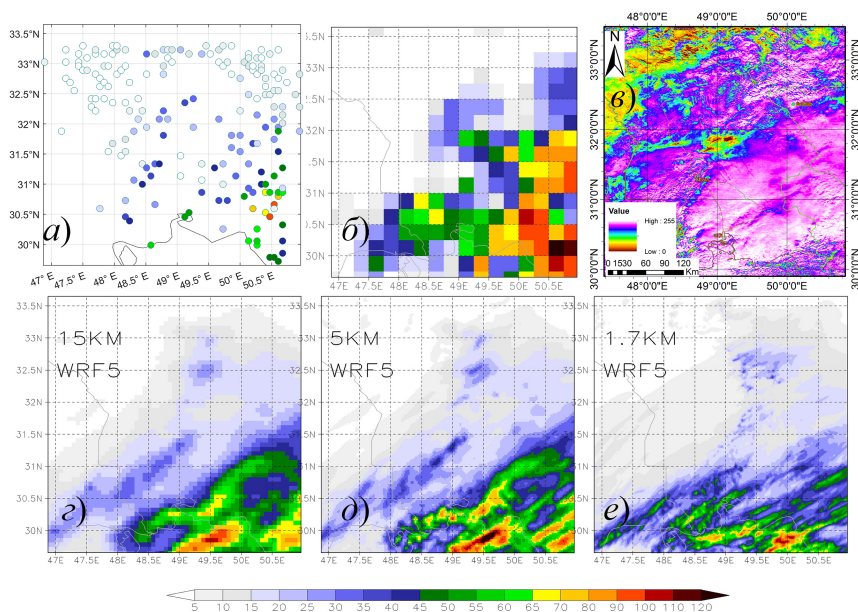


Рис. 4 — Суточное количество осадков (мм) для случая «№5» при комбинации «WRF5» над юго-западом Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию); (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS с характеристикой отражаемости облаков и (г) DO1 (15-км); (д) DO2 (5-км) и (е) DO3 (1,7-км)

Как видно из рисунка 5 (а, д, е), во всех доменах значения осадков в градациях ГСО и ГУО завышены от полутора до трёх раз, и соответственно 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 5в). 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 ГСО (рисунок 5б, 5д). Индекс BIAS (рисунок 5е) подтверждает во

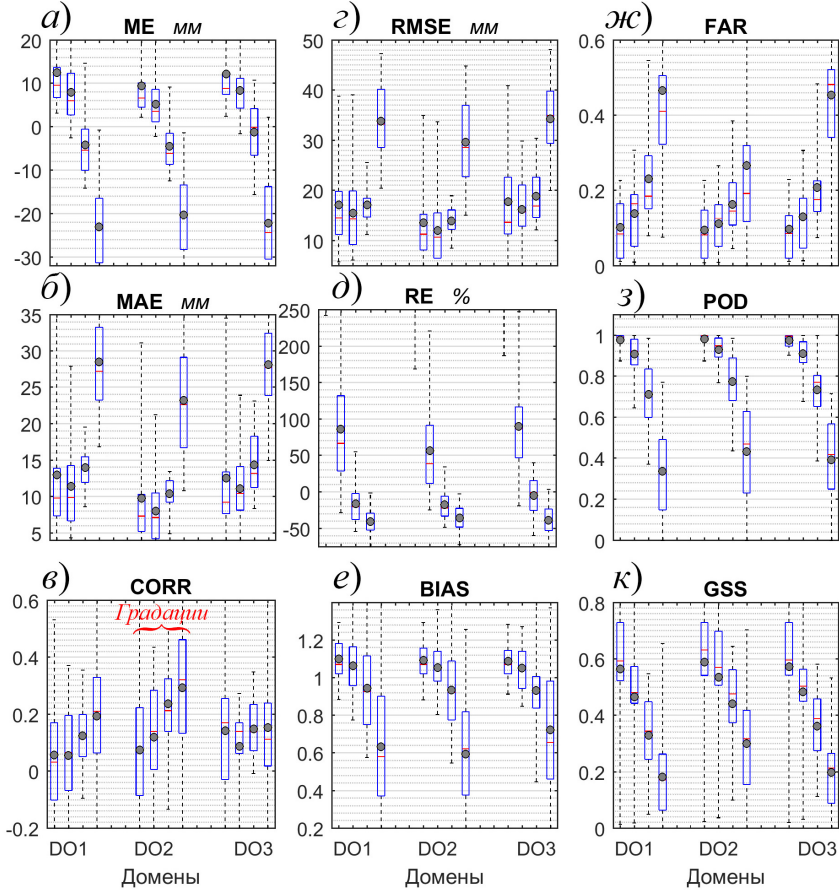


Рис. 5 — Бокс-диаграммы оценок количественного анализа ME (а); MAE (б); CORR (в); RMSE(г); RE(д) и качественного анализа BIAS (е); FAR (ж); POD (з) и GSS (з) для трёх доменов (DO1, DO2 и DO3). Прямоугольниками выделена область, заключённая между первым и третьим квантилем; серыми кружками отмечено среднее значение, выносными – область 10–90 %.

всех доменах завышение моделью в ГСО (BIAS варьируется от 1,03 по 1,18) и занижение в ГСО (BIAS равен 0,66). ГУО воспроизводится 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 очевидно. По анализу коэффициента успешности GSS (рисунок 5к) 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 6 в качестве примера представлены результаты в регионах, выделенным контуром, где наблюдаются сильные осадки. Можно сказать, что эксперимент WRF5 воспроизвел в правильном месте выпадения осадков без завышения их количество. при использовании комбинаций WRF1, WRF2 и WRF4 результаты ухудшаются. В регионе, выделенном прямоугольным на рисунке 6, 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 с помощью 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.

Интересно дать сводную оценку качества воспроизведения осадков при разных комбинациях параметризаций. 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. Эта комбинация параметризации будет использована в дальнейших исследованиях в разделах 4.2 и 4.3.

По результатам ранжирования можно отметить, что использование параметризации ПКО—ППС: KF—MYJ (в комбинации WRF5) представляет собой самую успешную комбинацию для моделирования сильных осадков.

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.

В разделе 4.2 рассмотрено влияние размера и структуры доменов на качество прогнозов.

Для проведения этих исследований рассматривались четыре разных модельных области (эксперименты А, В, С и D), характеристики которых представлены в таблице 3.

Выбранная конфигурация доменов объясняется целями, поставленными в каждом эксперименте:

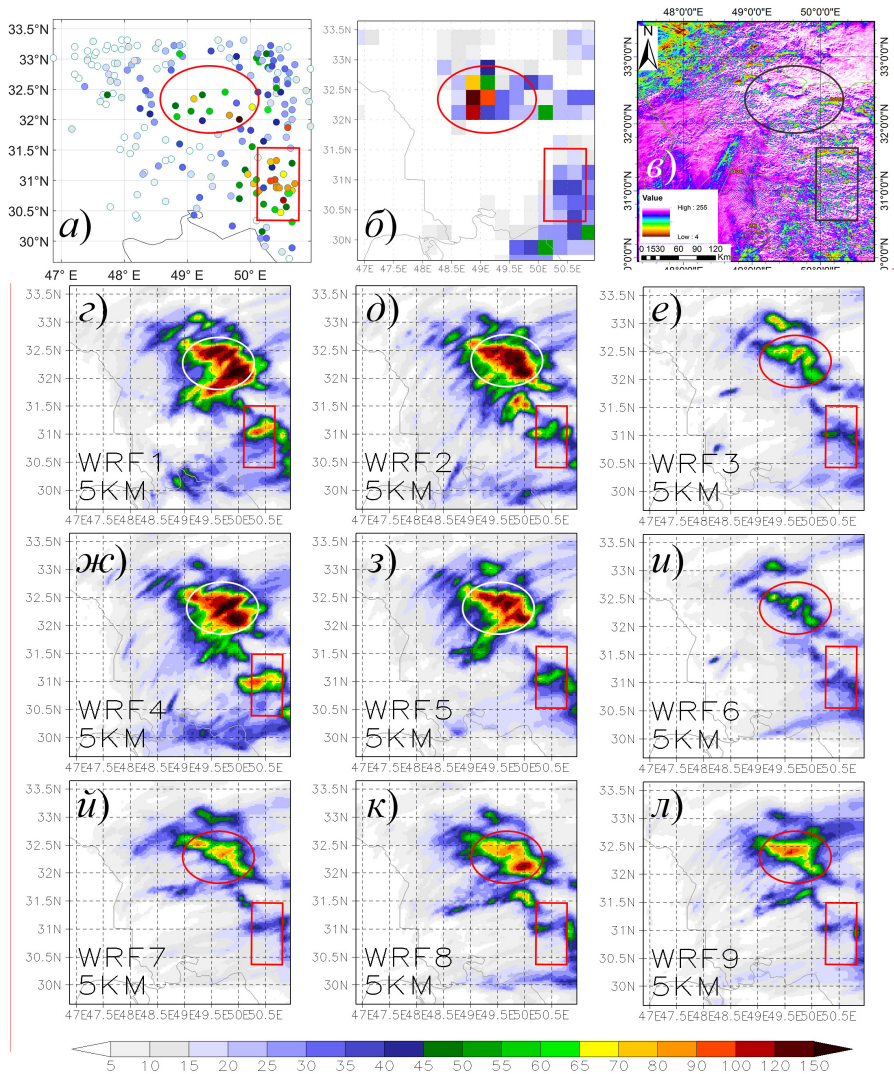


Рис. 6 — Суммарное количество осадков за сутки для случая «№3» на юго-западе Ирана: (а) фактические (каждый кружок изображает одну станцию) данные; (б) данные TRMM; (в) снимок Aqua/MODIS, модельные поля в домене DO2 в комбинациях: (г) «WRF1», (д) «WRF2», (е) «WRF3», (ж) «WRF4», (з) «WRF5», (и) «WRF6», (й) «WRF7», (к) «WRF8» и (л) «WRF9»

1. Эксперимент А → 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.

Таблица 3 — 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	

2. Эксперимент В → 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 → по конфигурации такой же как эксперимент В. Отличаются только размеры доменов. Оценивается влияние изменения размера доменов на качество моделирования.
4. Эксперимент D → 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.

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.

В разделе 4.3 рассмотрено влияние пространственного разрешения а также включения ПКО на качество воспроизведения сильных осадков.

Одны авторы в своих исследованиях обнаружили, что более высокое пространственное разрешение позволило получить более точные результаты, хотя другие описали случаи, когда использование более мелкой сетки не повысило, а понизило точность моделирования. Целью данного раздела является анализ влияния повышения разрешающей способности модели WRF-ARW на точность прогноза осадков при наличии или отсутствии ПКО.

Было проведено 80 численных экспериментов (10 случаев × 8 типов домена), характеристика которых дано в таблице 4.

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

По результатам анализа всех оценок, можно сделать вывод о том, что домен с самым меньшим шагом сетки (DO3) позволяет моделировать осадки с

Таблица 4 — Перечень экспериментов и их характеристики домена

Наименование экс- пери- мента	Шаг сетки по горизонтали, км			Количество узлов сетки; i x j			Размер, исследуемой 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	1800	1100	440
IV+							x1800	x1100	x380
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.

наименьшими ошибками. Наибольшая чувствительность к шагу сетки наблюдается при прогнозе осадков ГОСО.

Сравнивая между собой поля, можно отметить, что точность прогноза в DO3 зависит не только от шага самой мелкой сетки, но и от разрешения родительских доменов.

По результатам экспериментов можно также убедиться, что:

- Для ГСО и ГУО не включение ПКО в DO3 при любом пространственном шаге улучшает качество прогноза.
- Для ГСИО и ГОСО при любом пространственном шаге имеют место меньшие ошибки моделирования, когда ПКО в DO3 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»).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе ранее не обращавшихся метеорологических данных изучен режим температуры, давления и ветра в одной из важнейших экономических зон Ирана – юго-западе Ирана. Результаты обобщены в виде таблиц и карт.
2. Наибольшее внимание уделено режиму осадков. По данным метеорологических станций, имеющих наиболее длинные ряды наблюдений, получены

характеристики средних и максимальных значений суточного количества осадков за месяц и год, а также получены и эмпирические вероятности дней с дождём, законы распределения вероятностей средних значения количества осадков за день с дождём. Результаты статистического анализа показывают, что средние значения суточного количества осадков зависят от высоты станции, тогда как максимальные значения от высоты станции не зависят.

3. Получены соотношения между максимальными и средними ежедневными количествами осадков и построены карты пороговых значений обильных осадков за сутки по рассматриваемой территории.

4. 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 и пограничного слоя.

5. 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.

6. 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.

7. Оценка влияния структуры доменов показывают, что при прогнозах в градациях 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

Публикации соискателя по теме диссертации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. (2017). Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, № 586, С. 191–204.

2. Русин И.Н., Маддах М.А. (2017). Количественные характеристики максимальных осадков юго-западного Ирана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, № 585, С. 142–157.

3. Guryanov V.V., Maddah M.A., Perevedentsev Y.P. (2014). Torrential rain forecast using the mesoscale model WRF-ARW // Biosciences Biotechnology Research Asia, T. 11, С. 181–187, DOI: 10.13005/bbra/1459

*. Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. (2018). Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков в модели WRF-ARW: пример – юго-запад Ирана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, (Готовится к печати).

Список сокращений и условных обозначений

В.Д.	Восточная Долгота
ВСВ	Всемирное координированное время
ГОСО	Градация Очень Сильных Осадков (> 40 мм/сутки)
ГСИО	Градация Сильных Осадков ([15-40) мм/сутки)
ГСО	Градация Слабых Осадков (< 1 мм/сутки)
ГУМ	Градация Умеренных Осадков ([5-15) мм/сутки)
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
MODIS	Moderate-resolution imaging spectroradiometer
NCAR	Национальный центр атмосферных исследований
NCEP	Национальный центр прогнозирования окружающей среды
NOAA	Национальное управление океанических и атмосферных исследований
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
WRF	Weather Research Forecasting model
BMJ	Схема «Betts-Miller-Janjic»
Eta	Схема «Monin-Obukhov (Janjic Eta)»
GF	Схема «Grell-Freitas»
KF	Схема «Kain-Fritsch»
MYJ	Схема «Mellor-Yamada-Janjic Eta»
R_MM5	Схема «Revised MM5 Monin-Obukhov»
WRF	Weather Research Forecasting model
YSU	Схема «Yonsei University»

Маддах Мохаммад Амин

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

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. геогр. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____