

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-95-117>

УДК 551.509.5

Условия возникновения и прогноз сильных ливней и шквалов в Московском регионе на примере двух случаев в июне 2024 года

Т.Г. Дмитриева, А.А. Алексеева

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
tdsin@mecom.ru, antonida_alekseeva@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ синоптических условий и численных прогнозов двух случаев опасных конвективных явлений в Московском регионе: 5–6 и 20 июня 2024 г. Рассмотрены прогнозы явлений мезомасштабной модели COSMO-Ru2, усваивающей данные радиолокаторов, и рассчитанные на основе данных региональной модели Гидрометцентра России. Радиолокационные данные ДМРЛ-С «Внуково» и полученные на основе сети ДМРЛ-С в экспериментальной технологии диагноза дополняют картину синоптических процессов и их особенностей. Даны рекомендации по использованию синоптической информации в случаях формирования активной конвекции с опасными явлениями в дополнение к численным прогнозам для повышения точности штормового предупреждения и прогноза.

Ключевые слова: сильные ливни и шквалы, прогноз, теплый период года, модель COSMO-Ru2, радиолокационная информация ДМРЛ-С

Conditions for occurrence and forecasting of heavy rains and squalls in the Moscow region: Case Studies for June 2024

T.G. Dmitrieva, A.A. Alekseeva

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
tdsin@mecom.ru, antonida_alekseeva@mail.ru*

The paper presents a comparative analysis of synoptic conditions and the results of numerical forecasts of severe convective events in the Moscow region on June 5–6 and 20, 2024. The forecasts of weather events by the Cosmo-Ru2 mesoscale model assimilating radar data and the forecasts based on the data of the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia are used. The DMRL-C Vnukovo weather radar data and the data obtained on the basis of the DMRL-C network in the experimental diagnostic technology complement the pattern of synoptic processes and their features. Recommendations are given on the use of synoptic information in cases of the formation of active convection with severe weather events in addition to numerical forecasts to improve the accuracy of storm warning and forecasting.

Keywords: heavy rains and squalls, forecast, warm season, COSMO-Ru2 model, DMRL-C weather radar data

Введение

Июнь 2024 года в Московском регионе оказался самым дождливым месяцем за всю историю метеонаблюдений, перекрыв месячную сумму осадков по новым климатическим нормам в три раза. Большую часть июня регион находился в малоградиентных полях области пониженного давления: в первую декаду месяца вызванных атлантическими депрессиями, во вторую декаду – выходом циклонов (южного, образовавшегося над Черным морем, и балтийского, образовавшегося на юге Балтийского моря) и связанными с ними активными фронтальными разделами. Поэтому большая часть кратковременных дождей и ливней с грозами наблюдалась на фронтах окклюзий и линиях неустойчивости и имела, соответственно, внутримассовый характер. Грозовые же ливни 20 июня – фронтальные, отмечались при прохождении холодного атмосферного фронта.

Ливневые дожди часто сопровождались шквалистым усилением ветра, в отдельных районах градом, но по характеру выпадения осадков и возникновению шквалистых порывов ветра имели различия. Представляет интерес более подробное рассмотрение этих процессов с целью выявления закономерностей, учет которых поможет при оперативном прогнозе, а также при составлении штормовых предупреждений.

В июне 2024 года по количеству выпавших в Московском регионе осадков наиболее запомнились случаи ливней с грозами, сопровождавшиеся отмеченными наземными наблюдательными станциями (ННС) шквалами: вечер 5 июня и ночь 6 июня (49 мм/ч на МСВДНХ при шквале 19 м/с); 20 июня (15–39 мм/12ч при шквалистом усилении ветра местами 15–26 м/с). Процессы 20 июня по количеству осадков и порывам ветра воспроизводились близко к фактическим моделями Гидрометцентра России [method.meteoorg.ru], однако внутримассовый характер процесса 5–6 июня модели не спрогнозировали, давая лишь кратковременный дождь (порядка 3–5 мм/12ч) при ветре в градации «слабый/умеренный» (до 8 м/с).

Сравнение случаев конвективных явлений 5–6 июня и 20 июня 2024 года

В табл. 1 приведены данные о количестве осадков для случаев сильного дождя, сильного ливня и порывов ветра (местами шквалов) ночью 6 июня (после 21 ч МСК) в Московском регионе, включая данные автоматических метеорологических станций (АМС).

В случае 6 июня сильные и очень сильные осадки и шквал имели локальный характер, реализовались только в центре Старой Москвы, в случае 20 июня – прошли по территории всего Московского региона с запада на восток, что было вызвано прохождением холодного контрастного атмосферного фронта (температура воздуха на поверхности 850 гПа понизилась на 5 °С за 12 ч, у земли – на 6–7 °С).

Анализ приземных (рис. 1) и на поверхностях АТ-850 и АТ-500 гПа барических полей за 15 ч МСК (рис. 2 и 3) наглядно показывает различие в синоптических процессах этих случаев. Московский регион 5–6 июня находился у земли в малоградиентном поле давления, в теплой, влажной воздушной массе с постоянным притоком тепла, на высотах – на оси высотного гребня тепла, также в малоградиентном поле при слабом ветре в нижней тропосфере (от 5 до 10 м/с); 20 июня – у земли в градиентном поле давления в зоне активного арктического холодного атмосферного фронта, на высотах – в высотной ложбине, близко к ее оси, где наблюдалась конвергенция ветровых потоков, юго-западные ветры с переходом на северо-западные (в нижней тропосфере скорость ветра до 25 м/с), на границе зоны струйного течения.

Таблица 1. Данные о количестве осадков при дождях и ливнях и о максимальных порывах ветра ночью 6.06.2024 и днем 20.06.2024 в Московском регионе
Table 1. Data on the amount of precipitation in rains and showers, maximum gusts of wind on the night on June 6 and during the day on June 20, 2024 in the Moscow region

Метеостанции	6.06.2024			20.06.2024		
	СЛ, мм/ч	СД, мм/12ч	Порывы ветра при шквале, м/с	СЛ, мм/ч	СД, мм/12ч	Порывы ветра при шквале, м/с
МС МГУ		36			19	14
МС Тушино					16	
АМС ТСХА	23	27	11		15	19
МС ВДНХ	49	53	19	15	17	
АМСГ Внуково						23
МС Клин					36	
МС Волоколамск					24	14
МС Ново-Иерусалим				24	30	17
МС Можайск				16	21	16
МС П. Посад					15	17
МС Дмитров				16	24	15
АМС Мячково					20	22
АМС Озеры						26
АМС Рогачево					31	13
МС Серпухов				16		20
АМС Солнечногорск					39	13
АМС Чашниково				18		15
АМС Щекино					32	16
МС Талдом					36	13

Примечание. СЛ – сильный ливень; СД – сильный/очень сильный дождь.

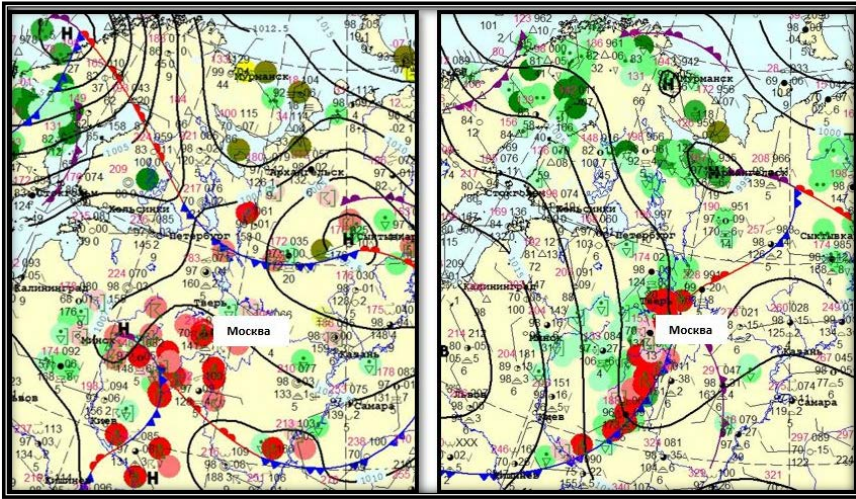


Рис. 1. Фрагменты кольцевых карт погоды с приземным анализом атмосферных фронтов: 05.06.2024 за 18 ч МСК (слева) и 20.06.2024 за 15 ч МСК (справа). Линиями показаны: черным цветом – приземные изобары, синим – холодный фронт, красным – теплый фронт, фиолетовым – фронт окклюзии по типу теплого.

Fig. 1. Fragments of ring weather maps with surface analysis of atmospheric fronts: on June 05, 2024 for 18 Moscow time (left) and on June 20, 2024 for 15 Moscow time (right). Lines show: black – surface isobars, blue – cold front, red – warm front, purple – occluded front of warm type.

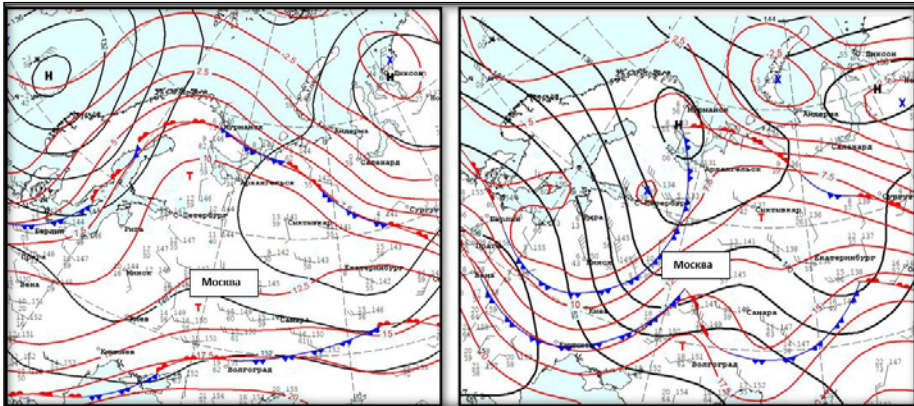


Рис. 2. Фрагменты карт АТ-850 за 15 ч МСК с фронтальным анализом: 05.06.2024 (слева) и 20.06.2024 (справа). Цветные линии: черные – изогипсы; красные – изотермы; черные стрелки с оперением – скорость ветра, где палочка – 5 м/с, треугольник – 25 м/с; линии атмосферных фронтов: синий цвет – холодный; красный цвет – теплый.

Fig. 2. Fragments of AT-850 maps for 15 Moscow time with frontal analysis: on June 05, 2024 (left) and on June 20, 2024 (right). Colored lines: black – isohypses; red – isotherms; black arrows with feathers – wind speed, where 1 stick – 5 mps, triangle – 25 mps; lines of atmospheric fronts: blue – cold; red – warm.

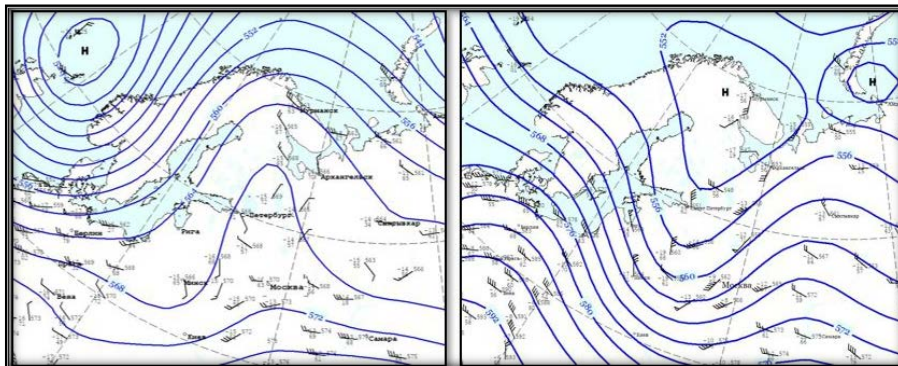


Рис. 3. Фрагменты карт АТ-500 за 15 ч МСК: 05.06.2024 (слева) и 20.06.2024 (справа). Синим цветом нанесены изогипсы; черные стрелки с оперением – скорости ветра, где палочка – 5 м/с, треугольник – 25 м/с.

Fig. 3. Fragments of AT-500 maps for 15 Moscow time: on June 05, 2024 (left) and on June 20, 2024 (right). Isohypsers are shown in blue; black arrows with feathers are wind speeds, where 1 stick is 5 mps, triangle is 25 mps.

Таким образом, можно сделать вывод, что прогнозирование максимального количества осадков и максимальных порывов ветра, при хорошо выраженных значительных контрастах на атмосферных фронтах в приземных и высотных барических полях, несколько проще, чем при внутримассовых процессах, развивающихся в малоградиентных полях и дополнительно сильно зависящих от местных локальных условий (географических, термических, таких как влияние мегаполиса на процессы развития или диссипации мощной конвективной облачности).

Численные прогнозы на 5–6 и 20 июня 2024 года

Ниже приведен сравнительный анализ по случаям 5–6 и 20 июня 2024 г. расчетов численных моделей, используемых в Гидрометцентре России для оперативных прогнозов по Московскому региону, в графическом и картографическом представлении по максимальным порывам ветра и суммарным осадкам. Выбраны прогнозы по пунктам с максимальными фактическими порывами ветра по московскому мегаполису (рис. 4). 20 июня порывистый ветер в Московском регионе был хорошо спрогнозирован даже по п. Внуково, где максимальные порывы ветра при нестабильных синоптических ситуациях (например, прохождение фронтальных разделов) практически всегда завышены относительно московского мегаполиса [12]. По фактическим данным наземных метеостанций, включая автоматические, общий фон порывов ветра был в пределах 13–20 м/с, локально по АМС 22–26 м/с (см. табл. 1). Точнее всех численный прогноз отмечен у модели COSMO-Ru с пространственным разрешением 2 км – до 21 м/с, по комплексному прогнозу Гидрометцентра России – до 18 м/с, по модели ICON-EU7 – до 17 м/с. Время максимальных порывов ветра также

хорошо рассчитано представленными численными прогнозами (середина дня).

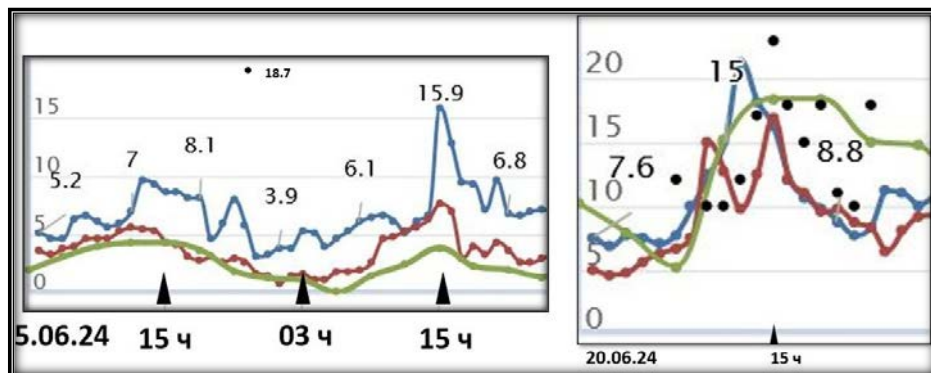


Рис. 4. Графическое представление численных расчетов максимальных порывов ветра от счета 03 ч МСК по МС ВДНХ 05–06.06.2024 (слева) и п. Внуково 20.06.2024 (справа): COSMO-Ru2; ICON-EU7; комплексный прогноз. Прогностические порывы ветра: синяя линия – COSMO-Ru2; красная – ICON-EU7; зеленая – комплексный прогноз; «жирные» точки – фактические порывы ветра. Временная шкала дана в МСК.

Fig. 4. Graphical representation of numerical calculations of maximum wind gusts of models from the 03 Moscow time count on June 05, 2024 and 20, 2024: COSMO-Ru2; ICON-EU7; comprehensive forecast for the VDNH (left) and Vnu-kovo (right) points. Colored lines are forecast wind gusts: blue – Cosmo-Ru2; red – ICON-EU7; green – comprehensive forecast; "bold" dots are actual wind gusts. The time scale is given in Moscow time.

На рис. 5 представлены для наглядности фрагменты прогностических карт «Линии тока и порывы ветра» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК на 12–15 ч МСК для 20.06.2024, где прослеживается усиление порывов ветра при прохождении холодным атмосферным фронтом Московского региона. Модель правильно отразила фоновый ветер 17–20 м/с, местами до 22 м/с, по области до 25 м/с. Однако время максимальных порывов спрогнозировано на 2 часа раньше, чем они реализовались по факту, что связано, видимо, с ускорением процесса прохождения холодного атмосферного фронта. По картам видно, что наиболее сильные ветры модель спрогнозировала в Центральном федеральном округе, где наблюдались более высокие температуры воздуха (до 32 °С) и, соответственно, при прохождении холодного контрастного атмосферного фронта реализовались более сильные порывы.

На рис. 6 представлены фрагменты прогностических карт «Суммы осадков за 1 час» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК с 12 до 15 ч МСК для 20.06.2024, показывающие изменение часовых сумм осадков по Московскому региону при прохождении холодного атмосферного фронта. Можно также отметить (см. табл. 1), что модель правильно спрогнозировала основную градацию осадков 15–20 мм (в градации «сильные») для

московского мегаполиса), с локальными максимумами по области порядка 30 мм (фактически по данным, включая АМС, до 39 мм/12ч).

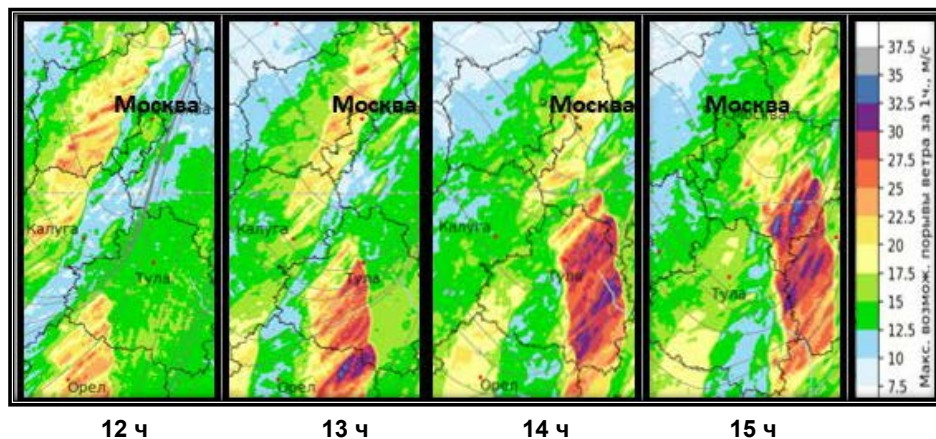


Рис. 5. Фрагменты карт «Линии тока и приземные порывы ветра» COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК 20.06.2024 за последовательные ежечасные сроки с 12 до 15 ч МСК. Величина порывов определяется по цветовой шкале.

Fig. 5. Fragments of maps of streamlines and surface wind gusts (mps) of the COSMO-Ru2 model from the count of 03:00 Moscow time on June 20, 2024 for successive hourly periods from 12:00 to 15:00 Moscow time. The magnitude of the gusts is determined by the color scale.

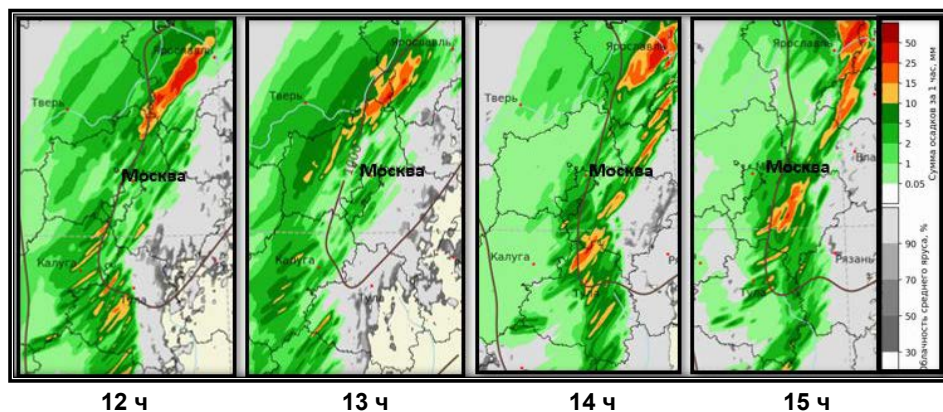


Рис. 6. Фрагменты карт «Суммы осадков за 1 час» модели COSMO-Ru2 от счета 03 ч МСК 20.06.2024 за последовательные сроки с 12 до 15 ч МСК. Величина количества осадков определяется по цветовой шкале.

Fig. 6. Fragments of hourly precipitation totals (mm) maps of the COSMO-Ru2 model from the count of 03:00 Moscow time on June 20, 2024 for successive periods from 12:00 to 15:00 Moscow time. The amount of precipitation is determined by the color scale.

В случае 5–6 июня из рис. 4 (слева) видно, что все модели «не увидели» локального усиления шквалистого ветра по северу и северо-западу

московского мегаполиса (в районе МС ТСХА и МС ВДНХ), где образовалась мезомасштабная конвективная система [1, 10, 11, 16] с ливнями (23–49 мм/ч) и грозами, вызванная внутримассовой конвекцией, максимально реализовавшейся в начале ночного времени 6 июня. Пространственная локальность этих конвективных процессов не позволила моделям их спрогнозировать. По графикам рис. 4 (слева) видно усиление ветра в районе 15 ч МСК днем 6 июня, что, видимо, связано с вхождением Московского региона в предфронтальную зону холодного атмосферного фронта, влияние которого начало сказываться в постепенном понижении температуры воздуха, что очевидно для моделей. Оперативная практика использования численных прогнозов также подтверждает, что прогноз метеопараметров при процессах фронтального характера в устоявшийся период (холодный/теплый) более понятен и моделям, и синоптикам по порядку их экстремальных величин.

Случай очень сильного дождя, ливня и шквала 5–6 июня 2024 г. в московском мегаполисе (МС ВДНХ)

Рассмотрим случай 5–6 июня более подробно с привлечением прогнозов конвективных явлений, реализованных на основе данных региональной модели Гидрометцентра России, рассчитывающихся в оперативном режиме и передающихся на прогностическую сеть Центрального федерального округа. Рассмотрим радиолокационные данные, позволяющие уточнить прогноз.

После продолжительной жаркой погоды (с 29 мая по 1 июня 2024 г. максимальная температура воздуха достигала 30–31 °С) и кратковременных дождей, местами с грозами, вечером 5 июня и ночью 6 июня в московском мегаполисе (в районе Старой Москвы) наблюдались сильные и очень сильные дожди и ливни: 27–36 мм, локально «тропический» ливень на МС ВДНХ (49 мм/ч), сопровождавшийся шквалом (19 м/с), и по суммарным осадкам очень сильный дождь (53 мм/12ч). Значительная локализация выпадения этих осадков, как уже указывалось, не позволила моделям спрогнозировать их с суточной заблаговременностью. Карта же суммарных полусуточных осадков (ночь 06.06.2024) по ДМРЛ-С «Внуково» (рис. 7) хорошо отражает «пятнистый» характер выпавших осадков, как по месту выпадения, так и по их количеству: местами по Московскому региону дожди не отмечались совсем, локально диагностировались осадки количеством до 90 мм/12ч (официально ННС отмечены максимумы 27–53 мм/12ч).

Разница в количестве диагностированных осадков объясняется тем, что локатор для расчета интенсивностей и суммарных осадков измеряет радиолокационную отражаемость на высоте 600 м над уровнем установки ДМРЛ-С [13], поэтому сумма диагностированных, достигших земной поверхности осадков может отличаться в сторону уменьшения/завышения в зависимости от удаленности места выпадения осадков от локатора. Кроме

того, ливневые осадки могут вылиться мимо станционного ведра для измерения осадков. Такой разброс в распределении осадков характерен для внутримассовой конвекции, не связанной с активными фронтальными разделениями (рис. 7).

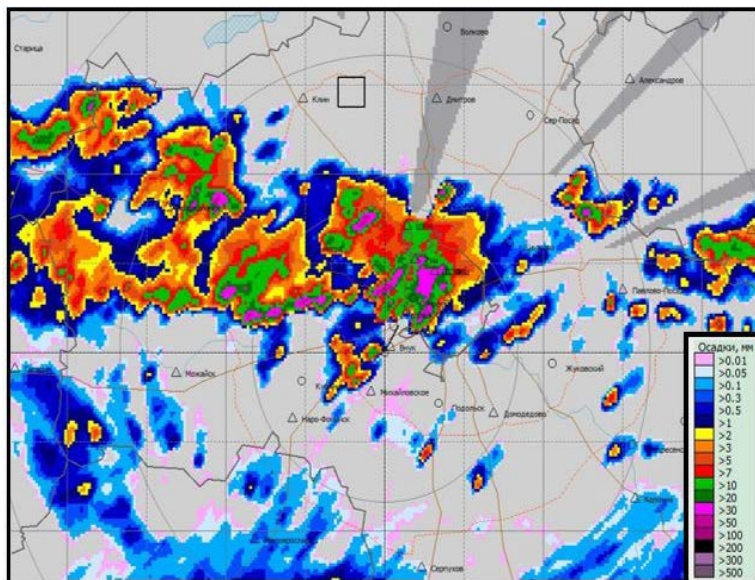


Рис. 7. Карта суммарных осадков ДМРЛ-С «Внуково» за ночной период 06.06.2024.

Fig. 7. Map of total precipitation DMRL-S "Vnukovo" for the night period on June 06, 2024.

Случай сильного ливня на МС ВДНХ интересен еще и тем, что сопровождался шквалом 19 м/с, необычность возникновения которого заключалась в отсутствии для реализации шквала привычных условий по приземным и высотным барическим полям. Исходя из синоптических условий, давление у земли и в нижней тропосфере представляло малоградиентное поле, на поверхности АТ-500 гПа – высотный гребень. Шквал был отмечен при сильном ливне (рис. 8), диагностированном локатором в момент его максимальной интенсивности (>50 мм/ч в 21 ч 40 мин МСК).

Интересно проследить зарождение «суперячейки», реализовавшей данные явления. По картам явлений и высоты облачности ДМРЛ-С «Внуково» можно проследить характер образования этих явлений, называемый «взрывным». До 17.20 ч МСК по локатору между н/п Истра и н/п Шереметьево (в районе Зеленоградского административного округа Москвы) облачности не наблюдалось; в 17.30 ч МСК появилось быстрорастущее облако высотой до 6 км (за 10 мин высота его вершины достигла 6 км) и длиной не более 3 км; в 17.40 ч МСК оно достигло, по данным локатора,

стадии грозового с вероятностью грозы 70–90 % (что соответствует установленному необходимому признаку грозового облака: вертикальная протяженность облака превышает 4 км и достигнут уровень с температурой -22 °С) [15, с. 436]. В 19.00 ч МСК облако оформилось в ливне-грозо-градовую ячейку с высотой вершин 11,4 км, протяженностью до 8 км и максимальной отражаемостью $Z_{\max} = 58$ dBZ на высоте 4–5 км, что теоретически подтвердило значительную мощность кучево-дождевой облачности присутствием «столба» высокой радиолокационной отражаемости (с высоты 2 км и до 6 км максимальная отражаемость по слоям составляла от 55 до 58 dBZ, с максимумом на высоте 5 км) [15, с. 453]. Значит, в данной «суперячейке» присутствовало значительное количество частиц больших размеров, учитывая низкую температуру в облаке, не только в переохлажденном виде, но и в кристаллическом.

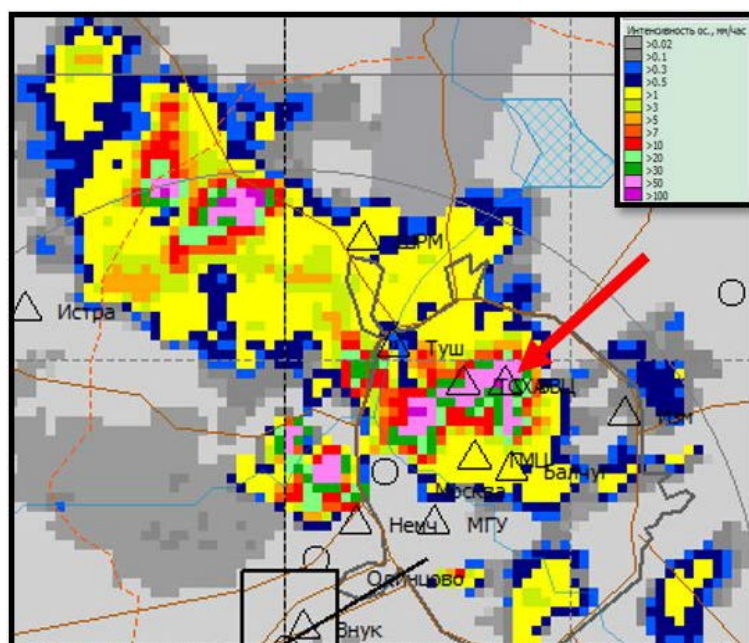


Рис. 8. Карта интенсивности осадков ДМРЛ-С «Внуково» 05.06.2024 г. в 21.40 ч МСК.

Fig. 8. Precipitation intensity map DMRL-S "Vnukovo" on June 06, 2024 at 21:40 Moscow time.

Далее ячейка, продолжая разрастаться в размерах, в 20.40 ч МСК объединилась с соседними ячейками в единый массив под одной «наковальной» (Сi inc.) и к моменту (21.30 ч МСК) реализации сильных ливней (рис. 9) в северной части московского мегаполиса образовалась одна мезомасштабная конвективная система протяженностью около 200 км [1, 10, 11,

16]. Эпицентр сильного ливня пришелся именно на МС ВДНХ, где по произведенным измерениям за один час выпало 49 мм дождя в сопровождении шквалистых порывов ветра 19 м/с.

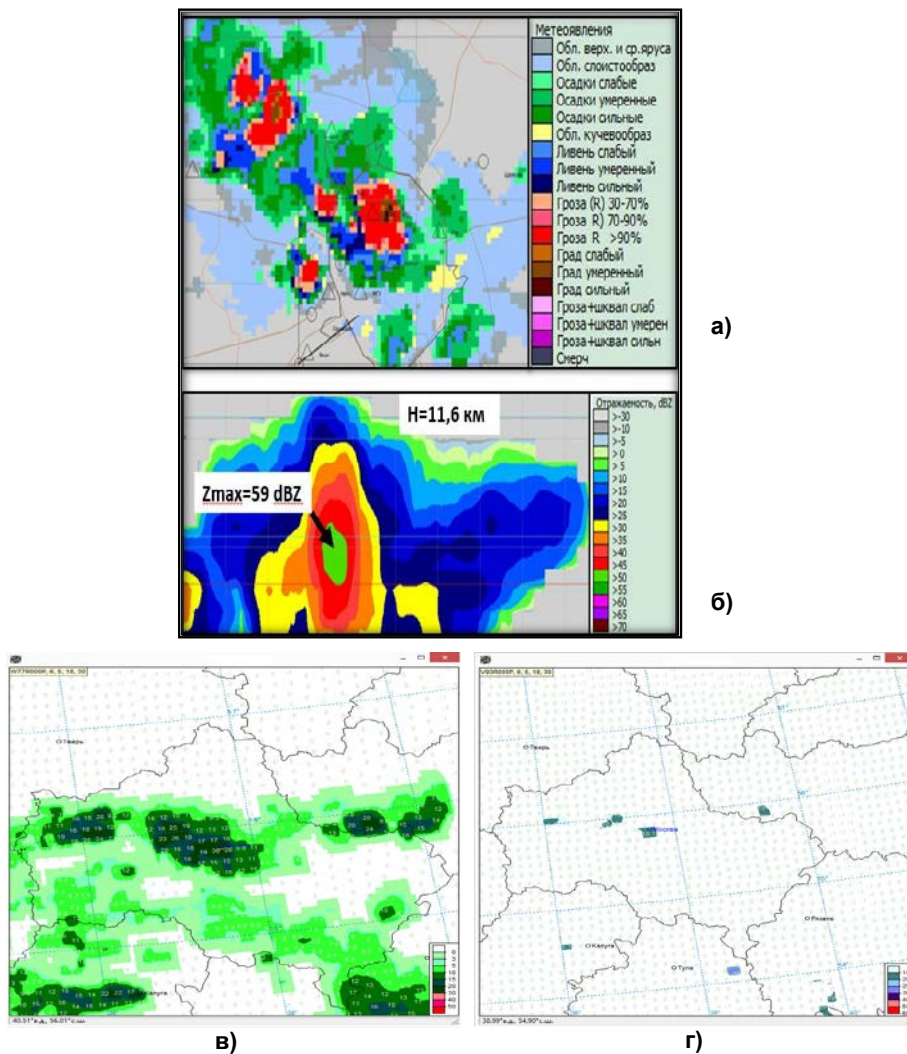


Рис. 9. Фрагменты карт 05.06.2024 за 21.30 ч МСК: явлений (а) и вертикальный разрез «супер-ячейки» (б) по данным ДМРЛ-С «Внуково»; диагноза максимальной конвективной скорости, м/с (в) и скорости ветра, м/с, (г) при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России.

Fig. 9. Fragments maps on June 05, 2024 at 21:30 Moscow time: phenomena (a); vertical section of the “super-cell” (б) of the DMRL-S Vnukovo; diagnosis of maximum convective velocity, mps (в) and wind speed, mps, (г) during a squall based on the DMRL-S network data and numerical modeling within the framework of the experimental technology of the Hydrometeorological Center of Russia.

На рис. 9в приведены фрагменты карт диагноза максимальной конвективной скорости [9], на рис. 9г – скорости ветра при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования, полученные в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России. Как видим, конвективные скорости в зоне активной конвекции в районе МС ВДНХ составляли 28 м/с, а южнее – больше 30 м/с. Кроме того, диагностировался шквал, порывы ветра которого достигали 18–20 м/с.

Исходя из механизма возникновения шквалов [15, с. 527–588], можно предположить, что происходит изменение метеопараметров при формировании шквала, что наглядно показано на рис. 10 (резкое падение давления перед шквалом, резкий его рост при прохождении шквала и падение после прекращения шквала и ливня, обычно сопровождающего шквал).

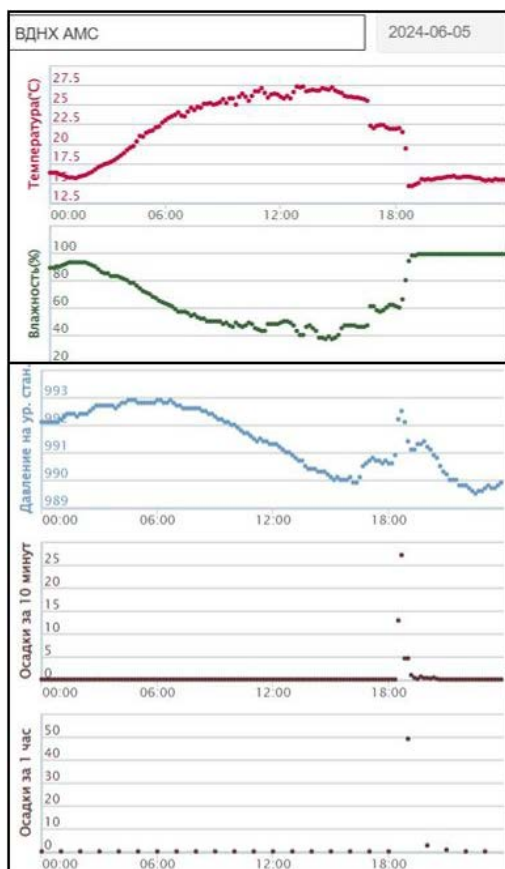


Рис. 10. Изменение метеопараметров при формировании шквала 05.06.2024, АМС ВДНХ: температуры воздуха, относительной влажности воздуха, давления на уровне станции, количества осадков за 10 минут и за 1 час.

Fig. 10. Fragment of the VDNH AMS data on June 05, 2024 in graphical form: air temperature, relative air humidity, pressure at the station level, amount of precipitation for 10 minutes and for 1 hour.

Это говорит о том, что на МСВДНХ пришлась наиболее интенсивная центральная часть кучево-дождевого облака, аккумулировавшего в себе большую массу воды, при движении которой вниз при прохождении ливневого облака и возникло резкое усиление ветра (шквал).

В районе МСВДНХ около 21.30 ч МСК наблюдалась максимальная высота кучево-дождевой облачности (11,6 км), что превышало тропопазу (11 км) на 600 м и, соответственно, по радиолокационным критериям [13, с. 93–105] могло идентифицироваться ДМРЛ-С «Внуково» как шквал, но на карте явлений локатора видим только диагностированные сильный град и грозу вероятностью 90 % (рис. 9а). Хотя из практических наблюдений, подтверждаемых Руководством [15, с. 527–588], известно, что сильные нисходящие движения воздуха, вызванные ливневыми осадками из кучево-дождевых облаков, особенно при выпадении града, сопровождаются резким усилением ветра – шквалом. И, как указывалось выше, в рамках экспериментальной технологии диагностики опасных конвективных явлений шквал диагностирован, порывы ветра составляли 18–20 м/с.

Теперь рассмотрим, как были спрогнозированы экстремальные значения осадков на основе данных региональной модели Гидрометцентра России методом, рекомендованным к внедрению в практику решением ЦМКП Росгидромета [3, 8]. На настоящее время пространственное разрешение модели (75 км) значительно проигрывает современным мезомасштабным моделям, но на ее основе ранее был разработан метод прогноза максимального количества осадков, рекомендованный к внедрению. До сих пор прогнозы в оперативном режиме передаются на сеть в летний период года и записываются в базу данных.

Прогнозы визуализированы пакетом визуализации Изограф. По фрагменту карты (рис. 11, слева) прогноза максимального количества осадков от 03 ч МСК на текущий день (до 21 ч МСК) видно, что Московский регион находился между двумя спрогнозированными полями очень сильных осадков, т. е. зон активной конвекции, которые могут реализовывать конвективные явления вплоть до интенсивности ОЯ. В таких случаях синоптику необходимо усиливать бдительность и привлекать для анализа дополнительную информацию (радиолокационную, спутниковую, расчетные конвективные индексы и т. п.).

Здесь надо учитывать, что при данном разрешении прогнозов для уточнения места и интенсивности конвективных явлений нужно переходить к рассмотрению прогнозов на более мелкой сетке, например, на сетке модели COSMO-Ru2 (что будет показано ниже). При рассмотрении результатов прогноза видна правильная тенденция расчета прогноза, выраженная в числовых результатах узлов сетки; с заблаговременностью 30 ч (на ночь 6 июня) спрогнозированы осадки: западный узел – 21 мм/12ч; юго-западный – 33 мм/12ч; южный – 25 мм/12ч (рис. 11, верхняя панель справа). Прогноз со срока 15 ч МСК с заблаговременностью 18 ч (на ночь 6 июня) также подтверждал предыдущий прогноз:

в двух узлах севернее Москвы прогнозировались осадки 11 и 16 мм/12ч, южнее Москвы – 66 и 17 мм/12ч (рис. 11, нижняя панель).

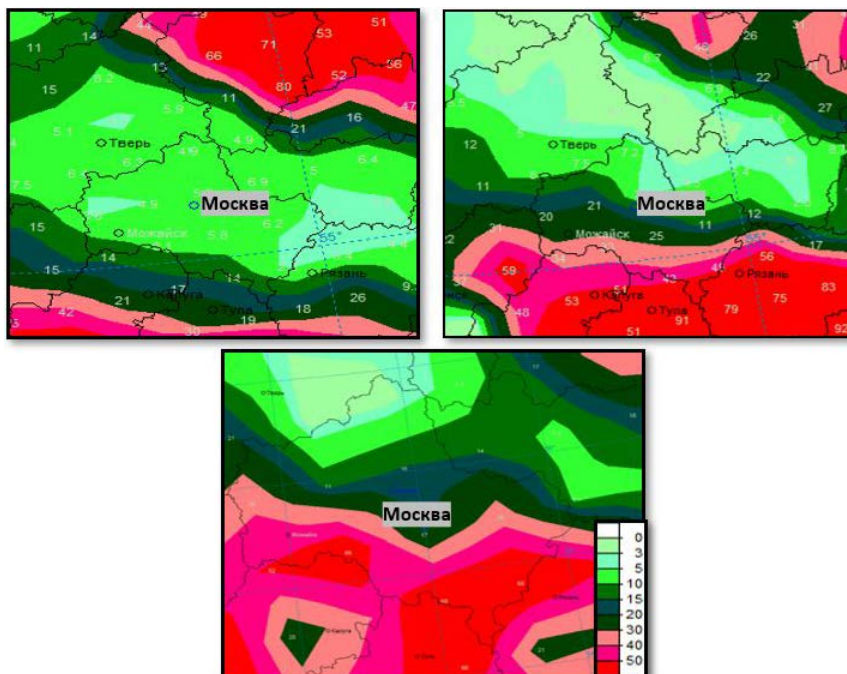


Рис. 11. Фрагменты карт максимального количества полусуточных осадков (мм/12ч) оперативного прогноза на основе данных региональной модели Гидрометцентра России от счета 03 ч МСК (верхняя панель) 05.06.2024: на день с заблаговременностью 18 ч (слева) и ночь (06.06.24) с заблаговременностью 30 ч (справа), а также от счета 15 ч МСК на ночь (06.06.24) с заблаговременностью 18 ч (нижняя панель).
Fig. 11. Fragments of maps of the maximum amount of semi-daily precipitation (mm/12h) of the operational forecast based on the data of the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia from the count of 03:00 Moscow time (upper panel) on June 05, 2024: for the day with a lead time of 18 hours (left) and night (06.06.24) with a lead time of 30 hours (right), as well as from the count of 15:00 Moscow time for the night (06.06.24) with a lead time of 18 hours (lower panel).

Анализ карт накопленных осадков за 1 час по экспериментальной технологии диагноза параметров конвекции, явлений и их интенсивности на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования, разработанной в Гидрометцентре России [9], показывает, что, начиная со срока 19.00 ч МСК рядом с Москвой образовались зоны повышенных ежедневных осадков, в срок 20.00 ч МСК зона практически в Москве. Карты интенсивности осадков с детализацией 10 минут также показывают, что в 20.10 ч МСК зона юго-восточнее Москвы достигала интенсивности осадков 12 мм/ч,

в 20.40 ч МСК зона на северо-западе достигла интенсивности 15–25 мм/ч. Интенсивность осадков, как и подобает согласно физике развития конвективного процесса, пульсировала, то ослабляясь, то возрастая. В 21.20 ч МСК зона практически накрыла Москву, интенсивность осадков составила 18–19 мм/ч, в 21.30 ч МСК – уже 20–24 мм/ч, в 21.40 ч МСК – опять снизилась до 18–19 мм/ч. На рис. 12 представлены фрагменты карт интенсивности осадков за срок 21.40 ч МСК и накопленных ежечасных осадков за период от 21 до 22 ч МСК.

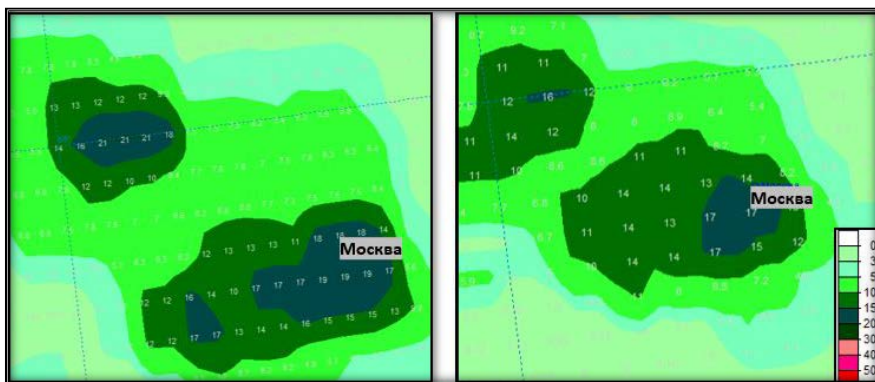


Рис. 12. Фрагменты карт осадков по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии Гидрометцентра России от 05.06.2024: в 21:40 ч МСК интенсивности осадков, мм/ч, (слева) и в 22 ч МСК накопленных ежечасных осадков, мм/ч (справа). Количество и интенсивность осадков даны в цветовой шкале и цифровых значениях.

Fig. 12. Fragments of precipitation maps based on radar diagnosis within the framework of the experimental technology of the Hydrometeorological Center of Russia from on June 05, 2024: at 21.40 Moscow time intensity (left) and at 22:00 Moscow time accumulated hourly (right). The amount and intensity of precipitation are given in a color scale and digital values.

Последовательный анализ карт, представленных в статье выборочно по срокам, близким к реализации фактического экстремального значения осадков на МС ВДНХ (в период 21.30 – 22 ч МСК) в количестве 49 мм/ч, показывает образование зоны интенсивных осадков (до 20–24 мм/ч, срок 21.30 ч МСК) и повышенных накопленных ежечасных осадков рядом с Москвой начиная со срока 20 ч МСК и до 22 ч МСК и дальнейшим снижением интенсивности осадков.

Анализ карт шквалов, включая карты максимальных порывов ветра при шквалах, полученных также по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии [4–6], показывает, что в период 21.20 – 21.40 ч МСК в Москве и на ближайшем расстоянии от нее диагностированы шквалы с порывами ветра 18 м/с. В 21.50 ч МСК зона с выявленными шквалами резко сократилась, а в 22.00 ч МСК уже не диагностировалась, что еще раз подтвердило локальность процесса в Москве. На рис. 13 представлены зоны со шквалами за сроки от 21.40 до 22.00 ч МСК. Таким

образом, зоны со шквалами, диагностированные по экспериментальной технологии, показали близкие по величине порывы ветра при шквале в сравнении со сроком реализации фактического шквала 19 м/с на МСВДНХ в 21.40 ч МСК. После 22.00 ч МСК зона, уменьшившись в размерах, отошла от Москвы.

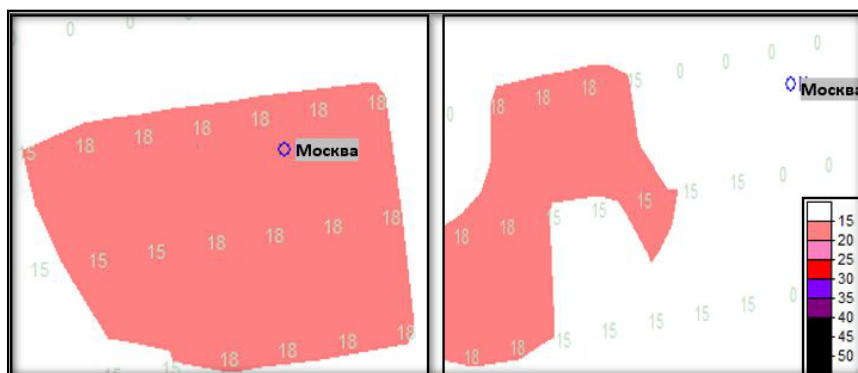


Рис. 13. Фрагменты карт скорости порывов ветра при шквалах (м/с) по радиолокационному диагнозу на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования в рамках экспериментальной технологии от 05.06.2024: 21.40 ч МСК (слева) и 22.00 ч МСК (справа). Численные значения максимальных порывов ветра при шквалах даны по цветовой шкале и в цифровых значениях.

Fig. 13. Fragments of speed maps (m/s) of wind gusts during squalls according to radar diagnosis based on DMRL-S network data and numerical modeling within the framework of experimental technology on June 05, 2024: at 21:40 Moscow time (left) and at 22:00 Moscow time (right). Numerical values of maximum wind gusts during squalls are given on a color scale and in digital values.

Исходя из представленных выше результатов можно сделать вывод, что оперативный прогноз максимального количества ливневых осадков на основе данных региональной модели Гидрометцентра России, несмотря на довольно грубое пространственное разрешение на сегодняшний день, правильно ориентировал на прогноз зон активной конвекции с интенсивными осадками и шквалами. Радиолокационный диагноз как осадков, так и шквалов в рамках экспериментальной технологии хорошо обнаруживает экстремальные значения осадков и порывов ветра. Результаты исследований еще раз показали, что в случаях сложности прогнозирования локальной конвекции рекомендуется в обязательном порядке переходить к мониторингу явлений и их интенсивности как по ближайшему к точке прогноза локалатору, так и по радиолокационному диагнозу в рамках экспериментальной технологии. При возникновении угрозы возникновения опасных конвективных явлений необходимо разрабатывать штормовое предупреждение по зоне ответственности прогноза с учетом данных локалаторов.

Хочется еще показать, как правильно использовать численную продукцию модели высокого разрешения COSMO-Ru2 при прогнозе конвективных явлений в летний период, особенно при угрозе возникновения явлений в градации ОЯ. Необходимо обязательно просматривать картографическую продукцию модели в случае, когда при грозовой деятельности спрогнозировано конвективное явление незначительной интенсивности (порывы ветра, интенсивность осадков). При этом следует проанализировать другие спрогнозированные сопутствующие факторы, например, наличие и значение конвективных индексов (молниевое потенциала, STP, SDI и т. п.) на картах в зоне ответственности прогноза, даже если при их интерпретации нельзя сказать о возникновении интенсивных конвективных явлений, так как может существовать вероятность повышения интенсивности конвективного явления при учете дополнительных факторов. Приведенный пример прогностической картографической продукции модели COSMO-Ru2 по количеству осадков и величине порывов ветра для 6 июня (рис. 14) наглядно показывает, что даже такая незначительная локализация конвективных явлений (слабых и умеренных) может привести к развитию интенсивных конвективных явлений в градации ОЯ.

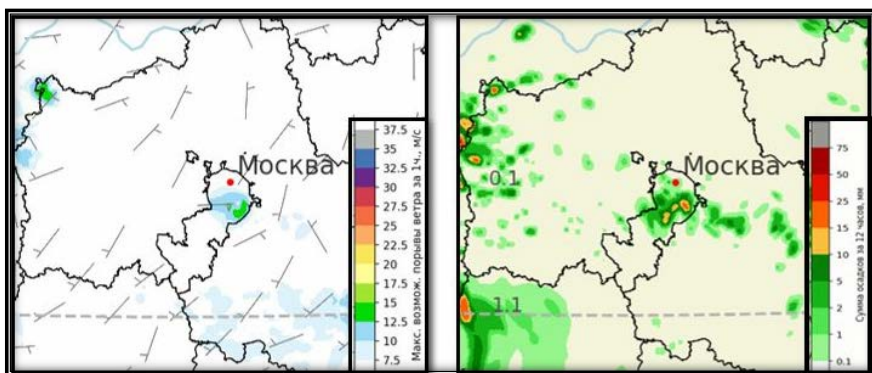


Рис. 14. Фрагменты прогностических карт модели COSMO-Ru2.2 от 03 ч МСК 05.06.2024: приземных порывов ветра, м/с, в 20 ч МСК (слева) и суммарного количества осадков, мм/12ч, в 21 ч МСК (справа). Выбраны сроки с прогнозируемыми максимальными значениями параметров, близкие к фактическому сроку реализации явлений.

Fig. 14. Fragments of forecast maps of the COSMO-Ru2.2 model from 03:00 Moscow time on June 05, 2024: surface wind gusts (mps) at 20:00 Moscow time (left) and total precipitation (mm/12h) at 21:00 Moscow time (right). The periods with predicted maximum values of parameters, close to the actual time of the phenomena, were selected.

В данном случае модель спрогнозировала вероятность количества осадков и максимальных порывов ветра в градации «сильные» (до 15 мм/12ч и 15 м/с) с некоторыми отклонениями: по расстоянию не более 30 км и по времени не более 1.5 ч, что для использования в оперативном прогнозе вполне приемлемо. В примере (рис. 14) приведены фрагменты

карт с прогнозируемыми максимальными значениями порывов ветра и суммарных осадков, близких к сроку реализации явлений (21 ч 40 мин МСК).

Случай сильных дождей, ливней и шквалов 20 июня 2024 года

20 июня 2024 года при прохождении холодного атмосферного фронта с волнами в Московском регионе наблюдались сильные дожди (15–39 мм/12ч), ливни (15–24 мм/ч), местами со шквалами (15–19 м/с по московскому мегаполису и до 26 м/с по АМС в Московской области) (см. табл. 1) (рис. 15).

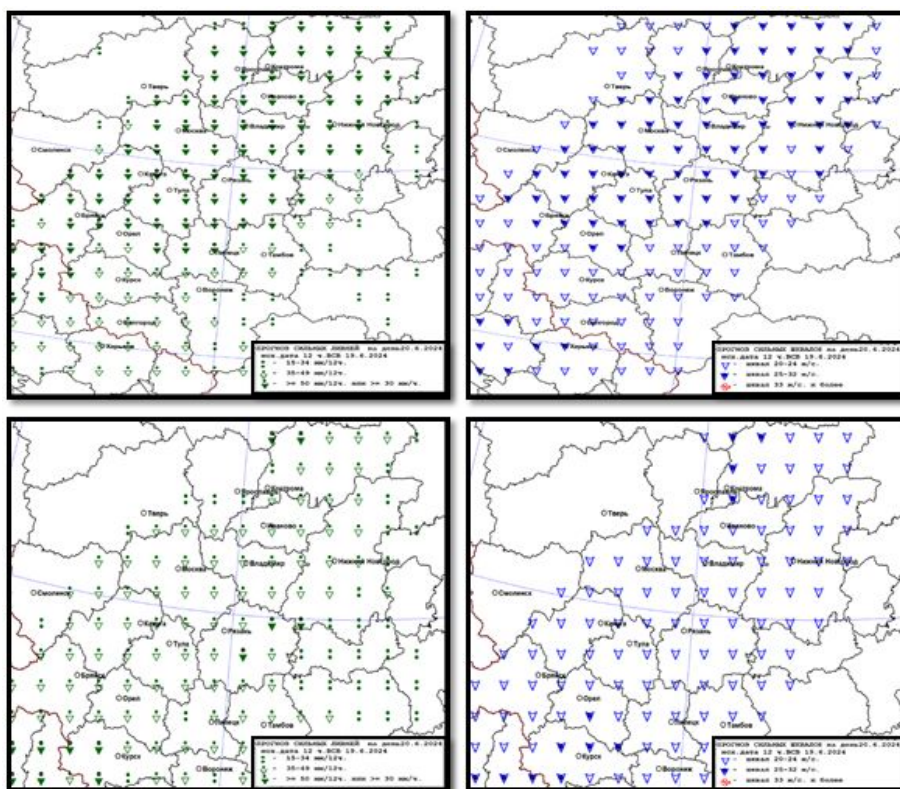


Рис. 15. Карты оперативных прогнозов сильных ливней (левая панель) и сильных шквалов (правая панель) по территории ЦФО с заблаговременностью 30 ч (верхняя панель) и 18 ч (нижняя панель) на 20.06.2024 на основе данных региональной модели Гидрометцентра России.

Fig. 15. Maps of operational forecasts of heavy rainfall (left panel) and strong squalls (right panel) for the Central Federal District with a lead time of 30 hours (upper panel) and a lead time of 18 hours (lower panel) on June 20, 2024 based on data from the regional model of the Hydrometeorological Center of Russia.

Этот случай можно назвать «классическим», так как прохождение холодного атмосферного фронта в дневное время летом достаточно хорошо

прогнозируется многими моделями, сложности могут быть лишь в определении количества осадков в градации ОЯ («очень сильные») и максимальных порывов ветра, имеющих локальный характер, вызванный местными условиями (чаще всего географического характера). Для COSMO-Ru2, ICON-EU7 и комплексного прогноза Гидрометцентра России по п. Внуково (см. рис. 4 справа) не было трудности прогноза такого процесса. Не составило трудности спрогнозировать процесс и методами прогноза сильных ливней и шквалов на основе данных региональной модели Гидрометцентра России [2, 6, 7] с уже не отвечающим современным требованиям пространственным разрешением. Прогнозы представлены на рис. 15. Видим, что с большей заблаговременностью прогнозировались ливни и шквалы большей интенсивности.

На рис. 16 и 17 представлены карты и фрагменты карт радиолокационного мониторинга в рамках экспериментальной технологии диагностики опасных конвективных явлений погоды в летний период года, Карты наглядно показывают возможности технологии на примере случая 20.06.2024: максимальные конвективные скорости (м/с) за срок 10.30 ч ВСВ и количество осадков за дневной период (мм/12ч) 20.06.2024, диагностированные также в рамках экспериментальной технологии (рис. 16); карты скорости порывов ветра при шквалах по ЕТР, поступающие синоптикам в оперативном режиме, и фрагменты карт скорости порывов ветра с уточнением максимальной скорости порывов ветра по Московскому региону, визуализированные пакетом Изограф, для наглядности за сроки 09.30 и 10.30 ч ВСВ, близкие к моменту фактических шквалов представлены на рис. 17.

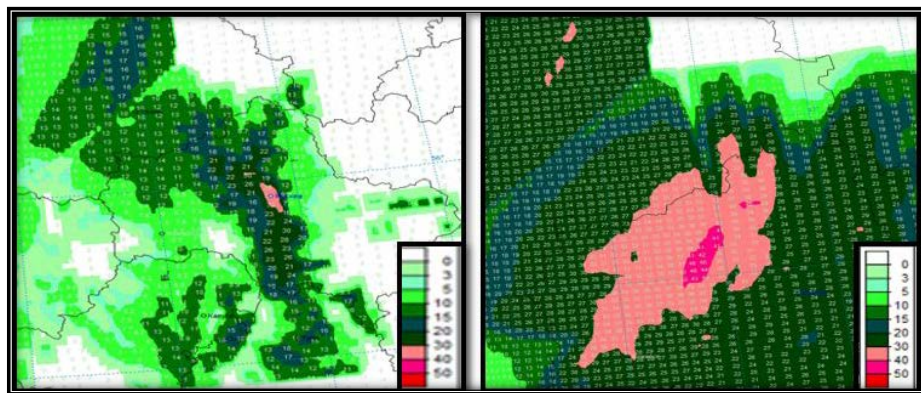


Рис. 16. Фрагменты карт 20.06.2024: максимальной конвективной скорости, м/с (слева); количества осадков, мм/12ч, за дневной период 09–21 ч МСК (справа).

Fig. 16. Fragments of maps on June 20, 2024: maximum convective velocity (mps) on the left and precipitation amount (mm/12h) for the daytime period 09–21 Moscow time (on the right).

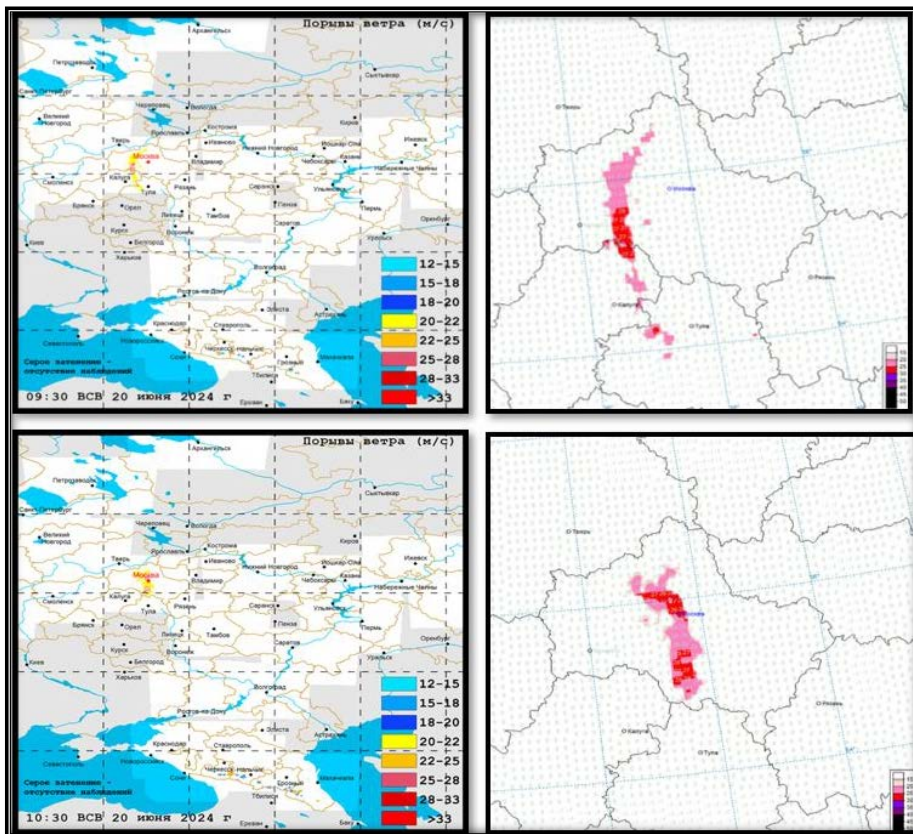


Рис. 17. Карты по ЕТР и фрагменты карт по Московскому региону диагностики скорости порывов ветра при шквале 20.06.2024: поступающие в оперативном режиме (слева), визуализированные пакетом Изограф (справа) за сроки 09.30 и 10.30 ч ВСВ, близкие к фактическим шквалам.

Fig. 17. Maps for the ETR and fragments of maps for the Moscow region of diagnostics of wind gust speed during the squall on June 20, 2024: on the left, received in real time, on the right, visualized by the Izograf package, for the periods of 09:30 and 10:30 UTC, close to the actual squalls.

Выводы

Анализ процессов и результатов расчетов численных прогнозов моделей по представленным в сравнении случаям опасных конвективных явлений 5–6.06.2024 и 20.06.2024 показал сложность прогноза 5–6 июня, связанную с локальностью порождающих их процессов, как по площади охвата, так и во временном масштабе. Опасные конвективные явления (ливни и шквалы) при подобных процессах могут быть спрогнозированы в первом приближении по результатам автоматизированных прогнозов на основе данных региональной модели Гидрометцентра России несмотря на недостаточное на данное время разрешение. Следует заметить, что и

фронтальные случаи этими методами прогнозируются с достаточной точностью. Методы прошли оперативные испытания и были рекомендованы к внедрению решениями ЦМКП Росгидромета. Вероятность возникновения этих явлений для прогноза по своей зоне ответственности нужно уточнять с использованием мезомасштабных моделей, при наличии – лучше COSMO-Ru2, усваивающей данные радиолокаторов. Для выпуска штормового предупреждения о ливнях и шквалах, особенно вызванных процессами внутримассового характера, следует переходить к мониторингу радиолокационной информации с использованием радиолокационного диагноза как ближайшего локатора, так и экспериментальной технологии диагностики параметров конвекции, сильных конвективных явлений (ливней, шквалов и града) и их интенсивности, включая градацию ОЯ.

Нужно учитывать, что подобное штормовое предупреждение при внутримассовом конвективном процессе может быть выпущено не более чем за 1–3 часа до реализации максимальной интенсивности явления. При этом нужно обращать внимание на скорость «созревания» такой зоны активной конвекции или суперячейки, при этом, соответственно, анализировать высоту и водность облака, интенсивность осадков и возможность их дальнейшего роста, использовать возможности анимации диагностированных продуктов экспериментальной технологии диагностики за последние 2 часа. По наблюдениям за конвективными процессами на практике и учету эмпирической зависимости [14] известно, что если в течение последующих 10 минут от момента наблюдения высота кучево-дождевого облака увеличивается, то, соответственно, увеличивается мощность процесса и усиливается интенсивность явлений, сопутствующих ему. Только учитывая всю совокупность классических общепринятых подходов и современного инструментария, прогнозов численных моделей и методов, радиолокационного мониторинга отдельных локаторов и сети ДМРЛ-С возможен достаточно точный прогноз и выдача своевременных штормовых предупреждений об опасных конвективных явлениях.

Список литературы

1. *Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // *Метеорология и гидрология.* 2009. № 5. С. 34-44.
2. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // *Метеорология и гидрология.* 2014. № 9. С. 5-15.
3. *Алексеева А.А.* Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов.* 2007. Информационный сборник № 34. С. 49-69.
4. *Алексеева А.А., Бухаров В.М.* Идентификация порывов ветра при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы.* 2024. № 2 (392). С. 25-50.
5. *Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М.* Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы.* 2021. № 3 (381). С. 6-23.

6. Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М. Прогноз сильных шквалов на Европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 47-64.

7. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С.127-143.

8. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 43-63.

9. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.

10. Вельтицев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 126 с.

11. Вельтицев Н.Ф. Теория мезомасштабных конвективных систем в атмосфере, наблюдаемых с искусственных спутников Земли: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр СССР, 1979.

12. Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Васильев А.А. Особенности прогноза максимальных порывов ветра у земли в холодный период года на примере московского региона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 2 (392). С. 51-63.

13. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет, 2019. 126 с.

14. Песков Б.Е. Расчет максимальной высоты верхней границы кучево-дождевых облаков с учетом вовлечения в различных синоптических условиях // Труды ВГИ. 1968. Вып. 11. С. 109-119.

15. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 704 с.

16. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды: Учебное пособие. СПб.: Изд. РГТМИ, 1996. 306 с.

References

1. Abdullaev, S.M., Zhelнин, A.A., Lenskaya, O.Y. Life cycle of mesoscale convective systems. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2009, vol. 34, pp. 285-292. DOI: 10.3103/S1068373909050033.

2. Alekseeva A.A. A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.

3. Alekseeva A.A. Metody prognoza maksimal'nogo kolichestva osadkov v zonah aktivnoy konveksii i alternativnogo prognoza sil'nykh livney i shkvalov. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov.* 2007. Informatsionnyy sbornik № 34, pp. 49-69 [in Russ.].

4. Alekseeva A.A., Bukharov V.M. Identification of wind gusts during a squall from the DMRL-C network and numerical modeling data. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 392, no.2, pp. 25-50 [in Russ.].

5. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no. 3, pp. 6-23 [in Russ.].

6. Alekseeva A.A., Vasil'ev E.V., Bukharov V.M. Forecast of severe squalls in the European part of Russia and their identification by Doppler weather radars. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 47-64 [in Russ.].

7. Alekseeva A.A., Losev V.M. Forecast of severe convective weather events in summer. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 127-143 [in Russ.].

8. *Alekseeva A.A., Losev V.M.* Forecast of heavy summer precipitation based on the output of a regional model of the Hydrometcenter of Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 43-63 [in Russ.].

9. *Alekseeva A.A., Peskov B.E.* Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].

10. *Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M.* Mezometeorologicheskie protsessy: Uchebnoe posobie. Moscow, Geograficheskiy fakul'tet MGU, 2007, 126 p. [in Russ.].

11. *Vel'tishchev N.F.* Teoriya mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem v atmosfere, nablyudaemykh s iskusstvennykh sputnikov Zemli: Diss. ... d-ra fiz.-mat. nauk. Moscow, Gidromettsentr SSSR, 1979 [in Russ.].

12. *Dmitrieva T.G., Smirnov A.V., Vasil'ev E.V.* Peculiarities of forecasting maximum surface wind gusts in the cold season: A case study for the Moscow region. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 392, no. 2, pp. 51-63 [in Russ.].

13. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Tret'ya redakciya, Moscow, 2019, 126 p. [in Russ.].

14. *Peskov B.E.* Raschet maksimal'noy vysoty verhney granitsy kuchevo-dozhdevykh oblakov s uchetom vovlecheniya v razlichnykh sinopticheskikh usloviyah. *Trudy VGI*, 1968, Vyp. 11, pp. 109-119 [in Russ.].

15. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody.* Chast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 702 p. [in Russ.].

16. *Rusin I.N., Tarakanov G.G.* *Sverhkratosrochnye prognozy pogody: Uchebnoe posobie.* SPb.: Izd. RGGMI, 1996, 306 p. [in Russ.].

*Поступила 28.10.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2025;
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 28.10.2024; approved after reviewing 27.03.2025;
accepted for publication 10.04.2025.*