ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ЛИВНЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ 11–13 СЕНТЯБРЯ 2013 Г. С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF

Alexandr DAŞEVSCHII

CZU: 551.509.5(262.5-05) alexander.dashevsky@outlook.com

WRF-ARW mesoscale numerical weather prediction model is used to make hindcasts of exceptionally heavy mesohigh-type convective rainfall events (200–300 mm of precipitation in several hours) in Northwestern Black Sea Region on September 11–13, 2013. Initiated with the GFS and ECMWF IFS global model data, the model shows decent results for lead times about 9–12 hours, with hints of satisfactory forecasts up to 36 hours in advance.

Введение. 11–13 сентября 2013 г. в Северо-Западном Причерноморье прошли сильные ливни. Катастрофическими были ливни 11 сентября, когда в Галацком уезде Румынии и Кагульском районе Республики Молдова выпало местами до 200 мм осадков, и 12 сентября, когда в Болградском и Белгород-Днестровском районах Одесской области Украины максимальное количество осадков составило около 300 мм. Эти количества осадков выпали за несколько часов, что привело к внезапным паводкам (англ. *flash floods*), которые принесли значительный материальный ущерб, а 11 сентября в Румынии стали также причиной гибели 9 человек. Ливни 13 сентября были существенно менее интенсивными — максимальное количество осадков составило около 80 мм, но и они также стали местами причиной внезапных паводков.

Катастрофические ливни 11 и 12 сентября не были спрогнозированы заблаговременно. Причиной было низкое качество данных численного прогноза, доступных на момент их выпадения (см. ниже). Это обстоятельство, наряду с необычными для Северо-Западного Причерноморья синоптическими и мезомасштабными условиями выпадения данных ливней, послужили мотивацией для изучения возможности их прогноза с помощью мезомасштабного моделирования с высоким разрешением.

Конвективные процессы. Анализ развития конвективной облачности по радиолокационным и спутниковым данным показал формирование в регионе квазистационарных мультиячеек, отличавшихся длительной — до нескольких часов — регенерацией. Регенерация их происходила в направлении против ведущего потока (англ. *backbuilding*). Смещение конвективных ячеек по потоку и прирост новых ячеек практически компенсировали друг друга, что и обусловило квазистационарный характер мультиячеек и, следовательно, накопление исключительно больших сумм осадков.

Данные наземных наблюдений показывают, что с конвективными очагами были связаны области более прохладного по сравнению с окружающей средой оттока (англ. o*utflow*), прохождение которых сопровождалось ростом атмосферного давления. Это даёт основания отнести описываемые в работе ливни к **мезоантициклоническому типу** (англ. ***mesohigh flash floods***) по классификации ливневых процессов в США по Мэддоксу и др. [2] (рис. 1). Сравнение вертикальных профилей ветра для случаев ливней 11 и 12 сентября со средним для этого типа ливней профилем ветра из [2] показывает их значительное сходство.

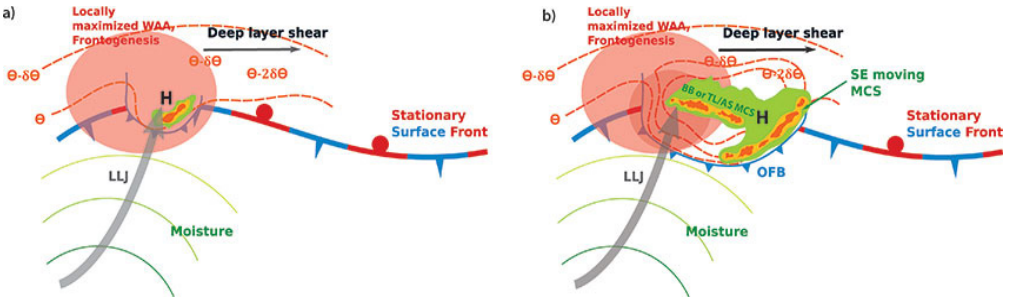


Рис. 1. Мезоантициклонический тип ливневых процессов в США по Мэддоксу и др. [4]

Синоптическая ситуация. 11 и 12 сентября атмосферная циркуляция над Европой характеризовалась режимом «циклон над Центральной Европой» (ТМ) по классификации Гесса—Брезовского, который 13 сентября сменился ложбиной (TRM). Северо-Западное Причерноморье 11 и 12 сентября, когда выпали наиболее сильные ливни, находилось в области адвекции тепла с Балканского полуострова (см. рис. 2). Такая циркуляция является исключительно необычной для сильных ливней в Северо-Западном Причерноморье [7], что затрудняет их прогноз на основе анализа только синоптического положения.

Мезоанализ. Типичные мезомасштабные условия для квазистационарной регенерирующей конвекции в США приведены, например, в [3]. Развитие конвективных облаков происходит вблизи квазистационарной линии разрыва метеовеличин, обычно широтно ориентированной. Триггером служит подъём над линией разрыва струйного течения нижних уровней (СТНУ), которое пересекает её приблизительно под прямым углом. Направление ведущего потока, а следовательно, и зоны осадков также перпендикулярно линии разрыва, благодаря чему область конвергенции на линии разрыва достигает наибольшей возможной протяжённости. Появление энергии конвективной неустойчивости связано с наличием языка влаги с юга и языка тепла с юго-запада. Все эти условия наблюдались в Северо-Западном Причерноморье 11 и 12 сентября 2013 г. (см. рис. 3).

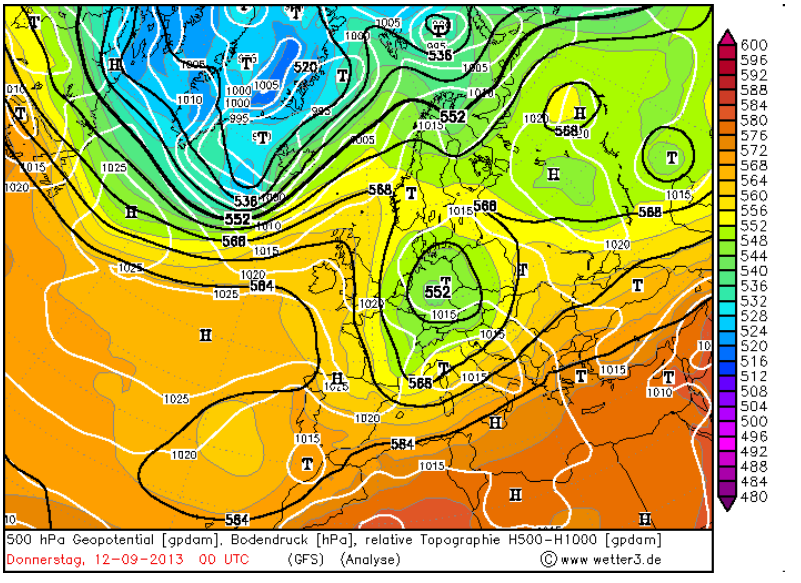


Рис. 2. Синоптическая ситуация на 00 UTC 12 сентября 2013 г.

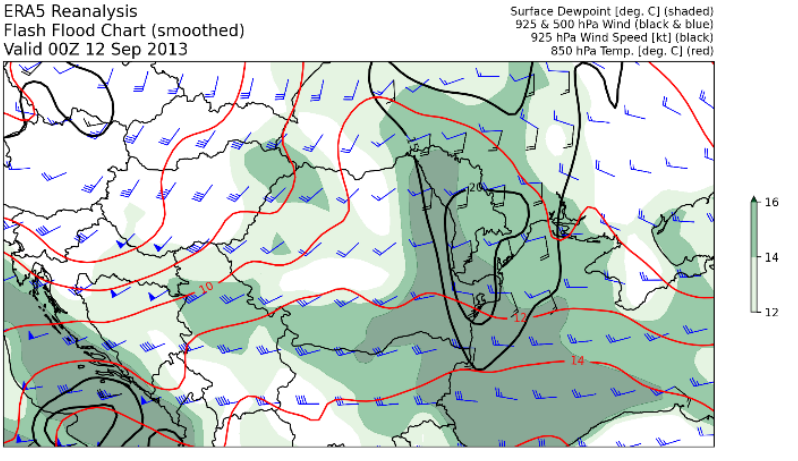


Рис. 3. Композитная карта условий для регенерирующей конвекции на 00 UTC 12 сентября 2013 г. по данным реанализа ERA5

В [3] также подчёркивается, что эпизоды регенерирующей конвекции связаны с приближением с юго-запада слабых областей низкого давления. Каждый из эпизодов ливней 11 и 12 сентября был связан со своим максимумом вихря скорости в нижней и средней тропосфере, которые возникли к югу от Южных Карпат после прохождения над Балканами 11 сентября обширной высотной ложбины. Кроме того, наблюдавшееся СТНУ повторяло форму Восточных Карпат,

огибая их с востока. Это показывает важность влияния Карпатских гор даже для тех конвективных процессов в Северо-Западном Причерноморье, которые не начинаются непосредственно в горах.

Сравнение радиолокационных оценок сумм выпавших осадков по формуле Маршалла — Пальмера, часто используемому соотношению между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков, дало сильно заниженные результаты (приблизительно в 3 раза). Рассмотрение вертикальных профилей конвективных ячеек выявило наличие сигнатуры *low echo centroid* (LEC) — сигнатуры низкого центроида радиоэхо, что указывает на вероятную причину этого занижения — преобладание процессов «тёплого» дождя (без участия ледяной фазы), при которых по сравнению с «холодными» дождями преобладают более мелкие капли, дающие меньшую радиолокационную отражаемость. Использование соотношения Z–R для особо интенсивных тропических дождей [5] дало хорошее согласие радиолокационных оценок количества выпавших осадков с фактическим.

Мезомасштабное численное моделирование. Для ретроспективного численного прогноза ливней была выбрана современная мезомасштабная модель WRF-ARW [6], созданная и развиваемая в США. Была выбрана версия 4.3.3 модели, последняя на момент выполнения работы (апрель 2022 г.). Начальные и граничные условия задавались интерполяцией данных двух глобальных моделей — американской GFS и европейской ECMWF IFS HRES. Для прогноза на 11 и 12 сентября были взяты прогоны этих моделей от 00 UTC этих суток, а для 13 сентября — от 12 UTC предыдущих суток. Горизонтальное разрешение внутренней сетки модели было взято равным 3 км для явного представления конвекции. Физические параметризации в модели были настроены на основе работы [1] (в ней авторам удалось воспроизвести с помощью WRF мезомасштабную конвективную систему с приростом против потока). Важно, что эти компоненты были доступны в WRF-ARW на момент выпадения рассматриваемых в работе ливней.

Максимальные расчётные количества осадков для 11 и 12 сентября в Северо-Западном Причерноморье по модели WRF составили соответственно около 100 и 180 мм (рис. 4). Несмотря на занижение приблизительно в 2 раза по сравнению с фактическими данными, полученные результаты являются неплохими: ливни такой градации также могут иметь катастрофические последствия и поэтому являются основанием для выдачи заблаговременных предупреждений. Ценность результатов становится ещё более явной при сравнении их с прогнозами осадков по глобальной модели ECMWF (для GFS таких данных нет в архиве прогнозов), по которой ожидалось выпадение лишь до 15 мм осадков 11 сентября и до 25 мм 12 сентября, что является занижением на порядок. Анализ эволюции модельных конвективных процессов по WRF показывает, что модель воспроизводит их в целом реалистично.

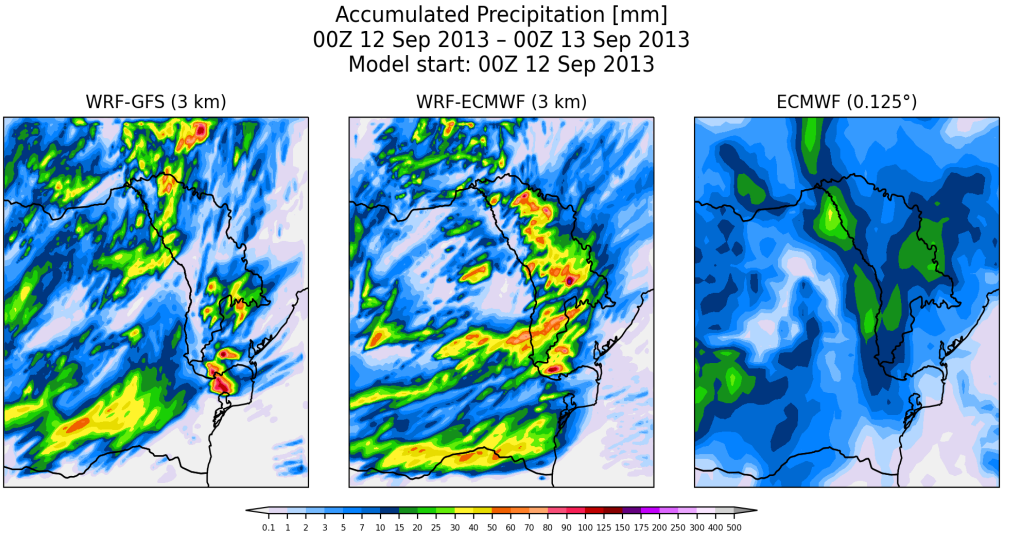


Рис. 4. Прогноз количества осадков по моделям WRF и ECMWF на 12 сентября 2013 г.

Определение максимально возможной заблаговременности прогноза катастрофических ливней 11 и 12 сентября. В связи с ограниченными вычислительными мощностями определение максимальной заблаговременности численного прогноза исследуемых ливней выполнено не путём запуска модели WRF для более длительных промежутков времени, чем описано выше, а путём сравнения прогнозов энергии конвективной неустойчивости (CAPE) по глобальной модели ECMWF с различной заблаговременностью. Этот анализ показывает, что удовлетворительный прогноз ливней 11 и 12 сентября был возможен примерно 36 часов (1,5 суток) до их начала.

Выводы. Мезомасштабное моделирование с помощью модели WRF-ARW с разрешением 3 км удовлетворительно воспроизводит интенсивные ливневые процессы в Северо-Западном Причерноморье 11–13 сентября 2013 г. с заблаговременностью около 9–12 часов, достаточной для выдачи ранних метеорологических предупреждений, а вероятная максимально возможная заблаговременность численного прогноза этих ливней составляет около 1,5 суток. Показано, что ливни 11 и 12 сентября можно отнести к мезоантициклоническому типу, согласно классификации ливневых процессов в США по Мэддоксу и др. Ложбины коротких волн, которые явились триггерами для развития конвективной облачности, возникли при обтекании юго-западными потоками Карпатских гор, что показывает возможность влияния этой горной системы на конвективные процессы в регионе даже при отсутствии орографической конвекции.

Библиография

1. BLAKE, B. T., PARSONS, D. B., HAGHI, K. R., CASTLEBERRY, S. G. The Structure, Evolution, and Dynamics of a Nocturnal Convective System Simulated Using the WRF-ARW Model. In: *Monthly Weather Review*, 2017, 145(8), p. 3179–3201. [Retrieved July 3, 2022]. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/145/8/mwr-d-16-0360.1.xml.
2. MADDOX, R. A., CHAPPELL, C. F., HOXIT, L. R. Synoptic and Meso-α Scale Aspects of Flash Flood Events, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1979, *60*(2), p. 115–123. [Retrieved July 10, 2022]. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/60/2/1520-0477-60_2_115.xml.
3. MOORE, J. T., GRAVES, C. E. Factors Affecting Mesoscale Convective System Propagation with Illustrations from Case Studies. [Retrieved July 3, 2022]. URL: https://www.slideserve.com/enid/factors-affecting-mesoscale-convective-system-propagation-with-illustrations-from-case-studies.
4. SCHUMACHER, R. S. Heavy rainfall and flash flooding. In: *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science* (invited contribution), 2017. [Retrieved July 10, 2022]. URL: https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.132.
5. SEO, D.-J., et al. An Investigation of Rainfall Estimates Generated by the WSR88D PPS Algorithm under Various Parameterizations of the 'Z-R' Relationship and 'Hail Cap' Threshold During Two Extremely Heavy 1998 South Texas Precipitation Events. In: *Final report, interagency memorandum of understanding among the NEXRAD Program, the WSR-88D Operational Support Facility, and the National Weather Service Office of Hydrology*. Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology, NOAA/NWS Tech. Rep., 2002. [Retrieved July 10, 2022]. URL: https://www.weather.gov/media/owp/oh/hrl/docs/chapter2_text.pdf.
6. SKAMAROCK, W. C. et al. *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3* (No. NCAR/TN-556+STR). 2021. [Retrieved July 10, 2022]. URL: http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p97.
7. ŞTEFĂNESCU, V., ŞTEFAN, S. Synoptic context of floods and major flash floods in Romania during 1948-1995. In: *Romanian Reports in Physics*, 2011, *63*, p. 1083–1098. [Retrieved July 5, 2022]. URL: http://www.rrp.infim.ro/2011_63_4/art19Stefanescu.pdf.

Recomandat

***Victor CIOBU**, dr., conf. univ.*