

СИЛЬНЫЕ ОСАДКИ НА ИРАНском ПОБЕРЕЖЬЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Торопов П.А.¹, Шестакова А.А.², Кислов А.В.¹, Оджи Р.³

¹ *Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия, e-mail: tormet@inbox.ru*

² *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия, e-mail: shestakova@ifaran.ru*

³ *Гуйланский университет, Гуйлан, Иран, e-mail: ruhollah.oji@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 01.02.2019, одобрена к печати 06.12.2019

Основная цель данной работы – определение генезиса сильных осадков на иранском побережье Каспийского моря, а также количественная оценка вклада различных факторов в формирование таких осадков. Анализ синоптических полей, спутниковых данных и результатов численного мезомасштабного моделирования показал, что природа сильных осадков в исследуемом регионе существенно смешанная. Первичная причина выпадения осадков – синоптические процессы, чаще всего – активизация циклогенеза на полярном фронте при условии вторжения холодного воздуха. Однако вклады «озерного эффекта» (который выражается в больших значениях потоков тепла и влаги от поверхности Каспийского моря) и рельефа (инициирующего конвергенцию влаги на наветренной стороне горных хребтов Эльбрус), велики и в среднем составляют около 50%. При увеличении температуры поверхности Каспийского моря, которое возможно в климатических условиях будущего, в первую очередь, возрастает доля сильных осадков.

Ключевые слова: мезомасштабное моделирование, экстремальные осадки, Каспийское море

Введение

В условиях умеренного и субтропического климатов наиболее высокая повторяемость сильных осадков наблюдается в тех регионах, в которых происходит суперпозиция определенного синоптического процесса и физически обусловленного влияния местных физико-географических факторов, среди которых приоритетно следует отметить рельеф, а также крупные водоемы (так называемый озерный эффект). Прежде всего, это гористые морские побережья, находящиеся в зоне активной циклонической деятельности. Высокая плотность населения и наличие многих хозяйственных объектов в этих районах создают предпосылки к значительным негативным социально-экономическим последствиям при наступлении экстремального ОЯП. В Северном полушарии к таким районам можно отнести западное побережье Канады, Скандинавского полуострова, побережья Японского архипелага, побережья Великих Американских озер, средиземноморское побережье Европы

и Турции, Черноморское побережье Кавказа. Одним из таких регионов является также каспийское побережье Ирана. Повышенный интерес к Каспийскому морю, обусловленный экономическим и политическим взаимодействием России, Ирана, Казахстана, Азербайджана, Туркменистана, повлек за собой ряд научно-исследовательских проектов, тематика которых направлена на изучение природных процессов – прежде всего, тех, которые угрожают устойчивому развитию региона. Среди них одно из первых мест занимают опасные явления погоды, такие как – сильные осадки, максимум интенсивности и повторяемости которых приходится как раз на иранское побережье Каспия.

Активная циклоническая деятельность на средиземноморской ветви полярного фронта в период с октября по март (Бугаев и др., 1957; Ghasemi, Khalili, 2008; Molanejad et al., 2015) в сочетании с интенсивным турбулентным и конвективным притоком тепла и водяного пара в атмосферу над южной частью акватории Каспийского моря, а также динамическим воздействием горных хребтов Эльбурс (Molanejad et al., 2015; Khoshakhlagh et al., 2016; Ghafarian et al., 2018) становится причиной возникновения мощных облачных систем и интенсивных осадков, которые практически ежегодно достигают уровня ОЯП.

Моделированию циркуляции над крупными водоемами и ее взаимодействия с рельефом с помощью мезомасштабных моделей атмосферы, а также совместных моделей атмосферы и озера посвящено большое количество работ (например, Hjelmfelt, 1990; Theeuwes et al., 2010; Anyah et al., 2006). С помощью численных моделей удастся оценить чувствительность сильных осадков к температуре поверхности озера (ТПО) (Meredith, 2015), параметризациям «подсеточных» физических процессов, рельефу местности, наличию температурной инверсии, шероховатости поверхности и др. (Hjelmfelt, 1990; Theeuwes et al., 2010).

В данной работе анализируются механизмы формирования сильных осадков на основе данных наблюдений и численного моделирования с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting) на примере нескольких наиболее ярких эпизодов, отмеченных в XXI веке.

Данные и методы

Каспийское побережье Ирана достаточно хорошо обеспечено данными метеорологических измерений (рис. 1б) – всего здесь насчитывается 24 действующих метеорологических станций, некоторые из которых являются аэрологическими. Были отобраны станции с наиболее длинными рядами измерений осадков (с суточным разрешением), для того, чтобы выполненный простейший статистический анализ был более или менее корректным.

Также по регионам, отмеченным на рис. 1б (западный и восточный) с начала 21 века были выбраны эпизоды наиболее сильных осадков (когда хотя бы на одной из станций в пределах побережья суточная сумма осадков превышала 50 мм). Всего было выбрано 8 таких эпизодов: 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 рассматриваемых случаях осадки на прибрежных станциях выпадали преимущественно в виде дождя, в горах – в основном в виде мокрого снега и снега.

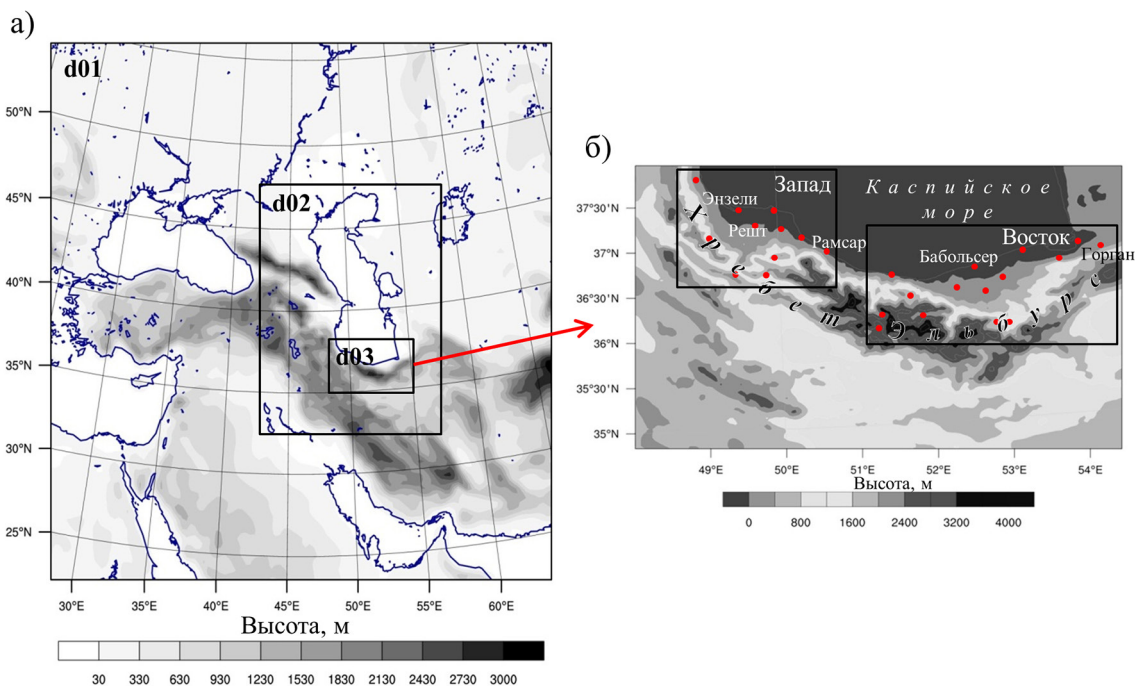


Рис. 1. Расчетные области модели WRF-ARW – а и исследуемый регион – б; красными точками показаны метеорологические станции.

По выбранным 8 эпизодам был выполнен анализ синоптической ситуации на основе данных приземных и аэрологических наблюдений, которые визуализировались в системе ГИС Метео, разработанной сотрудниками НПЦ «Мэп Мейкер» (<https://mapmakers.ru/index.html#section-contact>). Дополнительно для анализа полей облачности привлекались данные спутника Terra/MODIS (изображения в видимом диапазоне) с пространственным разрешением 5 км, доступные на сайте <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.

В целях изучения вклада орографического фактора и «озерного эффекта» в формирование полей сильных осадков на каспийском побережье Ирана были выполнены численные эксперименты с моделью WRF-ARW (Advanced Research WRF). Следует отметить, что модель зарекомендовала себя хорошо. Например, в (Азади и др., 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 (то есть в случае Ирана на побережье Каспийского моря) (Азади и др., 2013) и при моделировании сильных осадков (Азади и др., 2013; Вельтищев и др., 2011; Павлюков и др., 2017; Knebl, Yang, 2008; Theeuwes et al., 2010; Schumacher, Johnson, 2008; Yu, 2013). Внешняя расчетная область d01, разрешение которой составляет 30 км, охватывает обширную область вокруг Каспийского моря (рис. 1а). В нее вложены две «дочер-

ние» области d02 и d03 с более высоким пространственным разрешением – 10 и 3.3 км, соответственно (рис. 1а). Модель стартует от полей анализа (FNL) глобальной модели GFS с разрешением 1°. На основе анализа литературы, а также проведенных нами специальных тестовых экспериментов, был выбран следующий набор параметризаций физических процессов для моделирования осадков на иранском побережье: параметризация пограничного слоя Mellor-Yamada-Niino Nakanishi 2.5, параметризация микрофизики облаков Lin, параметризация конвекции Kain-Fritsch во внешней области, схема Rapid Radiative Transfer Model для длинноволновой радиации и схема Dudhia для коротковолновой радиации. Модель была верифицирована по данным стационарных наблюдений для всех 8 эпизодов, среднее для всех эпизодов отклонение модельных осадков от наблюдаемых составляет –1.0 мм для горных станций, –3.5 мм для равнинных станций и –5.5 мм для прибрежных станций.

Для одного из эпизодов (8 февраля 2016), характеризующего довольно типичной синоптической ситуацией, кроме контрольного, то есть реалистичного эксперимента (CTRL), были проведены следующие эксперименты на чувствительность осадков к озерному эффекту и рельефу. Первый эксперимент NoRelief был направлен на выявление количественного вклада рельефа в формирование осадков в регионе. В этом эксперименте высота рельефа задавалась равной нулю во всех трех расчетных областях, то есть был удален не только хребет Эльбурс, но и другие хребты, в том числе Кавказ, Малая Азия, Иранское нагорье. Это было сделано для того, чтобы при переходе из одной расчетной области в другую не возникало резких скачков в метеорологических величинах, которые могли бы привести к неустойчивости численных схем. Второй эксперимент LowSST заключался в искусственном изменении температуры поверхности Каспийского моря. Температура задавалась аномально низкой и постоянной по всему морю, равной +4°C. Для южной части моря это на 6 градусов ниже средней зимней температуры поверхности и на 10 градусов ниже реально наблюдавшейся ТПО. Этот эксперимент показывает, насколько изменится количество осадков при уменьшении потоков тепла и влаги (за счет уменьшения ТПО) с озера, то есть величину озерного эффекта. Наконец, для того, чтобы оценить суммарный вклад рельефа и озера в формирование осадков на южном побережье Каспия был проведен эксперимент NoRel_LowSST, в котором отсутствовал рельеф, как и в эксперименте NoRelief, а ТПО задавалась такой же, как в эксперименте LowSST. Еще два эксперимента были направлены на выявление роли озерного эффекта при повышенной температуре Каспийского моря, которая прогнозируется климатическими моделями в рамках проекта CMIP5 к концу XXI века по самому «мягкому» и самому «жесткому» климатическим сценариям – эксперимент SST+1 с ТПО Каспийского моря на 1 градус выше, чем в контрольном эксперименте, и SST+4 с ТПО на 4 градуса выше (то есть около +18°C на юге моря и +4°C на севере), чем в контрольном эксперименте.

Повторяемость сильных осадков и их синоптические механизмы

Каспийское побережье Ирана характеризуется в целом избыточным увлажнением: годовая сумма осадков меняется здесь от 2500–3000 мм в год в западной части побережья до 1000–1500 мм в восточной (Javanmard et al., 2010). Около 70% осадков в регионе выпадает в период с октября по март, причем наибольшие месячные суммы отмечаются в октябре–ноябре (до 300 мм). В эти месяцы происходит уже зимняя интенсификация средиземноморской и иранской ветвей полярного фронта, при этом влагосодержание тропических воздушных масс еще близко к летнему, а температура поверхности Каспийского моря в южной части акватории составляет 15...18°C. Сочетание этих факторов с динамическим воздействием хребтов Эльбурс и приводит к существенному увеличению как месячных сумм осадков, так и повторяемости экстремальных событий.

На рис. 2 приведены эмпирические функции распределения осадков интенсивностью более 50 мм в сутки на метеостанциях Энзели, Решт, Рамсар, Бабольсер и Горган

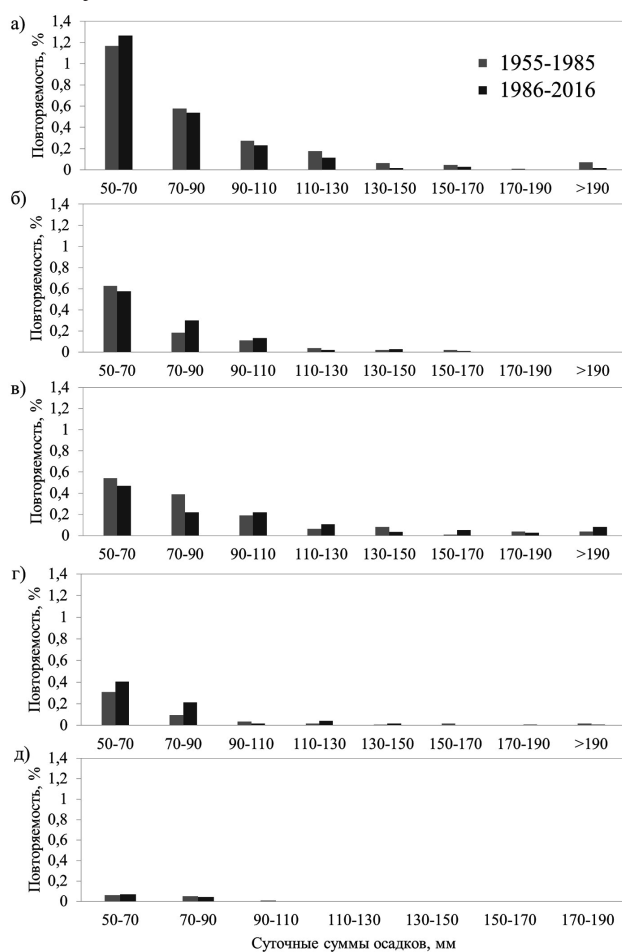


Рис. 2. Гистограммы распределения повторяемостей осадков с суточной суммой более 50 мм на Каспийском побережье Ирана для первого этапа индустриального потепления климата (светло-серые столбцы), и для современных условий (темно-серые столбцы) на станциях Энзели –а; Решт – б; Рамсар –в; Бабольсер –г; Горган – д.

ган, расположенных вблизи каспийского побережья с запада на восток, соответственно (рис. 1б). Выбор данных метеостанций обусловлен наиболее длинными рядами наблюдений (начиная с 1950-х гг.) по сравнению с другими метеостанциями. Гистограммы распределения анализировались для двух рядов. Первый (1955–1985 гг.) характеризует первый этап индустриального потепления, а второй (1986–2016 гг.) – современный. Повторяемость сильных осадков закономерно уменьшается с запада на восток (рис. 2). В целом можно отметить, что существенных изменений доли сильных осадков не произошло, хотя на отдельных станциях могут отмечаться изменения для некоторых градаций (например, двукратное увеличение доли очень сильных осадков >190 мм на станции Рамсар). Однако говорить об этом статистически строго не приходится в виду того, что эти события единичные.

Все многообразие синоптических ситуаций, приводящее к формированию сильных осадков на каспийском побережье Ирана, можно свести к отрицательной фазе индекса East Atlantic/West Russia (EA/WR) (Kutiel, 1996), которой соответствует положительная аномалия давления и геопотенциала в средней тропосфере над Европой, и отрицательной – над Каспийским регионом. При отрицательной фазе этого индекса над западной половиной Европейской территории России, как правило, развивается область высокого давления. Чаще это холодное низкотропосферное образование скандинавского или сибирского происхождения, но может быть и отрог теплого азорского антициклона. В любом случае по восточной периферии этого вихря на акваторию Каспийского моря устремляются холодные воздушные массы, которые активизируют циклогенез на полярном фронте. Примечательно, что над Каспийским регионом в такой ситуации обычно располагаются две фронтальные системы. Одна, как правило, проявлена в виде холодного фронта, который разделяет холодную умеренно-континентальную и морскую воздушную массы. Обычно этот холодный фронт доходит до иранского побережья, то есть вся акватория моря оказывается занята холодным воздухом. Вторая фронтальная система связана с полярно-фронтальным циклоническим вихрем, сформировавшимся над Ираном или пришедшем ранее в виде циклонической волны со стороны восточного Средиземноморья. Как правило, вдоль побережья протягивается теплый фронт этой циклонической системы. На спутниковых снимках обычно хорошо идентифицируется плотная высоко-слоистая облачность, характерная именно для теплого фронта. Вероятно именно сочетание теплого фронта над севером Ирана и холодного над морем вблизи побережья и приводит к тому, что тип облачности оказывается сильно смешанным. На станциях каспийского побережья Ирана в большинстве случаев фиксируются одновременно кучево-дождевые и слоисто-дождевые (или плотные высокослоистые) облака. Фронтальная природа осадков несомненна, влияние фронтов также хорошо прослеживается на картах барической топографии: хорошо виден термический поворот ветра, который в отдельных случаях может достигать 100–120 градусов. На рис. 3г на примере эпизода 8 февраля 2016 г. показано, что в нижней тропосфере наблюдаются ветра северных румбов, в то время как на уровне изобарической поверхности 500 гПа потоки юго-западные.

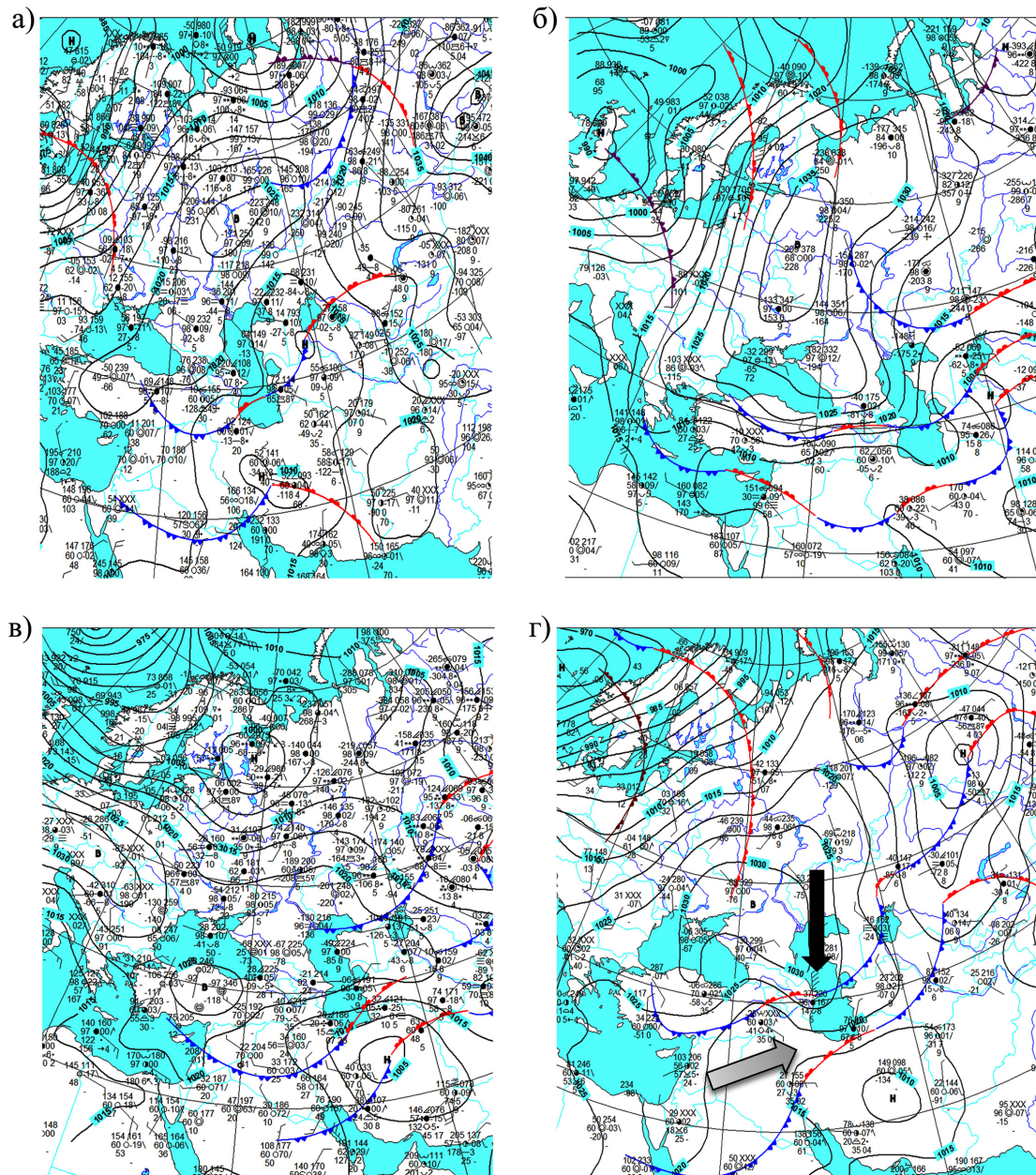


Рис. 3. Типичные синоптические ситуации, при которых на каспийском побережье Ирана выпадают сильные осадки: а – 00 ч 3 декабря 2007, б – 00 ч 25 февраля 2007, в – 00 ч 3 февраля 2011, г – 00 ч 8 февраля 2016; г – черная стрелка показывает направление потока в пограничном слое атмосферы, а серая стрелка – направление потока на уровне 500 гПа.

Роль орографии и озерного эффекта

Теперь рассмотрим влияние мезомасштабных эффектов (озера и рельефа) на сильные осадки на южном побережье Каспийского моря. В численных эксперимен-

тах с моделью WRF-ARW с идеализированным рельефом, а также с заниженной температурой Каспийского моря количество осадков значительно ниже, чем в контрольном эксперименте (в среднем почти в 2 раза, табл.1).

Таблица 1. Суточные суммы осадков в разных областях иранского побережья Каспийского моря по данным разных экспериментов

Эксперимент	Суточная сумма осадков по областям			Среднее по всем областям
	Запад	Центр	Восток	
CTRL	33,1	31,7	25,5	30,1
NoRelief	25	16,3	5,5	15,6
LowSST	18,4	15	12,7	15,4
NoRel_LowSST	23,3	16,5	5,7	15,2

Рис. 4 наглядно демонстрирует влияние различных факторов на поле осадков. Отсутствие рельефа кроме общего уменьшения количества осадков приводит к перераспределению полей осадков по территории. Поля становятся более сглаженными, изогеты вытянуты вдоль линии атмосферного фронта, а не вдоль северных склонов гор, как в контрольном эксперименте. В результате на востоке побережья осадков практически нет, количество осадков там сократилось на 80% по сравнению с реалистичным экспериментом. Интересно, что результаты эксперимента NoRelief и NoRel_LowSST практически не отличаются друг от друга (табл. 1), на западе и в центре побережья в эксперименте NoRel_LowSST осадков меньше, чем в эксперименте NoRelief всего на 1–2 мм, а в центре и на востоке разница не превышает 0.2 мм. Это означает, что при отсутствии рельефа озерный эффект Каспийского моря практически не заметен. Осадки в эксперименте без рельефа и озерного эффекта возникают исключительно за счет процессов синоптического масштаба, то есть на атмосферном фронте. Если усреднить суточные суммы осадков по всем трем областям, то около 48% выпавших осадков объясняются процессами синоптического масштаба (средняя суточная сумма осадков на побережье составляет 15.2 мм в эксперименте NoRel_LowSST, в контрольном эксперименте – 30.1 мм), а остальные 52% – влиянием рельефа и Каспийского моря. Причем «озерный эффект» зависит от конфигурации рельефа – при отсутствии гор его вклад в формировании осадков на побережье очень мал (в среднем по побережью около 3%, на западе побережья до 7%), а при наличии гор увеличивается до 50%. Также и вклад рельефа зависит от «озерного эффекта»: если задается холодное озеро, то влияние рельефа на количество осадков сильно варьирует и выражается в сильном увеличении осадков на востоке области, но также в уменьшении количества осадков на западе (поэтому в среднем по всем областям эффект рельефа составляет 1%), а при наличии теплого Каспийского моря рельеф инициирует увеличение осадков повсеместно, в среднем на 48%.

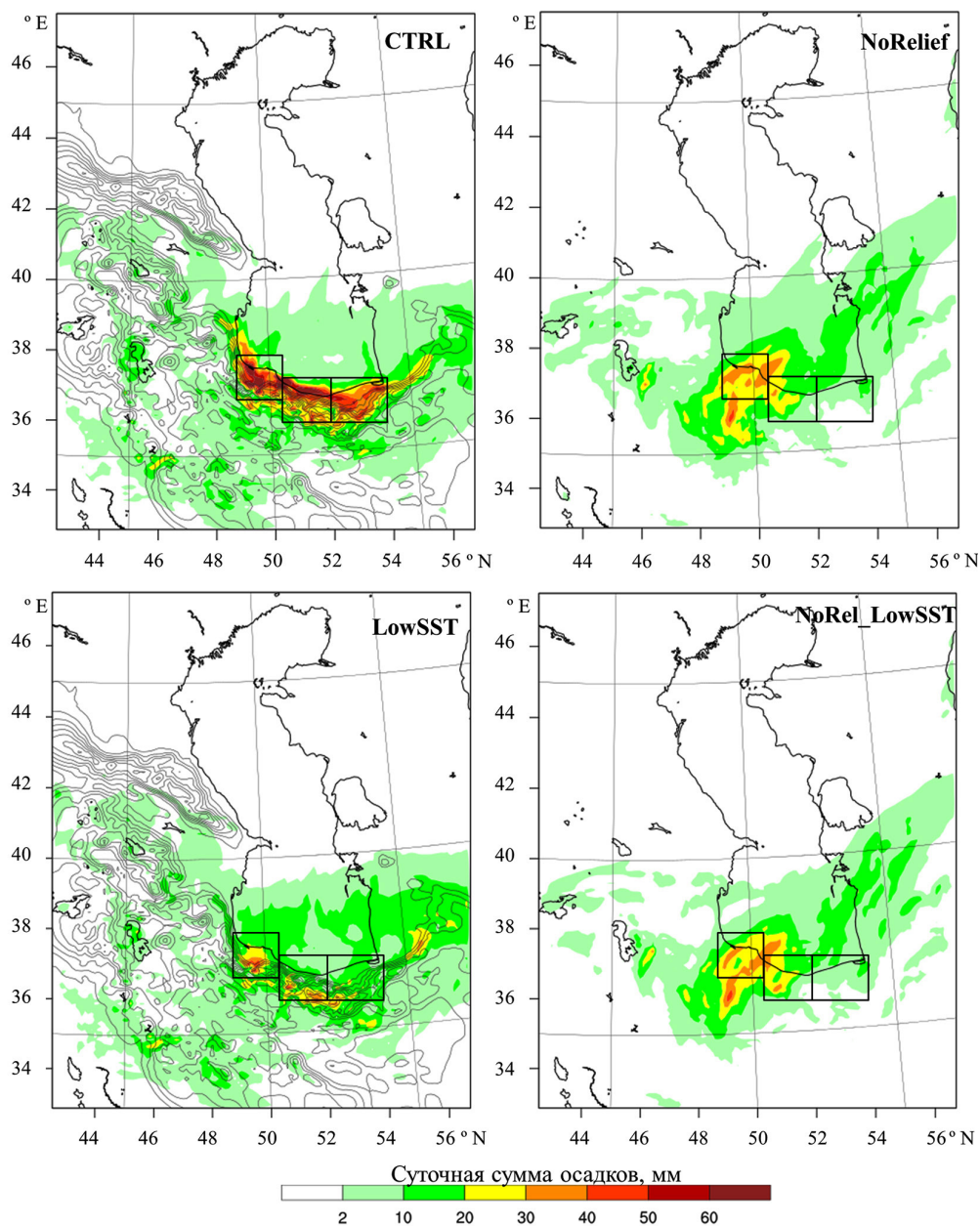


Рис. 4. Суточная сумма осадков (цветом, мм) за 8 февраля 2016 г. по результатам контрольного CTRL и идеализированных экспериментов (см. пояснения в тексте) в расчетной области d02. Изолиниями показана высота рельефа.

В экспериментах с повышенной температурой Каспийского моря среднее количество осадков по всей области увеличилось на 2.9 мм в эксперименте SST+1 (что составляет 10% от количества осадков в контрольном эксперименте) и на 11.5 мм (то есть на 37 %) в эксперименте SST+4. Наименьшие отклонения осадков в этих идеализированных экспериментах отмечаются в восточной части побережья. В эксперименте SST+4 на западном и центральном побережье количество осадков увеличилось значительно больше (почти в 2 раза по сравнению с контрольным экспериментом), чем на востоке побережья. Среднее количество осадков за сутки на

западе побережья достигло почти 49 мм, а максимальное – 180 мм, что на 20 мм больше, чем в контрольном эксперименте (рис. 5). Интересно, что прирост осадков в идеализированных экспериментах происходит преимущественно за счет увеличения доли сильных осадков (более 50 мм) и уменьшения доли слабых осадков (менее 10 мм). Доля умеренных осадков в общем распределении меняется не столь значительно.

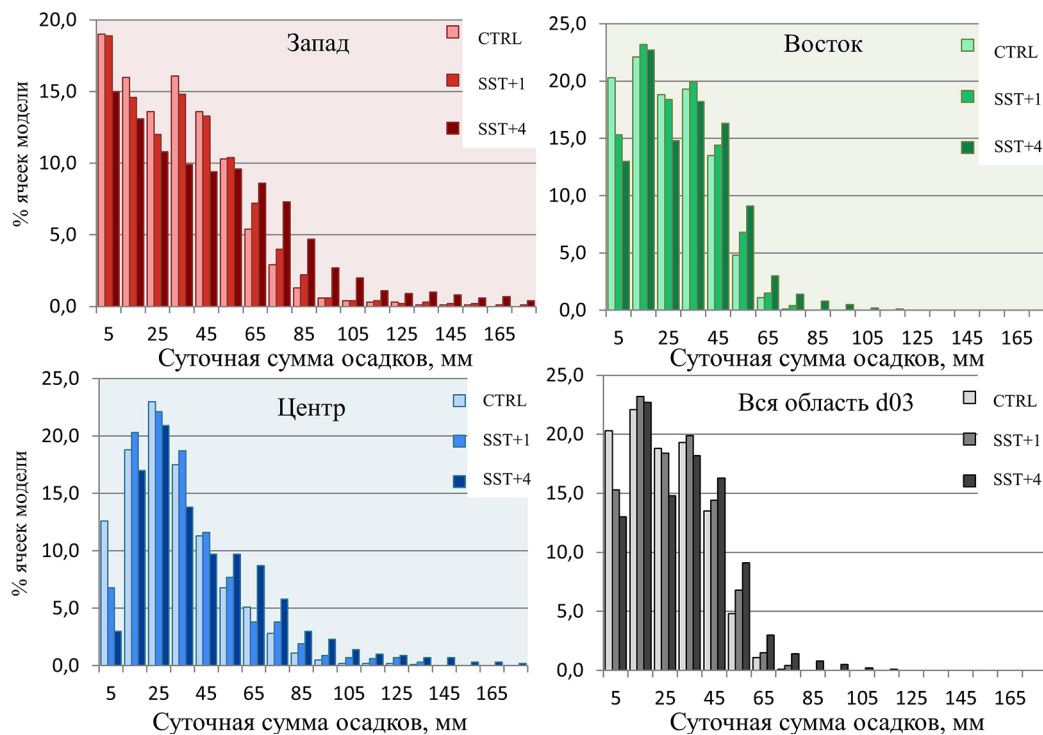


Рис. 5. Процент ячеек модели, занятых осадками (суточными суммами) различных категорий (от 0 до 175 мм с шагом 10 мм) для разных экспериментов (CTRL, SST+1 и SST+4) для областей на западе, в центре и на востоке побережья и для всей внутренней области моделирования d03 (см. рис. 1).

Заключение

В работе проведен статистический анализ и численное моделирование отдельных эпизодов зимних сильных осадков на иранском побережье Каспийского моря.

Краткий анализ данных наблюдений за осадками в регионе показал, что суточная сумма осадков более 50 мм отмечается довольно часто (их повторяемость составляет около 1–2.5% на западе побережья и 0.1–0.5% на востоке). Значительных изменений доли сильных осадков в 1986–2016 гг. по сравнению с 1955–1985 гг. не произошло.

Выделенные эпизоды наиболее сильных осадков в XXI веке обусловлены, в первую очередь процессами синоптического масштаба. Для всех эпизодов характерно наличие атмосферных фронтов в непосредственной близости от района исследования, которые и являются первичной причиной выпадения осадков. Однако,

как показали численные эксперименты с мезомасштабной моделью WRF–ARW, только лишь синоптический фактор не приводит к возникновению сильных осадков. Максимальные суточные суммы фронтальных осадков в моделируемом эпизоде достигали 40–45 мм. В большинстве эпизодов наличие области высокого давления к северо-западу от района исследования приводит к формированию холодного северного ветра над Каспийским морем, что является предпосылкой для возникновения озерного эффекта (который ярко проявляется при большом контрасте температуры воды и воздуха).

Именно наличие теплого Каспийского моря при преобладающем северном ветре над морем в сочетании с конвергенцией влаги на северных склонах хребта Эльбурс приводит к резкой интенсификации фронта и сильным осадкам на всем южном побережье Каспия. Совместный вклад озерного эффекта и рельефа составляет в среднем 50%, а на востоке побережья – до 80%. Таким образом, синоптические процессы обуславливают только половину из выпавших на побережье осадков, а на востоке их вклад еще меньше (20%). При увеличении ТПО Каспийского моря до значений, которые прогнозируются моделями CMIP5 в будущем климате, наибольшее увеличение осадков происходит в центральной и западной частях побережья, причем именно в градации сильных осадков (более 50 мм/сут).

Литература

- Азади М., Тагизаде Э., Мемариан М.Х., Дмитриева-Арраго 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., Петросяцц М.А. и др.* Синоптические процессы Средней Азии. Ташкент: Изд-во 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.
- 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., Xie L.* Simulated physical mechanisms associated with climate variability over lake Victoria basin in East Afric // *Mon.Wea.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. No. 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. No. 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. No. 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. No. 3–4. P. 809–827.
- Hjelmfelt M.* Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over lake Michigan // *Mon. Wea. 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. No. 9. P. 1831–1844.
- Javanmard S., Yatagai A., Nodzu M.I., BodaghJamali J., Kawamoto H.* Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran // *Adv. Geosci.* 2010. Vol. 25. P. 119–125.
- 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. No. 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.
- Kutiel H., Maheras P., Guika S.* Circulation indices over the Mediterranean and Europe and their relationship with rainfall conditions across the Mediterranean // *Theoretical and Applied Climatology.* 1996. Vol. 54. No. 3–4. P. 125–138.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience.* 2015. Vol. 8. No. 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. No. 1. P. 117–132.
- Schumacher R.S. and Johnson R.H.* Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 3964–3986.
- Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Krikken F., and 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.
- Yu E.T.* High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China // *Chinese Science Bulletin.* 2013. Vol. 58. No. 12. P. 1412–1419.

HEAVY PRECIPITATION ON THE IRANIAN COAST OF THE CASPIAN SEA

Toropov P.A.¹, Shestakova A.A.², Kislov A.V.¹, Oji R.³

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tormet@inbox.ru*

² *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, 119017, Russia, -mail: shestakova@ifaran.ru*

³ *University of Guilan, Guilan, Iran e-mail: ruhollah.oji@gmail.com*

Submitted 01.02.2019, accepted 06.12.2019.

The main goal of this research is to determine the genesis of heavy precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea, to quantify the contribution of various factors to the formation of such precipitation. An analysis of synoptic fields, satellite data and the results of numerical mesoscale modeling showed that the nature of heavy precipitation in the studied region is substantially mixed. The primary cause of precipitation is synoptic processes, most often

the activation of cyclogenesis on the polar front under the condition of the invasion of cold air. However, the contribution of the “lake effect” (which is expressed in large values of heat and moisture fluxes from the Caspian Sea surface) and orography (which initiates the convergence of moisture on the windward side of the Elborz Mountains) is large and in average is about 50%. With an increase in the temperature of the surface of the Caspian Sea, which is possible in the climatic conditions of the future, percentage of heavy precipitations increases first.

Key words: mesoscale modelling, extreme precipitation, Caspian Sea

References

- Azadi M., Tagizade E.H., Memarian M.H., and Dmitrieva-Arrago L.R. Sravnenie rezul'tatov prognoza osadkov na osnove mezomasshtabnyh modelej na territorii Irana v holodnyj period goda (Comparison of precipitation forecast results based on mesoscale models in Iran during the cold season). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, No. 9, pp. 31–42.
- Bugaev V.A., Dzhordzhio V.A., Kozik E.M., Petrosyanc M.A., et al. Sinopticheskie processy Srednej Azii (Synoptic processes in Central Asia), Tashkent: Izd-vo AN UzSSR, 1957, 477 p.
- Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., and Pavlyukov Yu.B. Kratkosrochnyj prognoz sil'nyh osadkov i vetra s pomoshch'yu razreshayushchih konvekciju modelej WRF (Short-term forecast of heavy precipitation and wind using convection-resolving WRF models). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, No. 1, pp. 5–18.
- Pavlyukov Yu.B., Zaripov R.B., Luk'yanov A.N., Shestakova A.A., Shumilin A.A., and Travov A.V. Ocenka informativnosti radiolokacionnyh dannyh pri analize sostoyaniya atmosfery v Moskovskom regione (Evaluation of the informativeness of radar data when analyzing the state of the atmosphere in the Moscow region). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, No. 6, pp. 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 Afric. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, Vol. 134, pp. 3588–3609.
- Cohen A.E., Cavallo S.M., Coniglio M.C., and 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, No. 3, pp. 591–612.
- Ghafarian P., Pegahfar N., and Ovlad E. Multiscale analysis of lake-effect snow over the southwest coast of the Caspian Sea (31 January–5 February 2014). *Weather*, 2018, Vol. 73, No. 1, pp. 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, No. 2, pp. 116–133.
- Gilmore J.B., Evans J.P., Sherwood S.C., Ekström M., and Ji F. Extreme precipitation in WRF during the Newcastle East Coast Low of 2007. *Theoretical and applied climatology*, 2016, Vol. 125, No. 3–4, pp. 809–827.
- Hjelmfelt M. Numerical study of the influence of environmental conditions on lake-effect snowstorms over lake Michigan. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, Vol. 118, pp. 138–150
- Hu X.M., Nielsen-Gammon J.W., and Zhang F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, Vol. 49, No. 9, pp. 1831–1844.
- Javanmard S., Yatagai A., Nodzu M.I., BodaghJamali J., and Kawamoto H. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. *Adv. Geosci.*, 2010, Vol. 25, pp. 119–125.

- Khoshakhlagh F., Farid M.N., Negah S., Momenpour F., Hadinezhad S.S., and 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, No. 53, pp. 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, pp. 1102–1126.
- Kutiel H., Maheras P., and Guika S.* Circulation indices over the Mediterranean and Europe and their relationship with rainfall conditions across the Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, Vol. 54, No. 3–4, pp. 125–138.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., and Chernokulsky A.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, No. 8, pp. 615–629.
- Molanejad M., Soltani M., Ranjbar SaadatAbadi A., Babu C.A., Sohrabi M., and Martin M.V.* Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea. *International Journal of Environmental Research*, 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 117–132.
- Schumacher R.S. and Johnson R.H.* Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, Vol. 136, pp. 3964–3986.
- Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Krikken F., and 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, pp. 15–22.
- Yu E.T.* High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, Vol. 58, No. 12, pp. 1412–1419.