

Особенности летних и зимних осадков в северной части Черноморского региона на примере данных численного моделирования

В. В. Ефимов [✉], А. Е. Анисимов, О. И. Комаровская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

[✉] vefim38@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021 г., после доработки – 29.07.2021 г.

Цель. Воспроизвести с помощью модели WRF-ARW процессы развития облачности и осадкообразования, выделить особенности осадков для Черноморского региона и Крыма в летний и зимний сезоны – цель данной работы.

Методы и результаты. Рассмотрены результаты численного моделирования и приведены сравнительные характеристики летних и зимних атмосферных осадков в Крыму. На примере развития конвективной активности в июле 2018 г. показаны суточная динамика и связанные с бризовой циркуляцией особенности распределения конвективных облаков над территорией Крыма. Выполнен анализ баланса влаги и приведены количественные оценки механизма осадкообразования в летний период. На примере моделирования выпадения осадков в декабре 2018 г., произошедшего в условиях прохождения холодного фронта на периферии циклонического образования, отмечена особенность механизма осадкообразования в зимнее время, связанная с адвективным переносом влаги. Также рассмотрено формирование интенсивных осадков в зимний и летний сезоны в области Крымских гор.

Выводы. Характерной особенностью осадков в летний период является их суточная периодичность и внутренний влагооборот. Влияние бризов приводит к локализации конвективной облачности и осадков в центральных областях полуострова. Вид зимней облачности, формирующей осадки в Крыму, – преимущественно слоисто-дождевые облака, локализация осадков зависит от направления воздушных потоков: внешний влагооборот является определяющим в зимнее время. Область наиболее высоких гор относится к зоне максимального выпадения осадков в оба периода года и играет важнейшую роль в суммарном балансе влаги в Крыму.

Ключевые слова: WRF, осадки, влияние бризовой циркуляции, конвективная активность, влагосодержание, адвективный перенос, летние и зимние осадки в горах

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920017 «Количественные оценки осадков в Юго-Западном Крыму и Севастополе на базе численного моделирования и радиолокационных наблюдений», а также в рамках государственного задания по теме № 0827-2021-0002 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Ефимов В. В., Анисимов А. Е., Комаровская О. И. Особенности летних и зимних осадков в северной части Черноморского региона на примере данных численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 727–741. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-727-741

Features of Summer and Winter Precipitation in the Northern Part of the Black Sea Region: Two Model Case Studies

V. V. Efimov , A. E. Anisimov, O. I. Komarovskaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 vefim38@mail.ru

Purpose. The purpose of the study is to reproduce the evolution of clouds and precipitation and to evaluate the summer and winter precipitation features in the Black Sea region and Crimea using the WRF-ARW model.

Methods and Results. The results of numerical simulations of the summer and winter atmospheric precipitation in Crimea, and the corresponding comparative characteristics are presented. Based on the example of the convection case in July 2018, shown are the convective activity diurnal dynamics and its spatial features induced by the breeze circulation over Crimea. Moisture balance analysis was performed, and quantitative estimates of the summer precipitation formation mechanism are given. The case study of precipitation caused by the cyclone and the associated cold front passage, in December 2018 highlights the feature of the winter precipitation formation mechanism that is driven by moisture advection. The formation of intense winter and summer precipitation in the Crimean Mountains was also considered.

Conclusions. The characteristic feature of summer precipitation is its diurnal periodicity and internal moisture cycle. The impact of breezes leads to the localization of convective clouds and precipitation in the central regions of the peninsula. The winter precipitation-forming cloudiness in Crimea consists predominantly of stratiform clouds; the precipitation patterns are conditioned by the large-scale circulation: the external moisture cycle is of a decisive character in winter. The high-altitude mountain areas are the zones of maximum precipitation in both seasons; they play an important role in the total moisture balance in Crimea.

Keywords: WRF, precipitation, influence of breeze circulation, convective activity, moisture content, advective transport, summer and winter precipitation in mountains

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of research project No. 20-45-920017 “Quantitative estimates of precipitation in Southwestern Crimea and Sevastopol based on numerical modeling and radar observations” (financially supported by RFBR and the Sevastopol municipality) and state task No. 0827-2021-0002 “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”.

For citation: Efimov, V.V., Anisimov, A.E. and Komarovskaya, O.I., 2021. Features of Summer and Winter Precipitation in the Northern Part of the Black Sea Region: Two Model Case Studies. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(6), pp. 677-690. doi:10.22449/1573-160X-2021-6-677-690

Введение

Северная часть Черноморского региона относится к области с умеренным климатом и относительно небольшими годовыми суммами осадков. Так, по измерениям в центральной части Крымского п-ова на ГМС Симферополя, годовые суммы осадков составляют ~ 500 мм. Климат большей части территории Крыма полусухой степной. Также для него характерна значительная пространственная изменчивость, обусловленная близостью к морю и наличием гор [1–3]. В прибрежных областях на формирование осадков оказывают влияние эффекты бризовой циркуляции, приводящие, в частности, к заметному уменьшению осадков в теплый период года. Например, летние июльские осадки в Севастополе в среднем составляют 27 мм, в то время как в Симферополе – 43 мм, что почти в 2 раза выше.

Физический механизм влияния гряды Крымских гор на формирование субтропического климата в узкой прибрежной полосе Южного берега Крыма описан в работе [4]. Отдельного рассмотрения требуют высокогорные районы, где формируются бризы, фены и другие типы горных ветров, также определяющих субмезомасштабные особенности атмосферной циркуляции и локальные неоднородности выпадения осадков [5].

Статистические характеристики режима осадков в Крыму, такие как повторяемость экстремальных осадков, повторяемость засушливых и влажных периодов, а также климатические тренды этих величин к настоящему времени изучены явно недостаточно * [6]. В первую очередь это связано с малочисленностью и неполнотой данных измерений осадков в Крыму. В настоящее время формируется массив новых спутниковых данных, что в сочетании с возможностями современных численных моделей реанализа региональной метеорологической информации может существенно расширить необходимую базу данных по осадкам [7].

С практической точки зрения важнейшей особенностью является частота выпадения экстремальных осадков, которые определяются по значению 99-го перцентиля функции плотности распределения * [6] и вызывают значительные экономические последствия (затопления на местности, разрушение мостов и т. п.). Важно отметить одну особенность экстремальных осадков в Крыму: они случаются, как правило, в летне-осенний теплый период года.

Действительно, интенсивность осадков в июне и декабре – в месяцы максимальных осадков в годовом цикле – значительно различается. Так, достаточно грубые оценки интенсивности (определяемой как количество осадков, деленное на время их выпадения) по измерениям на ГМС Симферополя за период 2005–2020 гг. составляли для июня 1 мм/ч, для декабря существенно меньше – 0,49 мм/ч [7].

В теплый сезон года, с мая по сентябрь, типичными в Крыму являются конвективные осадки с максимальной повторяемостью в июне. К настоящему времени достаточно хорошо изучены физические механизмы развития конвективной облачности и микрофизические процессы формирования жидких и твердых фазовых составляющих облачности и осадков. Исследованы особенности развития в отдельных регионах земного шара конвективных структур, таких как тропические ураганы, мезомасштабные субтропические ураганы или полярные циклоны.

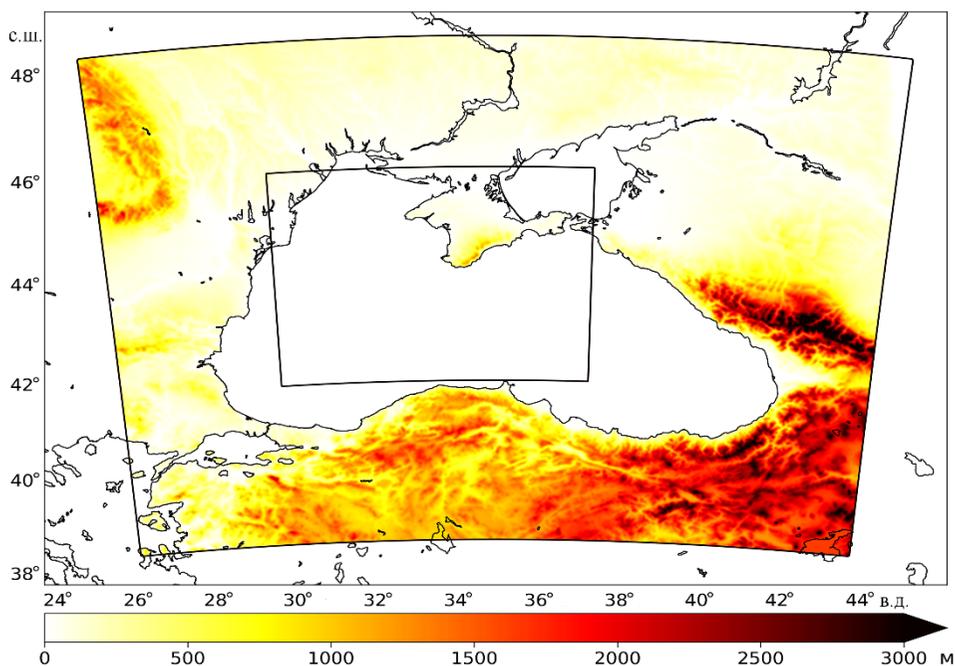
Отметим, что отдельные важные особенности формирования конвективной облачности зависят от региональных характеристик – рельефа, наличия гор, близости к крупным водным бассейнам и др. В этом отношении безусловный интерес представляет Черноморский бассейн, где сезонный ход конвективной облачности над морем контролируется его термическим режимом, а над Крымом – обуславливается близостью моря. Кроме того, наличие достаточно высоких гор определяет мезомасштабную неоднородность облачности и осадков над южной частью полуострова. Важно также отметить, что эти особенности существенно зависят от сезона.

* Золина О. Г. Статистическое моделирование экстремальных осадков и региональный атмосферный цикл влаги : Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. М., 2018. 57 с.

С целью воспроизвести с помощью модели *WRF-ARW* процессы развития облачности и осадкообразования, а также выделить особенности осадков для Черноморского региона и Крыма в летний и зимний сезоны рассмотрим результаты численного моделирования двух типичных случаев выпадения сильных осадков, 13–15 июля и 11–12 декабря 2018 г. Как будет показано, осадки по величине в эти дни были в целом сравнимы, но характер и физические особенности их формирования существенно различались между собой.

Численная модель

Использовалась известная численная модель атмосферной циркуляции *WRF-ARW* версии 4.0.1 [8], параметры которой были выбраны для проведения счета в Черноморском регионе с необходимыми настройками параметризаций физических процессов (в первую очередь, параметризации конвективного атмосферного пограничного слоя (АПС)). На рис. 1 показано расположение доменов с разрешением 900 и 2700 м. Модель достаточно хорошо известна, поэтому отметим лишь основные настроечные параметры.



Р и с. 1. Расположение доменов для расчета и высота над уровнем моря (м)

Fig. 1. *WRF* model domains and terrain elevation (m)

По вертикали были заданы 39 неравномерно расположенных по высоте гибридных уровней с увеличенным разрешением в планетарном пограничном слое. Выбор схем параметризации подсеточных процессов соответствовал конфигурации *NCAR convection-permitting suite*. Эта конфигурация *WRF* активно тестировалась и верифицировалась в ходе множества исследовательских и прикладных экспериментов [9, 10], она используется в оперативном режиме

для прогноза погоды на территории континентальной части США [11]. В первую очередь конфигурация предназначена для расчетов в конвективно-разрешающем режиме, когда модельный шаг по пространству меньше 4–5 км и схема параметризации конвекции не используется, что соответствует нашей задаче. Достичь конвективно-разрешающего шага по пространству уже в первом модельном домене позволило использование входных данных модели *Integrated Forecasting System (IFS)* [12] из полей оперативного анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) с разрешением 9×9 км, которые обновлялись каждые 6 ч. После адаптации модели к заданным начальным условиям развитие атмосферных процессов во всех доменах определялось лишь периодически обновляющимися входными данными, задающими граничные условия на внешнем домене.

Единственное отличие выбранной нами конфигурации от *NCAR convection-permitting suite* состоит в выборе схемы параметризации облачных микрофизических процессов и осадкообразования. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что используемая по умолчанию схема *Thompson* [13] может существенно завышать воспроизводимую массу гидрометеоров (и, соответственно, радиолокационную отражаемость), при этом недооцениваются осадки (что отмечалось также в других работах, напр., в [14]). Лучшие результаты были получены с использованием двухмоментной схемы параметризации *Milbrandt* [15, 16], в которой как суммарная концентрация, так и число частиц гидрометеоров являются прогностическими переменными. Схема *Thompson* частично-двухмоментная. Для расчета переноса коротковолновой и длинноволновой радиации использовалась схема *Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG)* [17], для параметризации процессов турбулентного перемешивания в пограничном слое – схема *Mellor – Yamada – Janjic* [18], для описания процессов теплообмена в верхнем слое почвы [19] – схема *Noah LSM*.

Характеристики летних осадков

Был смоделирован случай выпадения осадков 13–15 июля 2018 г., когда над большей частью Крыма прошли достаточно сильные для этого региона дожди – выпало до 50 мм в сутки. Синоптическая ситуация над Крымом характеризовалась барическим полем без больших градиентов, ветром преимущественно северо-западного направления со скоростью до 10 м/с, дневной температурой 30–32°C. На рис. 2 показано распределение суточных сумм осадков над Крымом за 13 июля 2018 г. по данным моделирования и наблюдений на 21 метеостанции.

Характерной особенностью распределения осадков является их концентрация в срединной области Крыма. В прибрежных северо-западной и юго-западной частях полуострова на расстоянии до ~ 50 км от берега осадков не наблюдалось. Основная причина такого распределения – бризовая циркуляция, препятствовавшая возникновению конвективных облаков в этой зоне, на которую распространился относительно холодный воздух с моря [5]. Эта особенность характерна для всех случаев конвективных осадков в теплый сезон года в Крыму, хотя в данном примере некоторое влияние оказывал и фоновый северо-западный ветер, скорости которого в утренние часы были невелики – не более 5 м/с. Воспроизведенные осадки хорошо соответствуют

измеренным на метеостанциях: видно, что так же, как и по результатам моделирования, максимальные осадки фиксировались на станциях в степной северной части Крыма, а также в горах. Область максимальных сумм осадков не отражена в данных наблюдений ввиду отсутствия метеостанций в этой малонаселенной части полуострова.

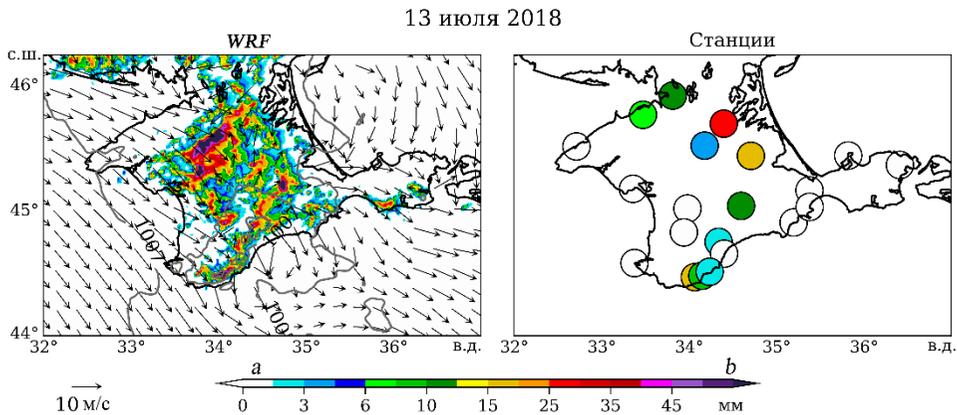


Рис. 2. Распределение накопленных сумм осадков над Крымом на 15:00 13 июля 2018 г. (цвет), векторы скорости ветра на высоте 10 м (стрелки), поле приводного давления (изолинии серого цвета) по данным *WRF* (a) и суточные суммы осадков по данным метеостанций (b)

Fig. 2. Accumulated precipitation over Crimea at 15:00 on July 13, 2018 (color), 10 m wind velocity vectors (arrows), sea level pressure field (grey isolines) based on the *WRF* data (a) and precipitation daily totals based on the weather stations data (b)

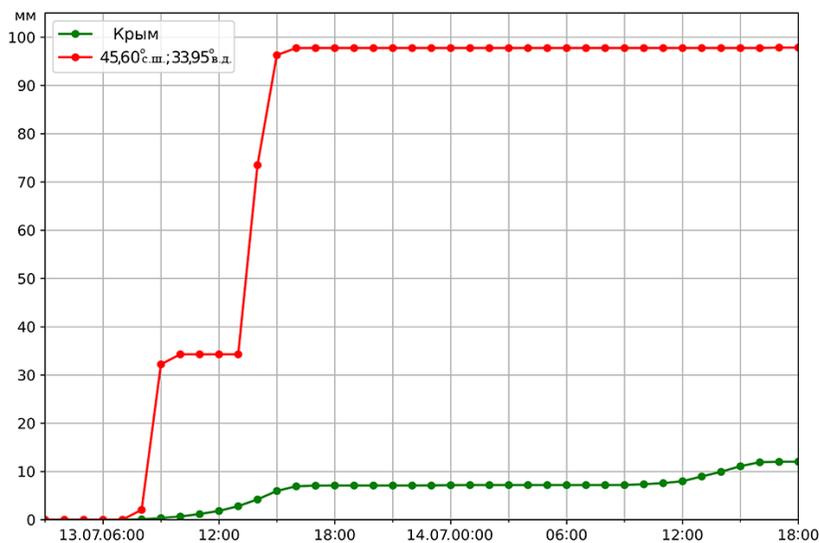


Рис. 3. Суточный ход накопленных сумм осадков для точки с координатами 45,6 °с. ш.; 33,95 °в. д. и осредненных для всей территории Крыма за период 06:00 13 июля – 12:00 14 июля 2018 г.

Fig. 3. Time series of the accumulated precipitation at 45.6 °N, 33.95 °E and those averaged for the entire territory of Crimea for July, 13 (06:00) – July, 14, 2018 (12:00)

Суточная изменчивость дождя показана на рис. 3. Как видно, ход осадков в отдельной точке характеризует относительную непродолжительность этого, хотя и достаточно сильного, дождя. При этом осредненные по площади осадки также выпадали в относительно короткие промежутки, с 14:00 до 17:00 по местному времени, что соответствует периоду максимального прогрева АПС и максимального развития глубокой конвективной облачности.

Отметим также, что ближе к берегу количество осадков было невелико, ~ 10–20 мм, лишь в центральной части оно составляло 40–100 мм (рис. 3). Здесь структура облачности и осадков имела все признаки кучево-дождевых конвективных облаков вертикального развития. Пример вертикальной структуры такого облака, развившегося в точке с координатами 45,6° с. ш. и 33,95° в. д., приведен на рис. 4. Там же показаны векторы $\{u, w\}$, где u – зональная, w – вертикальная скорость. Область относительной влажности ~ 100%, соответствующая области конвективного облака, достигала высоты ~ 10 км. В центральной части облака скорости восходящего движения доходили до 10 м/с. В нижней части, в районе 33,95–34,1° в. д., на высотах до 1000 м и при относительной влажности 50–60% развивается область оседания за счет эффектов увлечения воздуха каплями дождя.

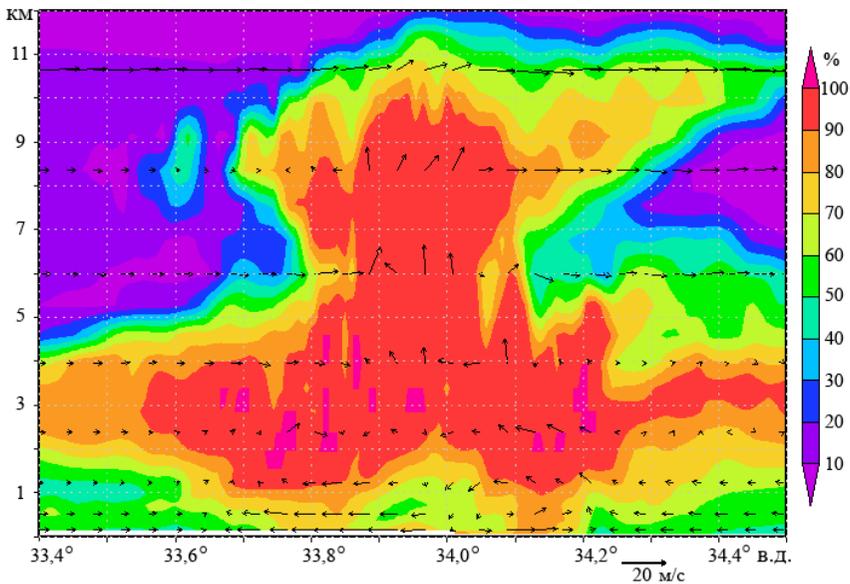
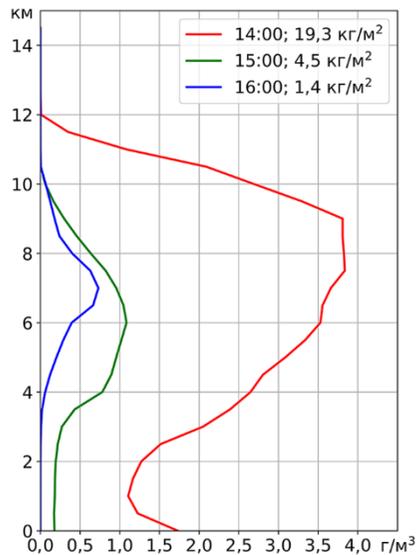


Рис. 4. Вертикальная структура относительной влажности на зональном разрезе через 45,6° с. ш. Стрелками показаны векторы скорости с компонентами $\{u, w\}$, где u – зональная, w – вертикальная скорость

Fig. 4. Relative humidity vertical structure at the zonal cross-section at 45.6°N. Arrows show the wind velocity vectors with the $\{u, w\}$ components, where u is the zonal component and w is the vertical one

Интересно оценить источник влаги в рассмотренном эпизоде выпадения сильного дождя. Для этого вернемся к рис. 3 и рассмотрим рис. 5, на котором показаны вертикальные профили суммарного влагосодержания – вес частиц (г/м^3 влажного воздуха) всех гидрометеоров (облачные капли (мелкие), дожде-

вые капли (крупные), снег, лед, град, крупа) для трех моментов времени: первый (14:00, 13 июля) соответствует середине сильного дождя, второй (15:00) близок к его окончанию, третий (16:00) приходится на время после окончания, т. е. фактически сразу после прохождения дождевого облака. Характерным является резкое уменьшение влагосодержания в воздухе, охватывающее всю область высот до 12 км (т. е. область кучевого конвективного облака), за промежуток времени второй половины выпадения дождя, вплоть до почти полного исчерпания на заключительном этапе. Оценка общей потери массы воды в расчете на единичную площадь за промежуток времени 13:00–14:00 составляет ~ 15 мм, что достаточно близко к расчетной величине осадков в этой точке (рис. 3). Безусловно, это лишь грубая оценка соответствия накопленной в атмосферном облаке влаги выпавшему конвективному дождю. Следует принимать во внимание множество неучтенных источников ошибок, в первую очередь – достаточно грубое пространственное и временное разрешение моделирования. Отметим, что осредненная по площади Крыма величина суточных осадков в рассмотренный день составляла ~ 8 мм.



Р и с. 5. Вертикальные профили суммарного влагосодержания для трех моментов времени 13 июля 2018 г.

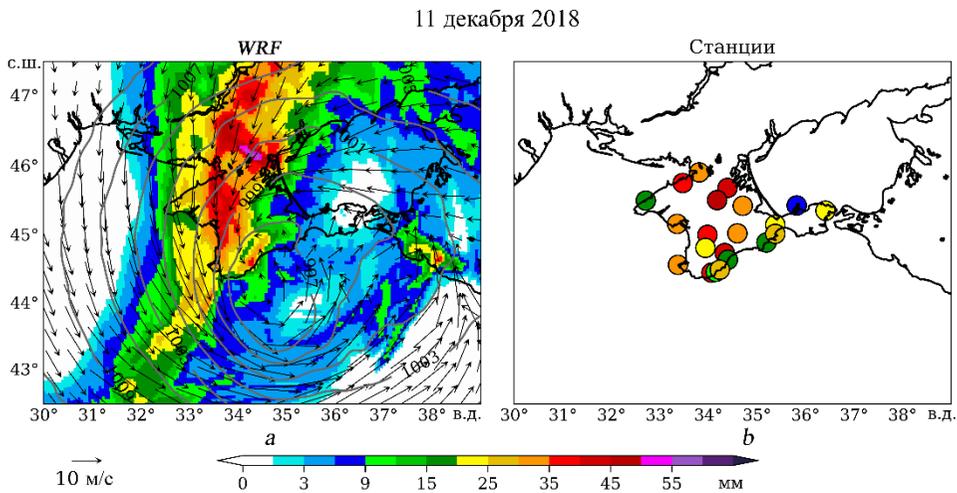
F i g. 5. Vertical profiles of the total moisture content for three time steps on July 13, 2018

Таким образом, численное моделирование позволяет достаточно хорошо воспроизводить образование облачности и летних дождей над Крымом, при этом наглядно видны характерные черты пространственного распределения осадков, контролируемых бризовой циркуляцией, в свою очередь зависящей от близости к морю, очертаний берега и прибрежной орографии [5]. В летний период преобладает внутренний влагооборот, при котором источником влаги в облаках и соответственно источником дождей является локальное испарение с поверхности Крыма.

Осадки в холодный период года

В отличие от лета зимой над Крымом типичный вид облачности – слоисто-дождевые облака. Конвективная облачность – достаточно редкое явление, которое хотя и возникает при вторжениях холодного воздуха, но имеет вид упорядоченной ячейковой или валиковой конвекции, ограниченной нижним слоем атмосферы до высот ~ 1–2 км [20] и не связанной с выпадением осадков. Обложные дожди, выпадающие из слоисто-дождевых облаков, являются основными источниками пополнения водного баланса Крымского п-ова.

На рис. 6 показаны приземные изобары, векторы скорости ветра на высоте 10 м и распределение дождевых осадков по данным *WRF* (*a*), а также суточные суммы осадков на станциях (*b*) для одного из таких случаев, 11 декабря 2018 г. Это типичный пример осадков, выпадающих в области холодного фронта на северо-западной периферии циклона с центром южнее Крыма. Спутниковые снимки облачности показывают сплошную зону облаков над всем Крымско-Черноморским регионом. Величины воспроизведенных осадков хорошо соответствуют измеренным: над большей частью полуострова выпало 30–40 мм осадков. Максимум (до 50 мм) отмечается в степной зоне. В крайних восточных и западных частях Крыма, по данным как моделирования, так и наблюдений, фиксируется сниженное количество осадков, до 20 мм.

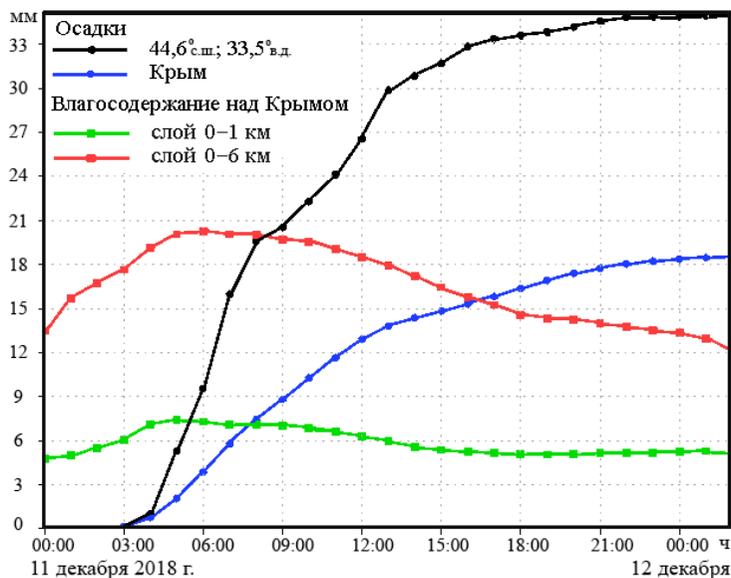


Р и с. 6. Распределение накопленных сумм осадков над Крымом на 13:00 11 декабря 2018 г. (цвет), векторы скорости ветра на высоте 10 м (стрелки), поле приводного давления (изолинии серого цвета) по данным *WRF* (*a*) и суточные суммы осадков по данным метеостанций (*b*)

Fig. 6. Accumulated precipitation over Crimea at 13:00 on December 11, 2018 (color), wind speed vectors at the 10 m height (arrows), sea level pressure field (grey isolines) based on the *WRF* data (*a*) and precipitation daily totals based on the weather stations data (*b*)

На рис. 7 приведены временные реализации осадков. К сожалению, доступные нам данные измерений на ГМС Севастополя включают только накопленные за 12 ч величины осадков, тем не менее в целом в пределах 3–6 мм они согласуются с величинами, рассчитанными моделью. Количество выпавших за

этот день осадков было существенно больше, чем в рассмотренный ранее летний день, что неудивительно, учитывая почти непрерывный суточный ход этого зимнего обложного дождя.



Р и с. 7. Временной ход осадков в точке с координатами 44,6 °с. ш.; 33,5 °в. д. и осредненных для всей территории полуострова; реализация влагосодержания, также осредненного для всей территории Крыма в слоях атмосферы 0–1 и 0–6 км

F i g. 7. Time series of the accumulated precipitation at 44.6 °N, 33.5 °E and those averaged for the entire territory of Crimea; moisture content also averaged for the entire territory of Crimea over the atmospheric layers 0–1 and 0–6 km

Возвращаясь к вопросу об источнике влаги в дожде и типе влагооборота в зимний период, рассмотрим приведенные на рис. 7 временные реализации влагосодержания в атмосфере в слое 0–6 км и в его нижней части (~ 0–1 км). Видна некоторая взаимосвязь между влагосодержанием и осадками, выраженная в тенденции к уменьшению влагосодержания по мере выпадения дождя. Однако само уменьшение влагосодержания в общем незначительно по величине. Простая оценка уменьшения влагосодержания в 6-километровом слое на $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ кг_w/кг_a (где кг_w – вес водяного пара, кг_a – вес влажного воздуха) соответствует 10 мм выпадающего на землю дождя, а это в $\sim 2,5$ раза меньше величины фактически выпавших осадков в этой точке за промежуток времени ~ 9 ч.

Конечно, такое заключение может носить лишь качественный характер. В отличие от летнего периода, когда сравнивались профили влагосодержания в атмосфере, различающиеся по времени на 1 ч, а скорости приземного ветра в центре под конвективным облаком были невелики, рассматриваемые зимние дождевые слоистые облака развивались в окрестности циклона при скоростях ветра 15–20 м/с. Поэтому адвективный перенос влаги в облаках играл определяющую роль при формировании осадков над отдельными областями. Таким

образом, можно лишь указать, что в рассмотренном случае выпадения зимнего обложного дождя внешний влагооборот был определяющим: баланс влаги на пространственных масштабах Крыма определялся осадками, принесенными слоистыми облаками из соседних областей Черноморского бассейна.

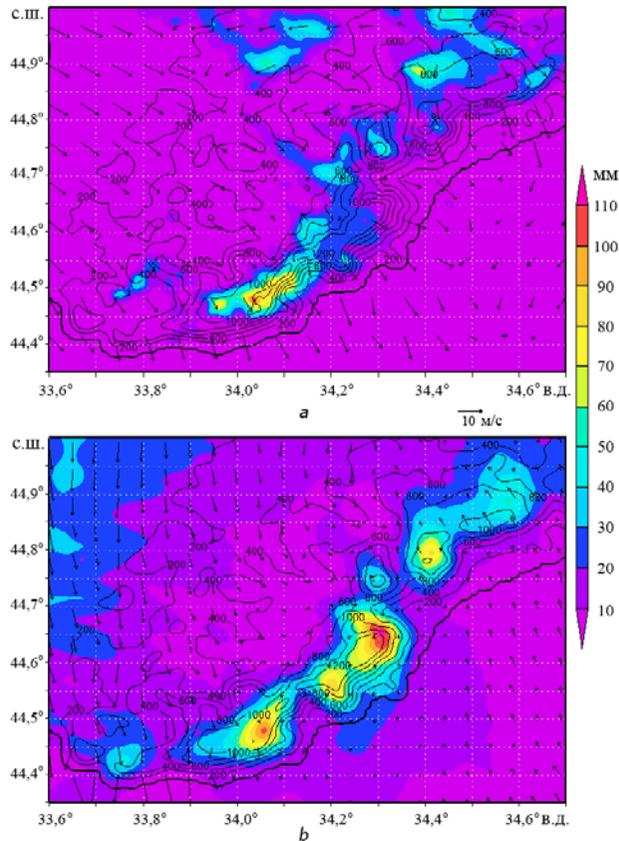
Осадки в области высоких гор

Гряда достаточно высоких гор контролирует климат Южного берега Крыма (ЮБК) [4]. Усиленные за счет орографического эффекта осадки в горах обуславливают повышенный поверхностный и подповерхностный сток в предгорных и степных районах. Таким образом, горы оказывают влияние на водный баланс всего полуострова. Вопросы формирования водного баланса, требующие проведения специальных исследований, дополненных комплексным численным моделированием регионального водного баланса, включающим оценки осадков, испарения, составляющих стока с высоким пространственным разрешением, выходят за пределы настоящей статьи. В то же время в связи с малочисленностью и разрозненностью данных измерений представляет интерес привести результаты воспроизведения осадков в области высоких гор для двух рассмотренных примеров.

На рис. 8 приведены поля осадков для летнего и зимнего периодов соответственно. В первом приближении их пространственное распределение достаточно близко, а сами значения в области высоких гор составляют 90–110 мм. Максимальные осадки сконцентрированы в районах четырех наиболее высоких гор с высотами 1000–1200 м. Простой физический механизм – подъем летом влажного воздуха к вершине гор и конденсация пара в области над вершиной – объясняет образование дождя. Для зимнего периода на рис. 9 показана вертикальная структура воздушного потока, набегающего на гору. Приведены величины концентрации дождевых капель в воздухе ($\text{кг}_w/\text{кг}_a$) и векторы скорости в координатах $\{v, 5w\}$. В результате блокирования горой набегающего потока холодного воздуха воздушный поток поднимается над вершиной горы на высоты до 3,5–4,5 км и сконденсированные в области этих высот капли воды выпадают в виде дождя.

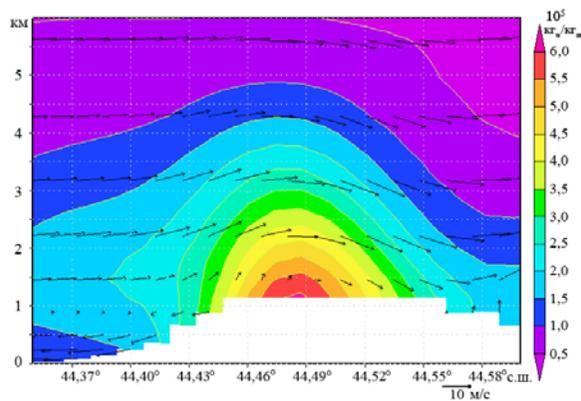
Существенную роль для таких дождей играет направление фонового ветра. Обтекание гор устойчиво стратифицированным зимним воздушным потоком может носить достаточно сложный характер, и локализация выпадения дождя в районе горного хребта зависит от направления ветра по отношению к линии горного хребта. Этим можно объяснить хотя и небольшое, но заметное различие в расположении максимумов осадков по отношению к вершинам гор в рассмотренных случаях (рис. 8).

В летний период максимумы осадков в общем смещены на северный склон гор, в то время как зимой они несколько смещены к южному склону (кроме г. Ай-Петри). Объяснение этому, вероятно, связано с направлением ветра в нижней части атмосферы. Летом южный ветер при подъеме вызывает дожди на южном склоне гор. Зимой ветер блокируется горой, над ее вершиной скорость приповерхностного ветра мала и дождь выпадает на вершине горы.



Р и с. 8. Распределение накопленных сумм осадков над южной частью Крыма на 15:00 14 июля 2018 г. (а) и на 13:00 11 декабря 2018 г. (б) (стрелки – поле скорости ветра на высоте 10 м, изолинии – рельеф гор)

Fig. 8. Accumulated precipitation over the southern part of Crimea at 15:00 on July 14, 2018 (a) and at 13:00 on December 11, 2018 (b) (arrows show the 10 m wind velocity, isolines show the terrain elevation)



Р и с. 9. Вертикальная структура концентрации дождевых капель в атмосфере на меридиональном разрезе по 34,05 ° в. д. Стрелками показаны векторы скорости с компонентами $\{v, 5w\}$, где v – меридиональная, w – вертикальная скорость

Fig. 9. Raindrop concentration vertical profile at the meridional cross-section at 34.05 ° E. Arrows show the wind velocity vectors with the $\{v, 5w\}$ components, where v is the zonal component and w is the vertical one

Таким образом, наличие высоких гор определяет летом и зимой места выпадения продолжительных и сильных осадков. В этом отношении они играют важнейшую роль в суммарном балансе влаги в Крыму с учетом близости к населенным пунктам ЮБК. При этом нужно учесть, что накопительные водохранилища находятся южнее высокогорной части Крымских гор, а, как видно из распределения летних (рис. 2) и зимних (рис. 6) дождей, в предгорной южной части осадки в общем невелики (по крайней мере в рассмотренных примерах).

Заключение

Численное моделирование двух случаев развития облачности и выпадения осадков в летний и зимний периоды года в Черноморском регионе и Крыму было выполнено с достаточно высоким пространственным разрешением (900 м). Для успешного воспроизведения облачности и осадков конвективного типа в летнее время (июль 2018 г.) выбор конвективно-разрешающего шага по пространству был особенно важным.

Известно, что характерной особенностью летних осадков является их суточная периодичность, которая для Крыма существенно зависит от бризовой циркуляции. Показано, что влияние бризов приводит к локализации конвективной облачности и осадков в центральных областях полуострова, в результате наблюдаются преимущественно малооблачная погода в прибрежных областях и выпадение сильных осадков в центральных районах. Источником влаги при этом является внутренний влагооборот, т. е. влага локального испарения с территории Крыма. Такую простую картину может нарушать наличие сильной внешней фоновой (синоптической) циркуляции.

Зимняя облачность, формирующая осадки в Крыму (преимущественно слоисто-дождевые облака), рассмотрена во втором модельном примере (декабрь 2018 г.). Показано, что источником влаги для обложных дождей в этом случае является адвекция водяного пара в результате переноса из соседних областей за счет больших скоростей воздушного потока.

В локализации осадков большое значение имеют высокие Крымские горы. Область наиболее высоких гор относится к зоне максимального выпадения осадков в оба периода года. Отмечена их роль как основного источника поступления влаги в предгорные южные районы Крыма, непосредственные осадки в которых, согласно результатам двух случаев моделирования, оказались незначительными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Л. : Гидрометеоиздат, 1982. 318 с.
2. Климатический атлас Крыма / Автор-составитель И. П. Вель. Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. 118 с.
3. Анисимов А. Е., Ефимов В. В., Львова М. В. Верификация данных дистанционного зондирования *GPM IMERG* и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 490–504. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-490-504

4. *Ефимов В. В., Яровая Д. А.* Численное моделирование конвекции в атмосфере при вторжении холодного воздуха в атмосферу над Черным морем // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50, № 6. С. 692–703. doi:10.7868/S0002351514060078
5. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Влияние гор на климат южного берега Крыма // *Метеорология и гидрология.* 2019. № 9. С. 86–94.
6. *Золина О. Г., Булыгина О. Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2016. Т. 1. С. 84–103. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-84-103>
7. *Ефимов В. В.* Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. doi:10.7868/S0002351517010047
8. A description of the advanced research WRF model version 4 / W. C. Skamarock [et al.] // *NCAR Technical Notes.* Boulder, CO, USA : National Center for Atmospheric Research, 2021. 145 p. doi:10.5065/1dfh-6p97
9. An Overview of the 2010 Hazardous Weather Testbed Experimental Forecast Program Spring Experiment / A. J. Clark [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2012. Vol. 93, iss. 1. P. 55–74. doi:10.1175/BAMS-D-11-00040.1
10. Toward Improved Convection-Allowing Ensembles: Model Physics Sensitivities and Optimizing Probabilistic Guidance with Small Ensemble Membership / C. S. Schwartz [et al.] // *Weather and Forecasting.* 2010. Vol. 25, iss. 1. P. 263–280. doi:10.1175/2009WAF2222267.1
11. NCAR’s experimental real-time convection-allowing ensemble prediction system / C. S. Schwartz [et al.] // *Weather and Forecasting.* 2015. Vol. 30, iss. 6. P. 1645–1654. doi:10.1175/WAF-D-15-0103.1
12. Comparing ECMWF high-resolution analyses with lidar temperature measurements in the middle atmosphere / B. Ehard [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 2018. Vol. 144, iss. 712. P. 633–640. <https://doi.org/10.1002/qj.3206>
13. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization / G. Thompson [et al.] // *Monthly Weather Review.* 2008. Vol. 136, iss. 12. P. 5095–5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
14. Cloud-resolving model intercomparison of an MC3E squall line case: Part I—Convective updrafts / J. Fan [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2017. Vol. 122, iss. 17. P. 9351–9378. doi:10.1002/2017jd026622
15. *Milbrandt J. A., Yau M. K.* A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part I: Analysis of the Role of the Spectral Shape Parameter // *Journal of Atmospheric Sciences.* 2005. Vol. 62, iss. 9. P. 3051–3064. doi:10.1175/JAS3534.1
16. *Milbrandt J. A., Yau M. K.* A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description // *Journal of Atmospheric Sciences.* 2005. Vol. 62, iss. 9. P. 3065–3081. doi:10.1175/JAS3535.1
17. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models / M. J. Iacono [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2008. Vol. 113, iss. D13. D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
18. *Janjić Z. I.* The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes // *Monthly Weather Review.* 1994. Vol. 122, iss. 5. P. 927–945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
19. *Chen F., Janjić Z., Mitchell K.* Impact of Atmospheric Surface-layer Parameterizations in the new Land-surface Scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model // *Boundary-Layer Meteorology.* 1997. Vol. 85. P. 391–421. doi:10.1023/A:1000531001463
20. *Зац В. И., Лукьяненко О. Я., Яцевич Г. В.* Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 120 с.

Об авторах:

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-4262-9902**, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 7202138991**, vefim38@mhi-ras.ru

Анисимов Анатолий Евгеньевич, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, **ResearcherID: ABA-1705-2020**, **Scopus Author ID: 42561044300**, anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

Комаровская Ольга Придиевна, научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: G-1814-2019**, **Scopus Author ID: 6504262996**, komarovskaya@mhi-ras.ru