

УДК 551.515:551.509

А.А. Шестакова¹, П.А. Торопов^{2,3}

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА ДЛЯ ЮЖНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Экстремальные осадки на иранском побережье Каспийского моря чаще всего наблюдаются в холодное время года и являются результатом синтеза синоптических процессов и мезомасштабных эффектов, возникающих под влиянием крупного водоема и орографических факторов. Численное моделирование случаев наиболее интенсивных осадков в этом густонаселенном районе важно в аспекте усовершенствования методов прогноза этих явлений. С другой стороны, поднимается ряд вопросов о физических механизмах формирования экстремальных осадков: роли планетарного пограничного слоя, озерного эффекта, орографии. В работе проведено численное моделирование восьми эпизодов экстремальных осадков за период 2005–2016 гг. с помощью численной мезомасштабной модели WRF-ARW; проведена детальная верификация модели по данным наблюдений. Показано, что модель воспроизводит максимум осадков в прибрежных районах, что соответствует действительности. Однако при сравнении со станционными данными значения ошибки моделирования осадков могут быть очень велики. Эксперименты с различными параметризациями физических процессов показали наибольшую чувствительность моделируемых осадков к параметризации планетарного пограничного слоя атмосферы. Также выявлена связь интенсивности осадков на иранском побережье Каспийского моря с интегральным влагосодержанием столба атмосферы и с температурой поверхности в южной части водоема.

Ключевые слова: численные эксперименты, модель WRF-ARW, Иран, осадки в горах

Введение. Экстремальные осадки в большинстве районов Земли определяются сочетанием конкретного синоптического процесса с набором местных физико-географических особенностей, среди которых первостепенную роль играет орография и эффект крупного водоема. Роль орографии обычно сводится к динамическому усилению вертикальных движений воздуха, в то время как роль «озерного эффекта» заключается в увеличении потоков тепла и влаги от поверхности водоема, которые, с одной стороны, увеличивают плавучесть атмосферы, а с другой – ее влагосодержание.

Изучение физических механизмов экстремальных осадков на иранском побережье Каспийского моря интересно в связи с ярко выраженным сочетанием вышеозначенных факторов. Активный циклогенез на средиземноморской и иранской ветвях полярного фронта [Бугаев с соавт., 1957; Ghasemi, Khalili, 2008; Molanejad et al., 2015] реализуется на фоне возможных аномалий температуры поверхности южной части акватории Каспийского моря, а также при наличии высоких горных хребтов Эльбурс [Molanejad et al., 2015; Khoshakhlagh et al., 2016; Ghafarian et al., 2018].

Ситуации, приводящие к экстремальным осадкам на южном побережье Каспийского моря, представляют несомненный практический интерес в аспекте усовершенствования их численного прогноза. Из-за сравнительно малых пространственно-временных масштабов региональные атмосферные процессы гористых побережий изучены пока недостаточ-

но и, как правило, плохо воспроизводятся глобальными моделями прогноза погоды. Существенно более успешные результаты моделирования демонстрируют мезомасштабные гидродинамические модели.

Моделированию циркуляции над крупными озерами и ее взаимодействия с рельефом с помощью мезомасштабных моделей атмосферы, а также совместных моделей атмосферы и озера посвящено большое количество работ [Hjelmfelt, 1990; Theeuwes et al., 2010; Anyah et al., 2006]. С помощью численных моделей удастся оценить чувствительность экстремальных осадков к температуре поверхности озера, параметризациям «подсеточных» физических процессов, рельефу местности, наличию температурной инверсии, шероховатости поверхности и др. Например, проведенные для озера Мичиган эксперименты показали, что разница температур между сушей и озером имеет большое значение при моделировании этих явлений [Hjelmfelt, 1990]. А при моделировании осадков над озером Эри с помощью модели WRF-ARW было продемонстрировано, что в эксперименте с более низкой температурой поверхности озера модель существенно занижает осадки по сравнению с контрольным экспериментом [Theeuwes et al., 2010]. В работе Е.Р. Meredith [2015] анализируются физические механизмы формирования экстремальных осадков в Краснодарском крае, вызвавших, в частности, катастрофическое наводнение в Крымске 6 июля 2012 г. Показана определяющая роль температуры поверхности Черного моря.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: shestakova.aa.92@gmail.com

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: tormet@inbox.ru

³ Институт географии РАН, вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: tormet@inbox.ru

Основной целью данной работы является оценка качества моделирования экстремальных осадков на иранском побережье Каспийского моря с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW с учетом многообразия крупномасштабных и мезомасштабных факторов, на фоне которых развивается то или иное событие. Модель верифицируется по натурным данным (станционные и спутниковые наблюдения), проводятся эксперименты на чувствительность результатов к изменению параметризаций физических процессов. Данная работа является первым этапом исследования экстремальных осадков на юге Каспийского моря и выявления роли крупномасштабной циркуляции, «озерного эффекта» и вклада орографии в их формирование.

Материалы и методы исследований. Данные наблюдений. В работе анализируются данные 24 метеорологических станций национальной сети Ирана на побережье Каспийского моря, а также на северных и южных склонах хребта Эльбурс за период 2005–2016 гг. За этот период было выявлено восемь случаев экстремальных осадков: 25 февраля 2007 г., 3 декабря 2007 г., 15–16 декабря 2008 г., 26–27 января 2010 г., 10–12 января 2011 г., 3 февраля 2011 г., 8–9 января 2015 г. и 8 февраля 2016 г. В качестве критерия экстремальности были использованы рекомендации, опубликованные в Наставлениях ... [2009], согласно которым жидкие осадки попадают под критерий опасного явления погоды в том случае, если их суточная сумма превышает 50 мм хотя бы на одной метеостанции в пределах региона, по которому выполняется анализ (прогноз) метеорологических условий. Рассматривается зимний период, поскольку, во-первых, наиболее интенсивные осадки, связанные с полярно-фронтовым циклогенезом, выпадают в этом районе преимущественно в холодное полугодие [Molanejad et al., 2015; Ghasemi, Khalili, 2008], а, во-вторых, в этот период наиболее ярко проявляется «озерный эффект» [Khoshakhlagh et al., 2016]. В данных случаях осадки на прибрежных станциях выпадали преимущественно в виде дождя, в горах – в основном в виде мокрого снега и снега.

Для анализа синоптической ситуации используются данные приземных и аэрологических наблюдений, которые визуализируются в системе ГИС

Метео, разработанной сотрудниками НПЦ «МЭП Мейкер» [https://mapmakers.ru/index.html#section-contact]. Дополнительно для анализа полей облачности привлекаются данные спутника Terra/MODIS (изображения в видимом диапазоне) с пространственным разрешением 5 км, доступные на сайте https://worldview.earthdata.nasa.gov/.

Численные эксперименты. Модель WRF-ARW хорошо зарекомендовала себя в качестве средства физически обоснованного воспроизведения опасных явлений погоды, в том числе конвективных осадков [Павлюков с соавт., 2017; Knebl and Yang, 2008; Theeuwes et al., 2010; Schumacher and Johnson, 2008; Yu, 2013]. В работе М. Азади с соавторами [2013] показано, что модель WRF-ARW успешно прогнозирует осадки на территории Ирана в холодное время года. Преимущество данной модели особенно ярко проявляется в районах с большим количеством осадков (т. е. в случае Ирана на побережье Каспийского моря) [Азади с соавт., 2013] и при моделировании сильных осадков [Азади с соавт., 2013; Вельтищев с соавт., 2011].

Несмотря на многочисленность экспериментов, испытывающих чувствительность моделируемых осадков к различным параметризациям физических процессов, стандартный набор параметризаций, наилучшим образом описывающий процесс, отсутствует. Так, например, различные исследователи приходят к выводу, что значительная чувствительность модели проявляется в отношении параметризаций пограничного слоя [Jankov et al., 2015], кучевых облаков [Knebl, Yang 2008; Jankov et al., 2015], микрофизики облаков и подстилающей поверхности [Yu, 2013].

На основе анализа литературы было выбрано несколько наборов параметризаций (кучевых облаков, пограничного слоя и микрофизики облаков), которые представлены в табл. 1. Всего было проведено пять тестовых экспериментов для случая сильных осадков 8 февраля 2016 г. Моделирование остальных эпизодов экстремальных осадков проводилось с использованием версии модели WRF-ARW 3.4.1 и набора параметризаций, подобранного по результатам сравнения тестовых экспериментов с данными наблюдений. Для интегрирования использовалось 3 вложенных сетки с разрешением 30, 10 и

Таблица 1

Параметры численных экспериментов с различными параметризациями конвективных облаков, пограничного слоя и микрофизики облаков. Обозначения сокращений указаны в сносках

№	Конвекция (во внутренней расчетной области (Рис. 1))	Пограничный слой	Микрофизика облаков
1	Kain-Fritsch	MYNN ²	Lin
2	Нет ¹	MYNN	Lin
3	Нет ¹	YSU ³	Lin
4	Нет ¹	MYNN	Thompson
5	Нет ¹	MYNN	WSM ⁴

¹ Не параметризуется, разрешается явно; ² схема Melor-Yamada-Niino-Nakanishi уровня 2,5; ³ схема университета Йонсей;

⁴ схема WRF Single-Moment 6-class

3,3 км (рис. 1). Количество вертикальных уровней – 40, время адаптации модели к начальным данным полагалось равным 6 ч. В работе [Knebl, Yang, 2008] показано, что выбор параметризации солнечной радиации не влияет на качество моделирования осадков, в данной работе используется схема **RRTMG** (Rapid Radiative Transfer Model) для длинноволновой радиации и схема Дудхиа для коротковолновой радиации. В качестве начальных и граничных условий использовались поля анализа **FNL** (final analysis) модели **GFS** (Global Forecast System) с временным разрешением 6 часов и пространственным разрешением 1°.

Методы оценки качества моделирования осадков. Значительная пространственная неоднородность поля осадков существенно усложняет методику сравнения результатов моделирования с натурными данными (см. обзор методов оценки прогноза осадков в работе Ю.Б. Павлюкова с соавторами [2017]). В данной публикации сравнение сеточных модельных данных с наблюдениями осуществлялось с помощью двух подходов. Первый методически напоминает один из наиболее простых алгоритмов кластерного анализа, известный как «метод ближайшего соседа». Для каждой метеорологической станции рассматривается ближайший модельный узел и окружающие его точки в радиусе 8 км. Среди них выбирается значение осадков, максимально совпадающее с наблюдаемым. Второй метод основан на сравнении данных моделирования и наблюдений, осредненных по западной и восточной частям иранского побережья (белые квадраты на рис. 2). Рассматривается отклонение модельных значений суточных сумм осадков (x) от наблюдений (y) $bias = x - y$, абсолютная ошибка моделирования

$MAE = [x - y]$, относительное отклонение

$RE = \left(\frac{bias}{y} \right) * 100\%$ и относительная ошибка

$RAE = \left(\frac{MAE}{y} \right) * 100\%$, осредненные по всем стан-

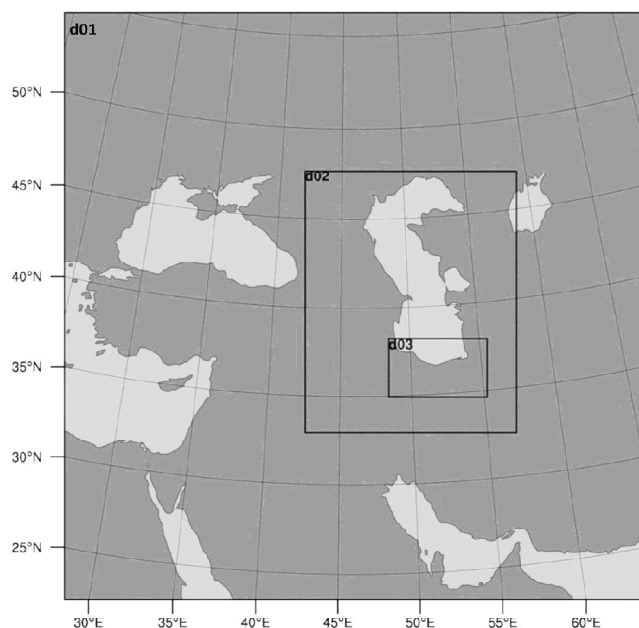


Рис.1 Карта-схема расчетных областей модели WRF-ARW d01, d02 и d03

Fig. 1. Schematic map of computation regions d01, d02 and d03 for the WRF-ARW model

циям при использовании первого метода и по подобластям для второго метода.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты сравнения тестовых экспериментов с данными наблюдений представлены в табл. 2. Наименьшее систематическое отклонение модельных суточных сумм осадков от наблюдаемых в окрестностях станций отмечается для эксперимента 2 (модель завышает значения на станциях в среднем на 2,6 мм/сут, относительное отклонение составляет 9%); самое низкое значение абсолютной ошибки моделирования было зафиксировано для экспериментов 2, 4 и 5 (8–9 мм/сут). При сравнении средних значений в подобластях оказывается, что модель завышает осадки (почти в 2 раза по сравне-

Таблица 2

Средние ошибки моделирования осадков при сравнении в точках станций (и их окрестности) и при сравнении средних значений в подобластях (см. пояснения в тексте) для разных экспериментов (их номера указаны в первом столбце)

№	В окрестностях станций			Отклонение bias, мм (RE, %)	
	Среднее отклонение bias (мм)	Абсолютная ошибка MAE (мм)	Относительное отклонение RE, %	Запад	Восток
1	4,6	9,7	17	1,7 (5)	9,6 (41)
2	2,6	8,9	9	0,8 (2)	9,4 (40)
3	7,0	11,1	26	10,6 (32)	13,4 (57)
4	5,1	8,4	19	1,1 (3)	11,3 (48)
5	3,1	8,0	11	2,4 (7)	10,8 (46)

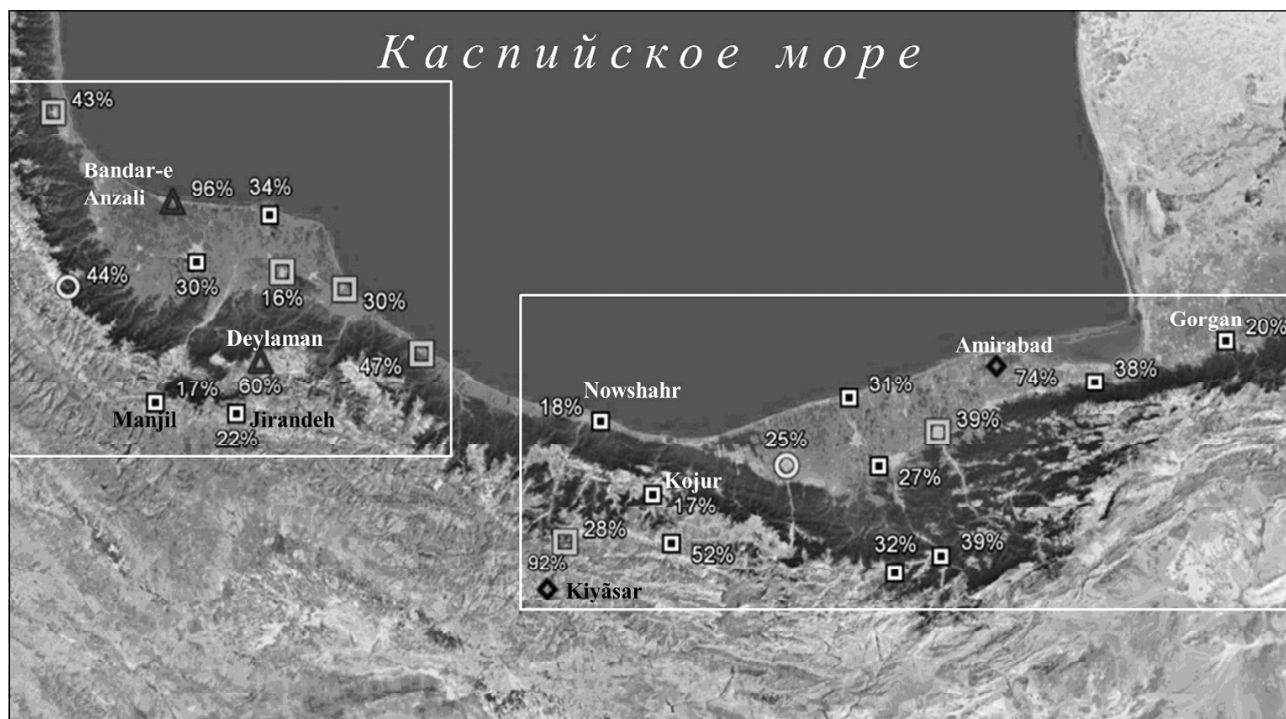


Рис. 2. Карта-схема средних по всем эпизодам ошибок моделирования суточных сумм осадков на станциях (названия некоторых станций подписаны): значки обозначают положение станций и значение относительного отклонения RE (отношение среднего отклонения к величине осадков) (заполненный квадрат – $|RE| < 10\%$, пустой квадрат – $-50\% < RE < -10\%$, ромб $RE < -50\%$, круг $10\% < RE < 50\%$, треугольник $RE > 50\%$), цифрами указано значение относительной ошибки RAE (отношение абсолютной ошибки к величине осадков, в %)

Fig. 2. Schematic map of averaged errors of daily precipitation sums modeling for the stations (several names of the stations are given). Symbols show the location of the stations and the values of relative deviation RE (ratio of the average deviation to the sum of precipitation): filled square – $|RE| < 10\%$, empty square – $-50\% < RE < -10\%$, rhomb $RE < -50\%$, circle $10\% < RE < 50\%$, triangle $RE > 50\%$. Numbers indicate the values of relative error RAE (ratio of the absolute error to the sum of precipitation, %)

нию с наблюдениями) преимущественно в восточной части побережья (табл. 2). В западной подобласти ошибки относительно невелики (среднее относительное отклонение не превышает 7%), за исключением эксперимента 3, в котором используется схема параметризации пограничного слоя университета Йонсей (табл. 1).

Полученные оценки позволяют однозначно исключить из рассмотрения эксперимент 3, а из оставшихся наилучшее соответствие с данными наблюдений по большинству параметров демонстрирует эксперимент 2. Набор параметризаций эксперимента 2 будет использован для моделирования прочих случаев экстремальных осадков в исследуемом регионе. Схожий с экспериментом 2 набор параметризаций успешно использовался ранее при моделировании осадков в Иране [Азади с соавт., 2013].

Результаты сравнения экспериментов показали, что выбор параметризации микрофизики облаков, а также параметризация или явное разрешение конвекции во внутренней области меньше влияют на результаты моделирования осадков в данных экспериментах, чем выбор параметризации пограничного слоя. Использование схемы YSU приводит к существенному завышению количества осадков по сравнению со схемой MYNN. Такой же результат был получен, например, при моделировании сильных осадков на побережье Австралии [Gilmore et al.,

2016]. Существенное различие двух тестируемых схем пограничного слоя заключается в том, что MYNN является локальной схемой (значение метеорологической величины на каждом вертикальном уровне определяется значениями на соседних уровнях, а значит влияние крупных турбулентных вихрей на перемешивание в пограничном слое не учитывается), а YSU – нелокальной (т. е. дополнительно учитывается влияние не только соседних, но и других вертикальных уровней в пограничном слое на значение метеорологической величины на каждом уровне). Это различие обуславливает более интенсивное перемешивание и более глубокий пограничный слой в схеме YSU по сравнению со схемой MYNN, что в свою очередь приводит к занижению влажности и завышению температуры у земли нелокальной схемой [Cohen et al., 2015; Hu et al., 2010]. Кроме того, перепад температуры в нижней тропосфере (0–3 км) оказывается большим при использовании схемы YSU по сравнению со схемой Мелора-Ямады [Cohen et al., 2015], поэтому YSU переоценивает величину конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE) в перемешанном слое сильнее, чем локальные схемы. Для рассматриваемого эпизода в эксперименте с параметризацией YSU перепад температуры в нижнем слое (мощностью в 1,5 км) превышает таковой при использовании схемы MYNN на 2–3 градуса, величина пара-

метра CAPE, соответственно, повышается на 60–80 Дж/кг (что составляет около 50%, см. табл. 5). Очевидно, что именно эта особенность схемы YSU и приводит к значительному завышению количества осадков в эксперименте 3.

Анализ результатов моделирования нескольких эпизодов экстремальных осадков. Статистические оценки результатов моделирования всех отобранных эпизодов сильных осадков с подобранной конфигурацией модели представлены в табл. 3. Значения ошибок для разных эпизодов меняются в широких пределах; систематическое отклонение может быть как положительным, так и отрицательным. В трети случаев относительное отклонение RE в среднем не превышает 10% от измеренного значения, однако может достигать 30–40% в отдельные дни (27.10.2010, 11.01.2011). Средняя абсолютная ошибка в среднем больше 5 мм и составляет от 30 до 60% от измеренной величины.

Также ошибки существенно изменяются для различных станций. На рис. 2 показана карта станций со средними по всем эпизодам значениями RE и RAE. Видно, что на некоторых станциях (Горган, Жирандех, Манджил, Кожур, Ноусхахр) как RE, так и RAE малы ($|RE| < 10\%$, $RAE < 25\%$), а на станциях Диламан, Бандар-эль-Энзели, Амирабад, Кияхар – велики (на первых двух станциях модель значительно завышает осадки, на последних двух – занижает). При этом хорошее качество моделирования осадков в западной подобласти по сравнению с восточной, как это наблюдалось для тестового эксперимента 8 февраля 2016, характерно только для половины эпизодов. Для трех рассматриваемых дат результаты моделирования оказались лучше в восточной подобласти, а для других четырех – одинаковыми в обеих подобластях.

С целью выявления пространственного распределения средних ошибок моделирования все станции были разбиты на три категории – горные, равнинные и прибрежные, причем вторая и третья категория станций пересекаются между собой.

Результаты моделирования для этих категорий представлены в табл. 4. Среднее количество осадков максимально на прибрежных и равнинных станциях, на горных станциях осадков выпадает примерно в 3 раза меньше. Однако относительные отклонения и ошибки моделирования для разных категорий различаются мало. Чуть большее систематическое отклонение наблюдается для прибрежных станций, а RAE на 10% меньше на равнинных станциях. Таким образом, проведенный анализ ошибок моделирования осадков показывает, что четкая закономерность в распределении ошибок отсутствует.

Для выявления причин различия величины ошибок моделирования осадков от эпизода к эпизоду был проведен дополнительный анализ крупномасштабных и мезомасштабных характеристик атмосферы, на фоне которых развивалось каждое событие. По результатам моделирования в области d02, охватывающей Каспийский регион, анализировались такие параметры, как общее влагосодержание столба атмосферы над Каспийским морем и прилегающими территориями (TPW, кг/м² или мм), поток скрытого тепла (LE, Вт/м²), температура поверхности моря (ТПО, °C), разница между температурой поверхности моря и воздуха на высоте 2 м (ΔT , °C) и доступная конвективная потенциальная энергия в слое с максимальной неустойчивостью (CAPE, Дж/кг) над южной частью Каспийского моря. Для каждого эпизода находилось максимальное значение этих параметров в указанных областях (табл. 5).

Синоптический анализ всех рассматриваемых случаев показал, что экстремальные осадки в исследуемом районе могут наблюдаться при различных крупномасштабных процессах – от перемещения активного циклона над Ираном до обострения атмосферных фронтов при холодном вторжении по периферии антициклона с центром над европейской территорией России (ЕТР) и Восточной Европой или даже на фоне центра высокого давления непосредственно над Каспийским морем. Следует отметить, что модель хорошо воспроизводит поле облачности

Таблица 3

Средние по всем станциям значения суточных сумм осадков, максимальной суточной суммы осадков и средние значения ошибок моделирования для всех эпизодов сильных осадков

	Средняя суточная сумма $\bar{Y}$, мм	Максимальная суточная сумма Y_{max} , мм	Отклонение bias, мм	Абсолютная ошибка MAE, мм	Относительное отклонение RE, %	Относительная ошибка RAE, %
25.02.2007	21,3	53	–0,1	6,4	–1	30
03.12.2007	23,9	89	0,5	8,4	2	35
15.12.2008	18,6	98	2,1	11,4	11	61
16.12.2008	14,1	75	–3,6	5,4	–26	38
26.01.2010	25,1	67	3,5	9,2	14	37
27.01.2010	14,8	28	–6,2	7	–42	47
10.01.2011	34,1	108	–9,3	12,1	–27	35
11.01.2011	18,6	57	–6,5	10,1	–35	54
12.01.2011	13,7	79	–2,3	6,4	–17	47
03.02.2011	32,6	92	–6,2	8,7	–19	27
08.01.2015	21	84	1,9	9,2	9	44
09.01.2015	18,2	71	–3,9	9,9	–22	54

Таблица 4

**Осредненные по всем эпизодам суточные суммы осадков и ошибки моделирования
для разных категорий станций**

Категория станций	Горные	Равнинные	Прибрежные
Суточная сумма y , мм	9,0	29,4	32,7
Отклонение bias, мм	-1,0	-3,5	-5,5
Абсолютная ошибка MAE, мм	4,5	11,4	15,3
Относительное отклонение RE, %	-11	-12	-17
Относительная ошибка RAE, %	49	39	47

Таблица 5

**Среднее относительное отклонение и относительная ошибка, а также параметры TPW, LE, ТПО, ΔT и CAPE
над южной частью Каспийского моря по результатам моделирования для всех рассматриваемых эпизодов**

	RE, %	RAE, %	TPW, мм	LE, Вт/м ²	ТПО, °C	ΔT , °C	CAPE, Дж/кг
25.02.2007	-1	30	20	350	13	10	0
03.12.2007	2	35	22	300	18	6	110
15.12.2008	11	61	17	450	17	14	200
16.12.2008	-26	38	14	400	17	14	200
26.01.2010	14	37	20	350	15	8	100
27.01.2010	-42	47	11	400	15	15	110
10.01.2011	-27	35	18	350	17	11	80
11.01.2011	-35	54	15	300	17	14	130
12.01.2011	-17	47	13	300	17	13	110
03.02.2011	-19	27	17	300	15	11	90
08.01.2015	9	44	20	400	15	7	250
09.01.2015	-22	54	13	350	15	12	100
08.02.2016	9	32,6	22	350	14	8	120

при сравнении со спутниковыми данными (рис. 3), в том числе плотную фронтальную облачность, чаще всего наблюдаемую над югом Каспийского моря, и конвективные ячейки, гряды конвективных облаков, характерные для холодных вторжений над теплым водоемом [Вельтищев, Степаненко, 2007]. К сожалению, связи между ошибкой моделирования (ее величиной и знаком) и синоптической ситуацией выявлено не было, так же как и с такими параметрами, как поток скрытого тепла и CAPE.

Однако была выявлена статистически значимая линейная зависимость (с коэффициентом детерминации 0,6) относительного отклонения модельных осадков от влагосодержания воздуха. При низком влагосодержании воздуха модель занижает количество осадков по сравнению с наблюдениями, а при высоком влагосодержании ошибка близка к нулю, либо происходит слабое завышение количества осадков (до 14%). Также происходит незначительное завышение осадков моделью при небольшой разнице температуры воды и воздуха, а при большом ΔT модель занижает количество осадков (коэффициент детерминации этой связи составляет 0,5, рис. 4). Причина обнаруженных связей требует дополнительного исследования, обнаружить ее пока не удалось.

Таким образом, выделяется группа эпизодов с небольшим положительным отклонением моделируемых осадков и относительной ошибкой около

40% – 26 января 2010 г., 8 января 2015 г. и 8 февраля 2016 г., которая характеризуется очень высоким влагосодержанием столба атмосферы, относительно небольшой величиной скачка температуры вода-воздух и ТПО 14–15 градусов.

Выводы:

– численное моделирование восьми эпизодов экстремальных осадков на иранском побережье Каспийского моря с помощью модели WRF-ARW выявило способность данной модели воспроизводить экстремальные осадки. Значения абсолютных ошибок достаточно велики, что характерно при моделировании такого сложного и пространственно неоднородного явления, как осадки (тем более в условиях сложного рельефа). Количественные оценки результатов моделирования суточных сумм осадков сильно отличаются для разных эпизодов, среднее относительное отклонение меняется от -42% до 14% (в абсолютных показателях от -9 до 3,5 мм). Для некоторых эпизодов абсолютная ошибка и отклонение малы. Сравнение со спутниковыми снимками показало, что модель хорошо воспроизводит поля облачности, в том числе гряды кучевых облаков над озером и более мощную облачность на атмосферных фронтах;

– максимальное количество осадков в среднем выпадает на прибрежных станциях, минимальное – в горах. Такое пространственное распределение осадков воспроизводится моделью, ошибка моде-

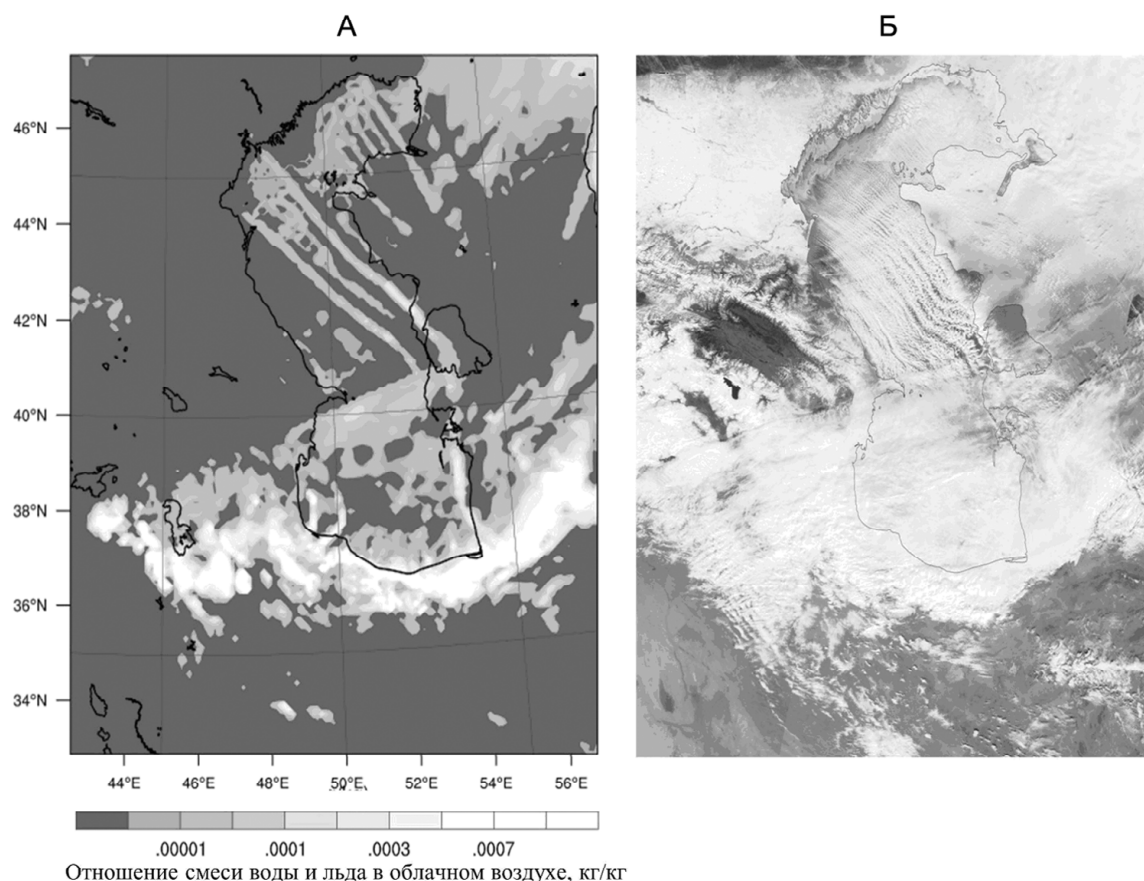


Рис. 3. А – карта отношения смеси воды и льда в облачном воздухе (сумма по всему столбу атмосферы) в 6 ч ВСВ 25 февраля 2007 г. по результатам моделирования в области d02, Б – снимок облачности Terra/Modis в видимом диапазоне для того же района, сделанный около 7 ч ВСВ того же числа

Fig. 3. А – map of water-ice ratio in cloudy air (for the whole atmospheric column) at 6 a.m. UTC, February 25, 2007, on the results of modeling for d02 region; Б – Terra/Modis visible-range image of clouds for the same region taken at about 7 a.m. UTC the same date

лирования примерно равна для горных и равнинных районов;

– тестовые эксперименты с различными параметризациями подсечочных процессов показали, что наибольшая чувствительность моделируемых экстремальных осадков проявляется к параметризации пограничного слоя. Использование нелокальной схемы YSU приводит к переоценке перемешивания в пограничном слое, что ведет к завышению величины перепада температуры в нижней тропосфере и величины CAPE, что в конечном итоге приводит к серьезному завышению количества осадков. Выбор остальных параметризаций физических процессов (конвекции, микрофизики облаков) меньше влияет на результат моделирования;

– знак и величина отклонения модельных осадков от наблюдаемых в среднем для всех станций зависят от величины перепада температуры между поверхностью Каспийского моря и воздухом на высоте 2 м в южной части акватории, а также от влагосодержания столба атмосферы над регионом.

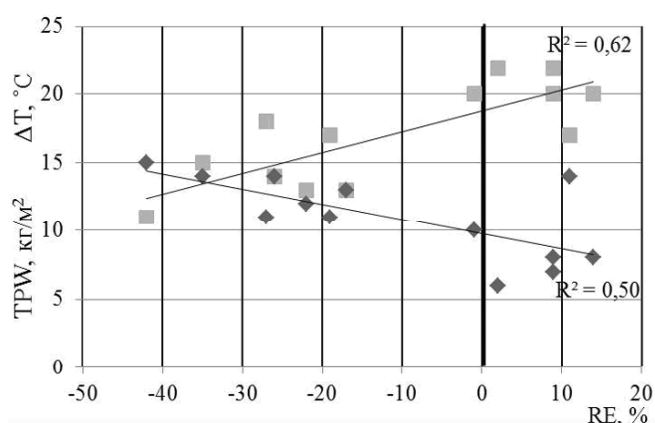


Рис. 4. Диаграмма рассеяния относительного отклонения RE модельных осадков от наблюдений и общего влагосодержания TPW (квадраты) и перепада температуры ΔT (ромбы). Также показаны регрессионные прямые и коэффициент детерминации

Fig. 4. Dispersion diagram for the relative deviation RE of simulated precipitation from observations and the total water amount TPW (squares) and the temperature amplitude ΔT (rhombs). Regression lines and coefficient of determination are also shown

Благодарности. Авторы благодарят проф. Кислова А.В. и проф. Семенова Е.К. за полезные обсуждения результатов и помощь в проведении синоптического анализа. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект «Иран_а» № 17-55-560017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Азади М., Тагизаде Э., Мемариан М.Х., Дмитриева-Араго Л.Р. Сравнение результатов прогноза осадков на основе мезомасштабных моделей на территории Ирана в холодный период года // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 9. С. 31–42.
- Бугаев В.А., Джорджио В.А., Козик Е.М., Петросяни М.А. и др. Синоптические процессы Средней Азии. Ташкент: Издательство АН УзССР, 1957. 477 с.
- Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 1. С. 5–18.
- Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 126 с.
- Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Обнинск: ИГ СОЦИН. 2009. 62 с.
- Павлюков Ю.Б., Зарипов Р.Б., Лукьянов А.Н., Шестакова А.А., Шумилин А.А., Травов А.В. Оценка информативности радиолокационных данных при анализе состояния атмосферы в Московском регионе // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 6. С. 5–21.
- Anyah R.O., Semazzi F.H.M. and Xie L. Simulated physical mechanisms associated with climate variability over lake Victoria basin in East Africa // *Mon. Weath. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 3588–3609.
- Cohen A.E., Cavallo S.M., Coniglio M.C., Brooks H.E. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern US cold season severe weather environments // *Weather and forecasting*. 2015. Vol. 30. № 3. P. 591–612.
- Ghafari P., Pegahfar N., Owlad E. Multiscale analysis of lake effect snow over the southwest coast of the Caspian Sea (31 January–5 February 2014) // *Weather*. 2018. Vol. 73. № 1. P. 9–14.
- Ghasemi A.R., Khalili D. The association between regional and global atmospheric patterns and winter precipitation in Iran // *Atmospheric Research*. 2008. Vol. 88. № 2. P. 116–133.
- Gilmore J.B., Evans J.P., Sherwood S.C., Ekström M., Ji F. Extreme precipitation in WRF during the Newcastle East Coast Low of 2007 // *Theoretical and applied climatology*. 2016. Vol. 125. № 3–4. P. 809–827.
- Hjelmfelt M. Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over lake Michigan // *Mon. Weath. Rev.* 1990. Vol. 118. P. 138–150.
- Hu X.M., Nielsen-Gammon J.W., Zhang F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. Vol. 49. № 9. P. 1831–1844.
- Jankov I., Gallus Jr.W.A., Segal M., Shaw B., Koch S.E. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall // *Weather and forecasting*. 2005. Vol. 20. № 6. P. 1048–1060.
- Khoshakhlagh F., Farid M.N., Negah S., Momenpour F., Hadinezhad S.S., Asadi O.E. Lake effect snow phenomenon and its role on heavy snowfall in the southwest of the Caspian sea // *Geographic Space*. 2016. Vol. 16. № 53. P. 41–45.
- Knebl M.R. and Yang Z.-L. Assessing the capability of a regional-scale weather model to simulate extreme precipitation patterns and flooding in central Texas // *Weather and Forecasting*. 2008. Vol. 23. P. 1102–1126.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8. № 8. P. 615–629.
- Molanejad M., Soltani M., Ranjbar SaadatAbadi A., Babu C.A., Sohrabi M., Martin M.V. Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea // *International Journal of Environmental Research*. 2015. Vol. 9. № 1. P. 117–132.
- Schumacher R.S., Johnson R.H. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood // *Mon. Weath. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 3964–3986.
- Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Krikken F., Holts A.A.M. Mesoscale modeling of lake effect snow over Lake Erie – sensitivity to convection, microphysics and the water temperature // *Adv. Sci. Res.* 2010. Vol. 4. P. 15–22.
- Yu E.T. High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China // *Chinese Science Bulletin*. 2013. Vol. 58. № 12. P. 1412–1419.

Поступила в редакцию 12.07.2018
После доработки 20.06.2019
Принята к публикации 28.06.2019

A.A. Shestakova¹, P.A. Toropov^{2,3}

SIMULATION OF EXTREME WINTER PRECIPITATION ON THE SOUTHERN COAST OF THE CASPIAN SEA

Extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea is most often observed during the cold season and results from the combination of synoptic processes and mesoscale effects arising under the influence of a large body of water and topography factors. Numerical simulation of the most intense precipitation events in the densely populated area is important for improving the methods of precipitation forecast. On the other hand, a number of questions arise about the physical mechanisms of extreme precipitation, i.e. the role of the planetary boundary layer, the lake effect, the topography. We carried out numerical modeling of eight episodes of extreme precipitation for the period of 2005–2016 using the WRF-ARW numerical mesoscale model; a detailed verification of the model by observational data was performed. It is shown that the model successfully reproduces maximum precipitation in the coastal areas. However, the precipitation modeling errors could be very high when comparing with the station

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Engineer; e-mail: hestakova.aa.92@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Associate Professor; PhD in geography; e-mail: tormet@inbox.ru

³ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: tormet@inbox.ru

data. Experiments with various parametrization of physical processes have shown the greatest sensitivity of the simulated precipitation to the parametrization of the atmospheric planetary boundary layer. The relationship between the intensity of precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea and the integral moisture content of the atmospheric column and the sea surface temperature in the southern part of the lake was also revealed.

Key words: numerical experiments, WRF-ARW model, Iran, mountain precipitation

Acknowledgements. The authors are grateful to Prof. A.V. Kislov and Prof. E.K. Semenov for the stimulating discussion of the results and the assistance in the synoptic analysis. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project Iran_a 17-55-560017)

REFERENCES

- Anyah R.O., Semazzi F.H.M., Xie L. Simulated physical mechanisms associated with climate variability over lake Victoria basin in East Africa // *Mon. Weath. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 3588–3609.
- Azadi M., Taghizadeh E., Memarian M.H., Dmitrieva-Arrago L.R. Comparing the results of precipitation forecast based on mesoscale models on the territory of Iran during the cold season. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2013. Vol. 38. Issue 9. P. 605–613.
- Bugaev V. A., Dzhordzhio V.A., Kozik E.M., Petrosyants M.A. *et al.* Sinopticheskie protsessy v Sredney Azii [Synoptical processes in the Central Asia] / Tashkent, Izd-vo AN UzSSR, 1957. 477 p. (in Russian)
- Cohen A.E., Cavallo S.M., Coniglio M.C., Brooks H.E. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern US cold season severe weather environments // *Weather and forecasting.* 2015. Vol. 30. № 3. P. 591–612.
- Ghafarian P., Pegahfar N., Owlad E. Multiscale analysis of lake effect snow over the southwest coast of the Caspian Sea (31 January–5 February 2014) // *Weather.* 2018. Vol. 73. № 1. P. 9–14.
- Ghasemi A. R. and Khalili D. The association between regional and global atmospheric patterns and winter precipitation in Iran // *Atmospheric Research.* 2008. Vol. 88. № 2. P. 116–133.
- Gilmore J.B., Evans J.P., Sherwood S.C., Ekström M., Ji F. Extreme precipitation in WRF during the Newcastle East Coast Low of 2007 // *Theoretical and applied climatology.* 2016. Vol. 125. № 3–4. P. 809–827.
- Hjelmfelt M. Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over lake Michigan // *Mon. Weath. Rev.* 1990. Vol. 118. P. 138–150.
- Hu X.M., Nielsen-Gammon J.W., Zhang F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model // *Journal of Applied Meteorology and Climatology.* 2010. Vol. 49. № 9. P. 1831–1844.
- Jankov I., Gallus Jr.W.A., Segal M., Shaw B., Koch S.E. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall // *Weather and forecasting.* 2005. Vol. 20. № 6. P. 1048–1060.
- Khoshakhlagh F., Farid M.N., Negah S., Momenpour F., Hadinezhad S.S., Asadi O.E. Lake effect snow phenomenon and its role on heavy snowfall in the southwest of the Caspian sea // *Geographic Space.* 2016. Vol. 16. № 53. P. 41–45.
- Knebl M.R., Yang Z.-L. Assessing the capability of a regional-scale weather model to simulate extreme precipitation patterns and flooding in central Texas // *Weather and Forecasting.* 2008. Vol. 23. P. 1102–1126.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. *et al.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience.* 2015. Vol. 8. № 8. P. 615–629.
- Molanejad M., Soltani M., Ranjbar SaadatAbadi A., Babu C.A., Sohrabi M., Martin M.V. Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea // *International Journal of Environmental Research.* 2015. Vol. 9. № 1. P. 117–132.
- Nastavlenie po kratkorochnym prognozom pogodyi obshchego naznacheniya [Manual on the general purpose short-term weather forecasts] / Federalnaya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushey sredy (Rosgidromet), Obninsk, IG-SOTsIN, 2009. 62 p. (in Russian)
- Pavlyukov Y.B., Zaripov R.B., Luk'yanov A.N., Shestakova A.A., Shumilin A.A., Travov A.V. The impact of radar data assimilation on atmosphere state analysis in the Moscow region // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2017. Vol. 42. P. 357–368.
- Schumacher R.S., Johnson R.H. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood // *Mon. Weath. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 3964–3986.
- Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Krikken F., Holtsl A.A.M. Mesoscale modeling of lake effect snow over Lake Erie – sensitivity to convection, microphysics and the water temperature // *Adv. Sci. Res.* 2010. Vol. 4. P. 15–22.
- Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Y.B. Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2011. Vol. 36. Issue 1. P. 1–10.
- Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. Mezometeorologicheskie protsessy [Mesometeorological processes]. M.: Geograficheskii fakultet MGU, 2007. 126 p. (in Russian)
- Yu E.T. High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China // *Chinese Science Bulletin.* 2013. Vol. 58. № 12. P. 1412–1419.

Received 12.07.2018

Revised 20.06.2019

Accepted 28.06.2019