

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-46-71>

УДК 551.509.5+551.515.9+551.501.8

Опыт тестирования экспериментальных методов Гидрометцентра России при составлении штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды

***Т.Г. Дмитриева, А.В. Смирнов,
А.А. Алексеева, Е.В. Васильев***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
tdsin777@mail.ru*

Анализируются результаты тестирования методов сверхкраткосрочного прогноза интенсивности осадков до 12 ч и порывов ветра до 2 ч, а также технологии диагноза опасных конвективных явлений на основе данных сети ДМРЛ-С для использования в оперативной практике составления штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды конвективного характера. Рассмотрены конкретные случаи синоптических ситуаций возникновения таких явлений. Представлены новые виды используемой картографической продукции численной модели с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2. Дана оценка полезности применения новых экспериментальных методов в оперативной практике.

Ключевые слова: неблагоприятные и опасные явления погоды, наукастинг, интенсивность осадков, шквал, порывы ветра, радиолокационный диагноз, ДМРЛ-С, численная модель COSMO-Ru2.2

Experimental Methods of Hydrometcentre of Russia for Producing Storm Warnings about Adverse and Severe Weather Events

***T.G. Dmitrieva, A.V. Smirnov,
A.A. Alekseeva, E.V. Vasil'ev***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
tdsin777@mail.ru*

The results of testing a method for very-short-range forecasting of precipitation intensity (for a period up to 12 hours) and wind gusts (up to 2 hours), as well as the technology for the diagnosis of severe convective events based on radar data for use in the operational practice of storm warning about adverse and severe convective weather events are analyzed. Case studies of synoptic conditions for the occurrence of such events are considered. New types of cartographic products of the COSMO-Ru2.2 high-resolution numerical model are presented. The benefit from using new experimental methods in operational practice is assessed.

Keywords: adverse and severe weather events, nowcasting, precipitation intensity, squall, wind gusts, radar-based diagnosis, DMRL-C, COSMO-Ru2.2 high-resolution numerical model

Введение

Сверхкраткосрочный прогноз (до 12 ч) и наукастинг (на 2–12 ч с шагом 10 мин) неблагоприятных и опасных конвективных явлений погоды [7] в летний сезон остается трудной задачей как для синоптика, так и для численного прогнозирования с высоким пространственно-временным разрешением [12]. Спрогнозировать точное время и место глубокой конвекции, а значит, и сопутствующих ей опасных конвективных явлений (сильных гроз, ливней, шквалов, града), даже имея представление о конкретных порождающих ее синоптических условиях, достаточно сложно.

Ввиду несовершенства научных знаний о процессах, связанных с сильными конвективными явлениями, могут быть полезны экспериментальные научные разработки в области прогнозирования и диагностики на основе комплекса имеющейся метеорологической информации: численного моделирования, результатов наблюдений, спутниковой, аэрологической, радиолокационной и грозопеленгационной информации, а также оценка полезности их применения.

Определенные сложности также вызывает прогноз сильного ветра в переходные периоды, когда наибольший вклад в усиление скорости ветра вносит приземное барическое поле с высокими градиентами, а также наличие струйных течений нижних уровней [1].

Согласно Наставлению [10], предупреждения об ОЯ (КМЯ), связанные с развитием конвекции (гроза в комплексе с другими конвективными явлениями, ливень, град, шквал), считаются эффективными, если оправдались и выпущены не менее чем за 1 ч до реализации явления, что связано с взрывным характером возникновения ОЯ и достижения им опасной стадии.

Сложность решения этой задачи обусловлена недостаточной точностью выходных данных современных численных прогнозов для определения времени, места возникновения и интенсивности опасного явления (особенно конвективного характера), редкостью сети наблюдений, недостаточной частотой поступления данных [11].

Для составления штормовых предупреждений необходим анализ синоптической обстановки, определяющей погоду региона [9]:

- приземных и барических карт погоды за 00 и 12 ч ВСВ;
- кольцевых и/или (при наличии) микрокольцевых карт с дискретностью 3 ч;
- данных радиозондирования;
- данных прогностического радиозонда для рассматриваемого региона на сайте Гидрометцентра России [13];
- доступных результатов численного прогноза погоды, включая опасные конвективные явления, сроком до 12 ч, особое внимание уделяя прогнозам моделей высокого пространственно-временного разрешения.

При наличии угрозы развития опасного явления конвективного характера (ОКЯ) прогноз детализируется наукастингом для уточнения места,

времени возникновения и интенсивности явления. Для уточнения детализированного прогноза фактическими данными применяется:

- спутниковая информация с дискретностью не реже 15 мин (на доступных ресурсах [14]);

- микрокольцевые карты, по возможности учащенные – через 1 час;

- наукастинг интенсивности осадков на 2 ч и 12 ч для ЕТР [сайты Гидрометцентра России, 15, 16];

- диагноз конвективных явлений по данным сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования для ЕТР (экспериментальная продукция storm.radar);

- радиолокационная информация как одиночного ДМРЛ-С, так и объединенной карты сети ДМРЛ ФГБУ «ЦАО» [17] с расчетом времени подхода осадкообразующей зоны с ОКЯ, а также с учетом представленной на карте совмещенной информации грозопеленгационной сети.

Таким образом анализируется развитие/трансформация ОКЯ. Рассмотрим подробнее предлагаемые методы и инструментарии.

Продукция моделей высокого разрешения COSMO-Ru

В Гидрометцентре России расширен ассортимент продукции численной модели COSMO-Ru с шагом сетки 6 и 2.2 км. Последний вариант – с высоким пространственно-временным разрешением с усвоением данных наземной сети наблюдений и доплеровских метеолокаторов ДМРЛ-С.

В моделях COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 визуализированы карты с наиболее распространенными и широко применяемыми индексами конвекции, способствующими распознаванию формирования опасных явлений конвективного характера (карты представлены на сайтах Гидрометцентра России [18, 19]):

- индекс доступной потенциальной энергии CAPE и ее различных вариаций;

- индекс молниевый потенциал LPI, показывающий молниевую активность, выраженную в цветовой шкале от 1 до 200 (Дж/м²) (рис. 1, левая панель); на карте опасных конвективных явлений соответствует явлению гроза (thunder);

- параметр сильных смерчей STP, основанный на термодинамическом подходе к прогнозу смерчей и смерчеопасных ячеек. Индекс используется для прогноза смерчей интенсивнее F2 по шкале Фуджиты – Пирсона. При STP>1 возможно формирование смерча (рис. 1, правая панель);

- индекс обнаружения суперячеек (SDI, 1/c), выражен в цветовой шкале от -0,009 до 0,009; позволяет определить знак вертикальных движений, т. е. вероятность возникновения суперячейки при положительных (восходящих) движениях и направление вращения в ячейке; рекомендуется при наличии таковой зоны рассматривать ее совместно с картой радиолокационной отражаемости (рис. 2, левая панель) и, для сопоставления, с картой опасных конвективных явлений (рис. 2, правая панель).

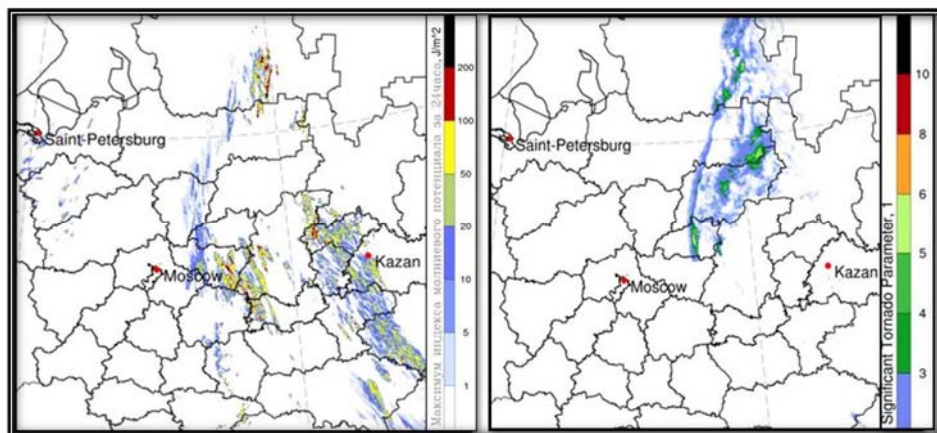


Рис. 1. Карты индексов конвекции на основе численных расчетов модели Cosmo-Ru2.2: индекс молниевоего потенциала LPI – слева, параметр сильных смерчей STP – справа. 29.07.2023, 18 ч МСК от счета 03 ч МСК.

Fig. 1. The maps of convective indices based on the Cosmo-Ru2.2 model simulations: LPI (Lightning Potential Index) (left) and STP (Significant Tornado Parameter) (right) for 18:00 MSC on July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run).

В моделях COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 помимо карт с индексами конвекции визуализированы карты:

– радиолокационной отражаемости (dBZ), шкала от -50 до 70 (рис. 2, левая панель);

– опасных конвективных явлений (осадки, порывы ветра и грозы различной интенсивности, грозы, сопровождающиеся градом и шквалом) в градации «сильные и очень сильные» (рис. 2, правая панель).

Для повышения качества прогноза неблагоприятных и опасных явлений в осенне-зимний период, когда наиболее актуальна угроза гололедных явлений, в том числе ледяного дождя, визуализирована карта фазы осадков (рис. 3). Три цветовых шкалы отражают вид фазы осадков: дождь, снег и смешанные осадки различной водности ($\text{кг}/\text{м}^2$). На основе данной карты, учитывая соответствующие синоптические условия, а для мегаполисов – и влияние городских «островков тепла», зная, что фазовое состояние осадков зависит в основном от высоты изотермической поверхности 0°C (или «нулевой изотермы») и температуры у поверхности Земли [2], прогнозист определяет тип возможных осадков (дождь, снег или смешанная фаза).

Рекомендуемые в Руководстве [2] и полученные для ЕТР на практике эмпирические зависимости показывают, что осадки выпадают в виде дождя или (при температуре воздуха у поверхности Земли ниже 3°C , на уровне поверхности ~ 925 гПа – ниже 0°C [2]) в виде мокрого снега и снега.

При модельном прогнозе (COSMO-Ru6.6 и COSMO-Ru2.2) значительных порывов ветра (15 м/с и более) и сильных ежечасных и/или полусуточных осадков оперативный синоптик переходит к более подробному анализу полей экспериментального наукастинга интенсивности осадков

(до 12 ч), наукастинга порывов ветра (до 2 ч), диагностической радиолокационной информации с учетом данных численной модели (storm.radar), а также более подробной синоптической информации по микрокольцевым картам.

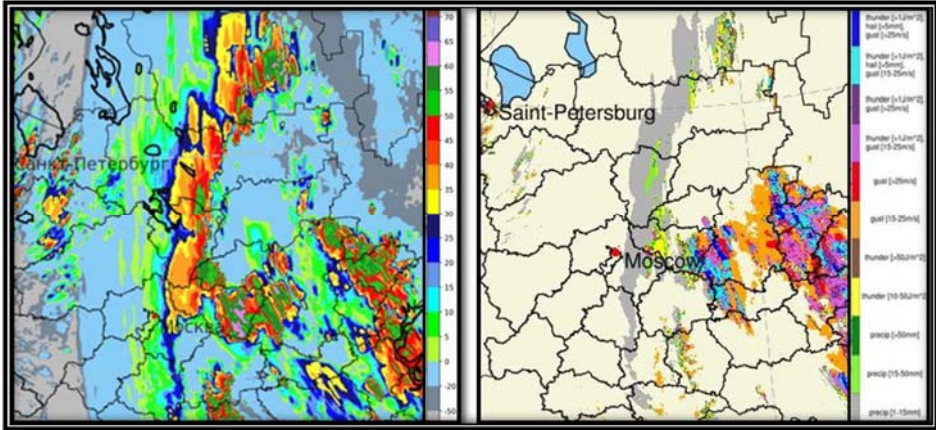


Рис. 2. Карты численных расчетов модели COSMO-Ru2.2: максимальной радиолокационной отражаемости – слева; опасных конвективных явлений – справа. 29.07.2023, 18 ч МСК от счета 03 ч МСК.

Fig. 2. The maps of the COSMO-Ru2.2 simulations: maximum radar reflectivity (left) and severe convective weather events (right) for 18:00 MSC on July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run).

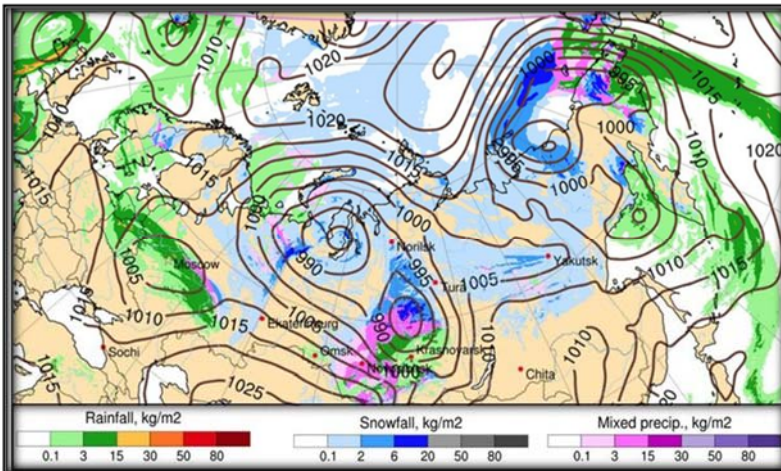


Рис. 3. Карта фазы осадков модели COSMO-Ru2.2 (цветовые шкалы отражают вид фазы осадков от дождя до снега) на примере прогноза на 12 ч к 23.10.2023 от счета 03 ч МСК.

Fig. 3. The COSMO-Ru2.2 precipitation phase forecast map (the color scales indicate the precipitation phases from rain to snow) for 12:00 MSC on October 23, 2023 (the 03:00 MSC model run).

Наукастинг (прогноз до 2 ч) максимальных порывов ветра (шквалов) с учетом данных численной модели высокого разрешения

В помощь оперативному синоптику предлагается экспериментальный наукастинг (прогноз до 2 ч) максимальных порывов ветра при шквалах на основе данных метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С и численного прогноза COSMO-Ru2.2 по территории Центрального федерального округа. В процессе разработки алгоритма и создания технологии и опытного испытания результатов наукастинга в режиме реального времени проводилось сопоставление полей данных наукастинга с фактическими данными наземных станций и сети грозопеленгаторов, а также анализ и реанализ ситуаций возникновения шквалов и усиления ветра за счет больших градиентов приземного давления и/или струйных течений нижних уровней до высоты изобарической поверхности 850 гПа [1]. Получены рекомендации, полезные оперативному прогнозисту при разработке штормовых предупреждений об опасных явлениях погоды конвективного характера.

На примере случаев шквалов в Поволжье 29.07.2023 и 07.10.2023 в аэропорту Внуково, ниже приведенных, рассмотрим возможности наукастинга для его использования при разработке штормовых предупреждений.

Случай ураганного ветра 29 июля 2023 года в Поволжье

29 июля регион Поволжья находился под влиянием обширной многоцентровой депрессии, включающей двухцентровый циклон, сформировавшийся 27 июля над Черным морем. В теплом секторе циклона, где регион находился 28 и 29 июля, на его юго-восточной стороне, где с юга подтекал влажный, теплый воздух, на поверхности 850 гПа отмечалась температура воздуха 19–21 °С, максимальная температура у поверхности Земли днем достигала 33–37 °С. В течение двух дней в регионе наблюдалась активная грозовая деятельность, сопровождавшаяся сильными шквалами, тропическими ливнями и в отдельных районах градом.

С прохождением холодного атмосферного фронта с волнами температура воздуха понизилась в целом на 9–10 °С. В табл. 1 приведены наиболее сильные/экстремальные фактические значения порывов ветра по региону, расчеты COSMO-Ru2.2, а также некоторые радиолокационные данные расчетных величин по ДМРЛ-С («Самара», «Казань», «Нижний Новгород»), которые могут указывать на идентификацию опасного конвективного явления «шквал».

В данной статье мы опускаем разбор других сопутствующих конвективных явлений (гроза, ливни, град), а сосредоточимся на шквалах, так как именно ими был нанесен значительный ущерб.

Таблица 1. Значения фактических и прогностических порывов ветра (м/с) и метеорологических и радиолокационных величин 29.07.2023 в регионе Поволжья
Table 1. The values of observed and predicted wind gusts (m/s) and meteorological and radar parameters in the Volga region on July 29, 2023

Район	МС, н/п	Время (ч МСК)	Max порыв факт., м/с	Max порыв COSMO м/с	Т°С	Тd°С	ΔТ/500, км	Δр/Зч, гПа	Нвго, км	Zmax, dBZ	Vil, кг/м ²	Явление по локатору
Самарская обл	Тольятти-Дамба	15.10-15.20	28,5	-	36,1	15	10,6	-1,1	13,7	55	33	град сильный
	Новодевичье	15.19-16.10	28	-	34,3	15	7,4	-1,2	13,7	57	36	град сильный
Ульяновская обл.	Сенпелей	15.58-16.25	25	-	36,6	12	11,9	-1,3	12,8	52	23	град сильный
	Ульяновск	16.20-16.35	26	23,4 (15 МСК)	34,1	13	12,3	-1,2	13,3	52	31	град сильный
Чувашия	Димитровград	16.50-16.55	27	17,9 (16 МСК)	35,3	14	8,4	-1,3	14,7	60	39	шквал умерен., град сильный
	Чебоксары	15.49	33	19,1 (15 МСК)	30,2	20	9,6	-1,1	15	60	80	шквал умерен., град сильный
Нижегородская обл.	Воскресенское	15.40-15.50	21	-	30,9	19	12,8	-0,7	13,7	58	26	шквал умерен., град сильный
	Бор	17-17.30	22	-	-	-	-	-	14	-	-	шквал слабый, град слабый
Татарстан	Нагорная часть		24	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Н.Новгород	~ 16.30	24,5- 28,4*	19,6 (18 МСК) 15,5 (11 МСК)	29,3	19	8,5	-0,8	15	65	76	шквал сильный, град сильный
	Б.Кайблцы	17.50	23	-	33,3	16	12,8	-1,0	14	55	40	град сильный
	Вязовые	18.18-18.26	27	-	31,2	20	8,9	-1,3	14,4	57	37	град сильный

Примечание. * Шкала Бофорта, данные интернет-источников. Обозначения: МС, н/п – метеостанция, населенный пункт; Т°С – температура воздуха у Земли в 12 ч МСК; Тd°С – температура точки росы в 12 ч МСК; ΔТ/500 – градиент приземной температуры воздуха на расстоянии 500 км; Δр – барическая тенденция; Нвго – верхняя граница Сb облачности; Zmax – максимальная отражаемость в Сb облаке; Vil – вертикальная интегрированная влажность облака.

Анализ табл. 1 подтверждает, что сильным приземным порывам ветра/шквалам, вызванным активной конвекцией, соответствуют максимальные значения параметров радиолокатора: максимальная отражаемость радиозеха 58–65 dBz, вертикальная интегрированная водность облака (32–80 кг/м²), высота кучево-дождевого облака 13–15 км. На карте метеоявлений ДМРЛ-С в пяти пунктах диагностированы шквалы, в трех случаях в градации «умеренный» и по одному – в градации «слабый» и «сильный».

Исследования состоявшихся конвективных явлений и реанализ условий возникающей конвекции, проведенные авторами за прошедшие летние периоды, в т. ч. в режиме реального времени, показали, что не все индексы конвекции являются необходимым и достаточным условием для реализации опасных конвективных явлений и, следовательно, для учета при разработке штормового предупреждения о них. Наиболее показательными расчетными параметрами являются доступная потенциальная энергия (CAPE, Дж/кг), указывающая на величину вероятной неустойчивости атмосферы в данной точке или более обширно – на некоторой площади (если считать репрезентативными данные радиозондирования на расстоянии до 250 км), соответственно, возможность реализации опасных конвективных явлений, а также индекс CIN, являющийся показателем наличия задерживающего слоя, тормозящего развитие конвекции, и часто взрывного возникновения ОЯ. Чаще всего CIN максимален в утренние часы, когда наблюдаются задерживающие слои инверсии или изотермии, но в летний период при дальнейшем прогреве солнечными лучами атмосферы он разрушается, давая ход реализации конвекции.

Конвективные индексы [4] можно проанализировать по данным радиозондирования, приведенным на сайте университета Вайоминга (США) [20] (табл. 2).

Все эти индексы рассчитываются моделями COSMO-Ru6 и COSMO-Ru2.2 (радиолокационные данные расчетных величин по ДМРЛ-С «Самара», «Казань», «Нижний Новгород») и в разной степени отражают конвективную неустойчивость воздушной массы: одни – в нижней тропосфере, но с учетом вертикальной протяженности влажного слоя воздуха (Ki), другие – на более высоком уровне до 500 гПа (Li), что может указывать на сильные восходящие потоки и, соответственно, развитие сильной грозовой деятельности.

Некоторые индексы являются комплексными: SWEAT и TT учитывают показатели нижней и средней тропосферы для прогноза опасных конвективных явлений, включая смерчи.

Из табл. 2 видно, что для рассматриваемого случая 29 июля 2023 года в Поволжье наиболее показательными являются значения индексов CAPE, CIN и Li.

В целом в регионе были необходимые и достаточные условия для развития активной конвекции, что и подтверждается фактическими данными о сильных порывах ветра/шквалах (см. табл. 1).

Таблица 2. Индексы конвекции по данным зондирования атмосферы в пг. Казань, Нижний Новгород и Самара (Безенчук) за 03 и 15 ч МСК 29.07.2023
Table 2. The convection indices according to the radiosonde data from Kazan, Nizhny Novgorod, and Samara (Bezenchuk) for 03:00 and 15:00 MSC on July 29, 2023

Индекс	Срок выпуска р/зонда, ч ВСВ						Критерий состояния атмосферы	
	00		12		Казань	Н.Новгород		Самара (Безенчук)
	Казань	Н.Новгород	Самара (Безенчук)	Казань				
CAPE, Дж/кг	1177	502	960	1632	143	1939	<1000 – слабая неустойчивость, вероятны грозы; 1000–2500 – умеренная неустойчивость, сильные грозы и ливни	
CIN, Дж/кг	238	180	228	0	300	98	0 – отсутствие воздействия задерживающего конвекцию слоя; <50 – слабое воздействие; 50-200 – умеренное воздействие; >200 – сильное воздействие	
Li, °C	-3	1	3	-5	-1	6	≥4 – абсолютная устойчивость; 2...3 – возможны изолированные Cu cong; 1...2 – слабая конвекция, наблюдаются Cu cong; -1...-2 – почти повсеместно слабые грозы, возможны шквалы; -3...-4 – вероятны сильные грозы, шквалы, возможен град; -4...-5 – повсеместно сильные грозы, град, шквалы, глубокая конвекция; -5...-6 – очень сильные грозы, наблюдается формирование суперячеек, крупный град, возможны смерчи	
TT, °C	51	49	47	49	50	47	48-49 – значительное количество гроз, некоторые сильные; 50-51 – сильные грозовые очаги, отдельные очаги с торнадо	
Ki, °C	36	34	30	25	32	31	25-30 – несколько гроз; 30-35 – рассеянные грозы	
Si, °C	-1	1	2	-0	-1	2	>0 – атмосфера устойчивая; -4...0 – атмосфера слабонеустойчивая	
SWEAT	203	147	128	166	219	155	<250 – нет условий для возникновения сильных гроз	

По приведенным показателям наиболее благоприятные условия для реализации сильных порывов/шквалов к 15 ч МСК сложились в районе г. Чебоксары (Республика Чувашия), а также в Ульяновской и Самарской областях (данные р/зондов пп. Казань и Самара). По картам метеоявлений и данным ДМРЛ-С «Нижний Новгород», «Казань», «Самара» в Нижнем Новгороде идентифицировался сильный шквал, в Казани и Самаре – сильный град (табл. 1). Величина CAPE в Нижнем Новгороде в оба срока соответствовала лишь слабой неустойчивости атмосферы и вероятностным грозам, а также сильному задерживающему конвекцию слою, показателем которого является CIN (табл. 2). И только индекс TT показывал на сильные грозовые очаги, отдельные очаги с торнадо.

Можно предположить, что некоторые шквалы все-таки могли быть не отмечены наземными метеостанциями или дополнительные условия для их реализации были не достаточны. Например, при общих благоприятных синоптических и термодинамических условиях (контрасты температуры воздуха на холодном фронте не менее 10 °С) (рис. 4) для реализации сильных порывов ветра/шквалов у поверхности Земли, наблюдавшихся в данном регионе – наличие высотного гребня тепла при антициклонической кривизне изогипс и их расходимости, сопровождавшееся значительным ослаблением ветра по потоку [3], что видно в данном примере на картах барической топографии АТ-850 и АТ-500 гПа (рис. 5), – условия расходимости изогипс были лучше для Республики Чувашии, Ульяновской и Самарской областей, чем для Нижегородской области.

Рассмотрим далее модельные расчеты данного случая.

Прогноз максимальных порывов ветра по COSMO-Ru2.2

Если рассматривать глобально прогноз максимальных порывов приземного ветра численной модели COSMO-Ru2.2, можно сказать, что модель хорошо спрогнозировала сильные ветры в Поволжье. На карте максимальных порывов ветра (рис. 6) видны зоны очень сильного ветра 30–35 м/с на юго-западе Республики Татарстан, до 30 м/с на юго-западе Республики Марий Эл, северо-востоке Нижегородской обл. и на юге Самарской области.

На карте максимальных порывов ветра с заблаговременностью суток можно видеть правильно рассчитанную зону с повышенными порывами ветра 20–25 м/с, локальными зонами 25–30 м/с и отдельными очагами максимальных порывов выше 30 м/с по всему региону Поволжья, который находился, как указывалось выше, под влиянием обширного двухцентрового циклона. При сравнении спрогнозированных очагов максимальных порывов ветра на картах часовой дискретности с фактическими видно, что модель правильно определила время максимальных порывов – с 13.30 до 18.30 ч МСК, пиковый максимум – около 16 ч МСК (МС Чебоксары порыв 33 м/с). Причем смещенность самого спрогнозированного очага максимального порыва (более 30 м/с) относительно факта 33 м/с на территории

Республики Чувашия – не более 100 км и до 150 км – от максимальных очагов 28 м/с в Самарской области.

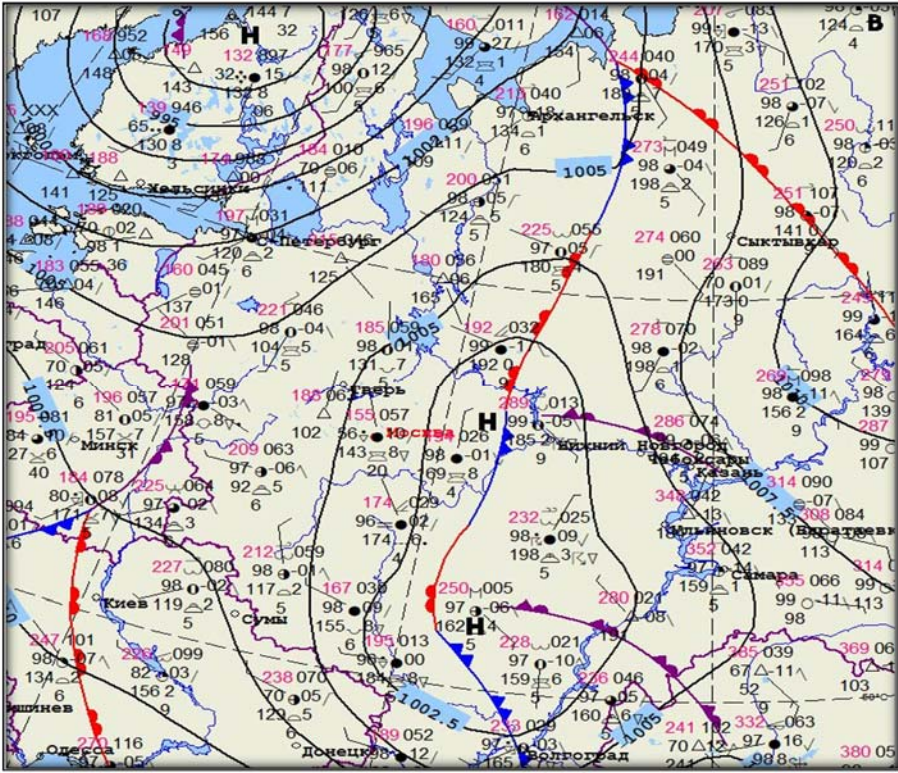


Рис. 4. Приземная карта погоды с фронтальным анализом за 12 ч МСК 29.07.2023.

Fig. 4. The surface weather chart with frontal analysis for 12:00 MSC on July 29, 2023.

Модельные прогнозы визуализируются также в графическом виде. На рис. 7 приведены спрогнозированные максимальные скорости ветра в сравнении с фактическими по четырем пунктам, где есть данные наблюдений наземных метеостанций, из чего следует, что представленные в конкретных точках (пунктах) значения спрогнозированных максимальных порывов ветра занижены относительно фактических максимальных порывов. Определяемые по цветовой шкале на рис. 6 зоны ближе по скорости к фактическим данным наземных метеостанций. Так, наиболее сопоставимы в графическом виде спрогнозированные и фактические порывы ветра по п. Ульяновск (26 м/с факт и 23 м/с прогноз, что вполне приемлемо для прогноза). Сравнения по остальным пунктам имеют значительно большие расхождения.

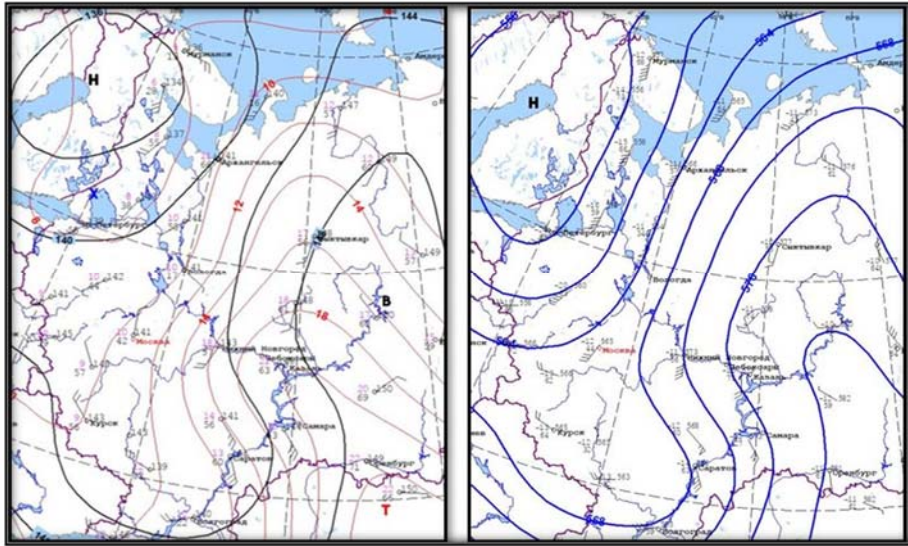


Рис. 5. Карты АТ-850 (слева) и АТ-500 (справа) за 15 ч МСК 29.07.2023. Цветом нанесены изолинии: изогипсы – черным на карте АТ-850; синим – на АТ-500; красным – изотермы на АТ-850 гПа.

Fig. 5. The 850 hPa (left) and 500 hPa (right) maps for 15:00 MSC on July 29, 2023. The isolines: the isohypses are black at 850 hPa and blue at 500 hPa; the isotherms at 850 hPa are red.

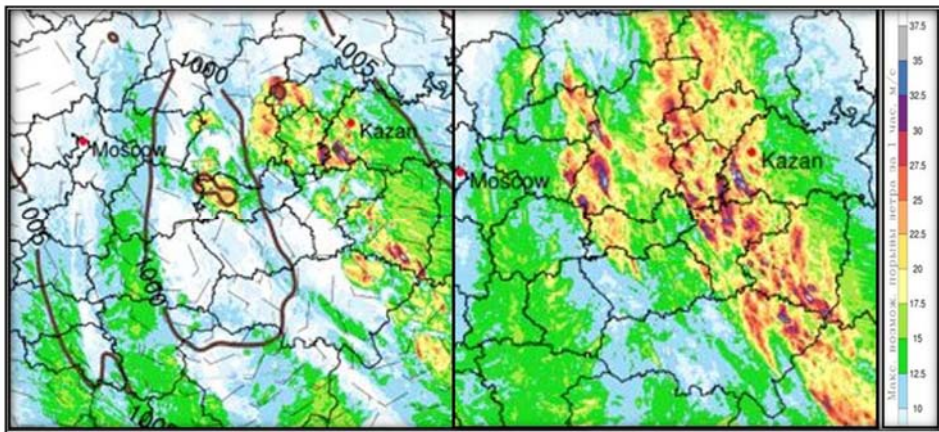


Рис. 6. Карты максимальных порывов ветра модели COSMO-Ru2.2 29.07.2023 от счета 03 ч МСК: на 16 ч МСК (слева), с суточной заблаговременностью (справа). Сила ветра отражена на цветовой шкале.

Fig. 6. The COSMO-Ru2.2 maps of maximum wind gusts for July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run): for 16:00 MSC (left), with a daily lead time (right). Wind speed is given on the color scale.

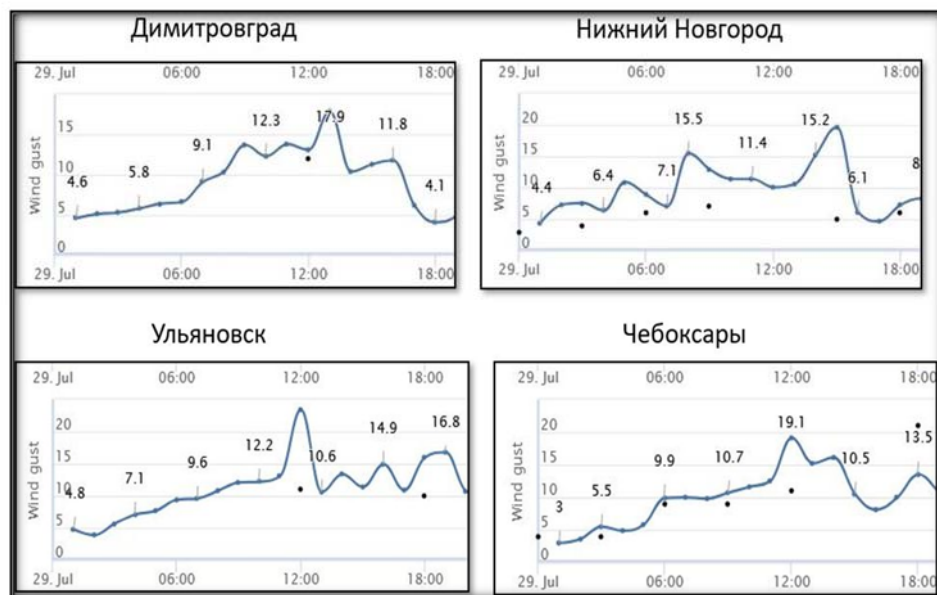


Рис. 7. Графическое представление численных расчетов максимальных порывов ветра модели COSMO-Ru2.2 29.07.2023 от счета 03 ч МСК по пунктам: Димитровград, Нижний Новгород, Ульяновск, Чебоксары. Синие линии – спрогнозированные порывы ветра; «жирные» точки без линий – фактические порывы.

Fig. 7. The graphic presentation of the COSMO-Ru2.2 numerical simulations of maximum wind gusts for July 29, 2023 (the 03:00 MSC model run) for four stations with available weather station observations: Dimitrovgrad, Nizhny Novgorod, Ulyanovsk, and Cheboksary. The blue lines are predicted wind gusts; the bold dots without lines are observed gusts.

Следует сделать вывод, что прогнозисту при разработке штормового предупреждения о сильном ветре при шквале следует прежде всего, кроме обязательной оценки синоптической ситуации, анализировать карты максимальных порывов ветра расчетов модели с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2, при этом понимая, что если модель прогнозирует очаги максимальных порывов ветра в соседних к пункту прогноза областях, особенно перемещающихся по воздушному потоку, то следует уточнять для пункта/района прогноза скорости по графическому материалу. Следует учитывать также известные благоприятные термодинамические условия – температура воздуха 25–30 °С, точка росы 16–20 °С, значительные величина падения давления и контрасты температуры воздуха на фронте. Сравнение фактических и модельных прогностических максимальных порывов ветра см. в табл. 1.

В помощь оперативному синоптику также предлагается экспериментальный наукастинг порывов ветра до 2 ч, построенный по данным сети

локаторов ДМРЛ-С на ЕТР и модели COSMO-Ru2.2, пример которого для 29.07.2023 по территории региона Поволжья приведен ниже.

Наукастинг порывов ветра до 2 ч по региону Поволжья 29.07.2023

По приведенным на рис. 8 картам наукастинга порывов ветра видно, что в регионе Поволжья правильно воспроизведены сильные порывы ветра: по региону в основной градации 15–20 м/с (зеленый цвет) с очагами 20–25 м/с (желтый цвет) и 25–30 м/с (оранжевый цвет), с максимальным очагом в Нижегородской области более 30 м/с (красный цвет). Однако не показан наиболее сильный ветер 26 м/с с порывом 33 м/с в районе МС Чебоксары, хотя на юго-западе Республики Чувашия отражены порывы до 30 м/с и область максимального порыва смещается в Нижегородскую область из района Чебоксар, то есть край расчетной области не всегда может позволить воспроизвести ситуацию.

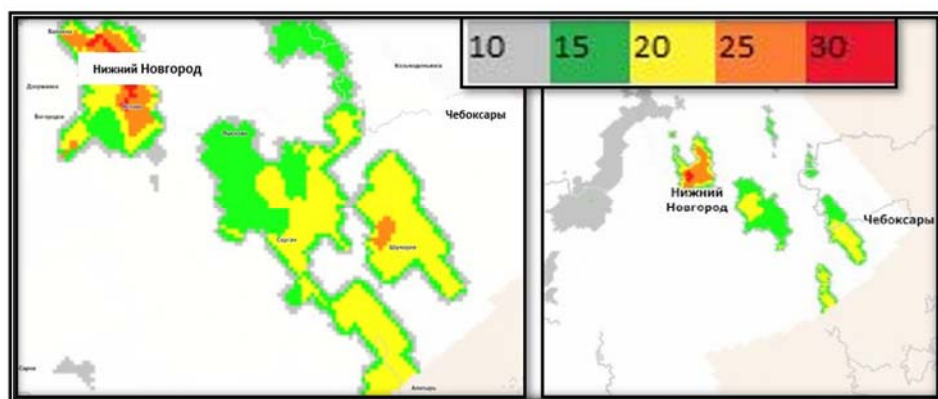


Рис. 8. Пример наукастинга Гидрометцентра России порывов ветра на 13.30 ч МСК (слева) и 14.20 ч МСК (справа) 29.07.2023. Величина порывов ветра определяется по цветовой шкале.

Fig. 8. The example of wind gust nowcasting (Hydrometcentre of Russia) for 13:30 (left) and 14:20 MSC (right) on July 29, 2023. Wind gusts are determined by the color scale.

Случай шквала с порывами до 26 м/с в аэропорту Внуково 7 октября 2023 года

На примере случая шквала в Московском регионе 07.10.2023 (аэропорт Внуково в 19.22 ч МСК), когда наблюдательной сетью был зафиксирован максимальный порыв ветра 26 м/с, покажем применение наукастинга порывов ветра на 2 ч и результаты его погрешности в отображении максимальных порывов при данной синоптической ситуации.

Этот случай связан со струйным течением нижних уровней (СТНУ) [1], характерным при прохождении системы атмосферных фронтов (рис. 9). СТНУ располагается перед фронтом в теплом влажном воздухе теплого сектора циклона с максимумом составляющей скорости ветра, параллельной фронту. В качестве критерия выделения скорости СТНУ, подобного критерию ВМО для струйного течения в свободной атмосфере, в некоторых источниках используют скорость от 15 м/с. СТНУ способствует возникновению и усилению порывов ветра у земли даже до градации опасного явления погоды. На рис. 9 (правая панель) приведена карта барической топографии АТ-850, где показано, что южнее Москвы наблюдается СТНУ со скоростью 25 м/с (данные радиозонда для п. Москва – Долгопрудный отсутствуют).

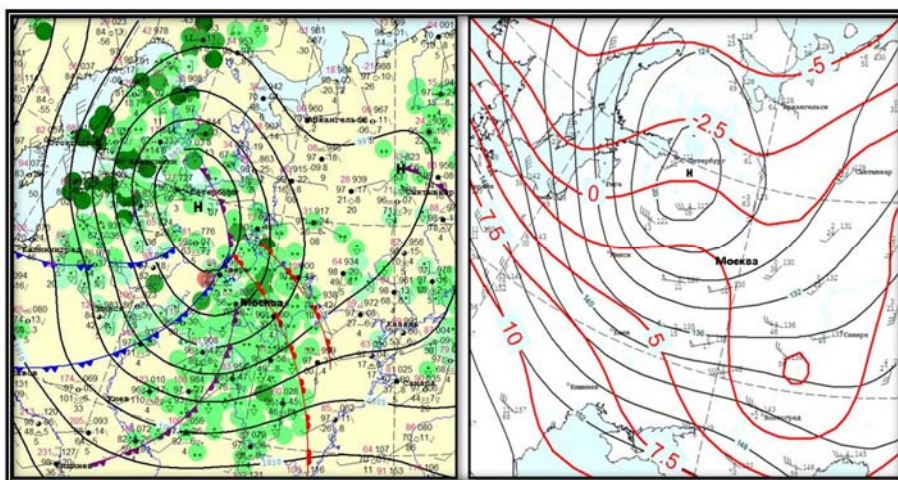


Рис. 9. Карта погоды с фронтальным анализом за 18 ч МСК (слева) и барической топографии АТ-850 за 15 ч МСК (справа) 07.10.2023. Черным цветом нанесены изобары и изогипсы, красным – изотермы; треугольники в оперении значений скорости ветра на карте АТ-850 обозначают скорость ветра 25 м/с.
Fig. 9. The weather map with frontal analysis for 18:00 MSC (left) and 850 hPa map for 15:00 MSC (right) for October 7, 2023. The isobars and isohypses are black, the isotherms are red; the triangles in the wind speed symbols on the 850 hPa map mark the wind speed of 25 m/s.

По данным ДМРЛ-С «Внуково», в 19.20 ч МСК в районе аэропорта Внуково находился ливнеопасный очаг с максимальной интенсивностью осадков 15–20 мм/ч (рис. 10), высотой кучево-дождевой облачности локально до 8 км и максимальной отражаемостью (рис. 10 и 11), что может быть соотнесено с критериями явления «шквал» для переходного периода, которые еще не прописаны для этого периода в Инструкции [5]. На рис. 11 приведен вертикальный разрез кучево-дождевого облака, на котором локальная зеленая зона соответствует максимальной отражаемости облака

$Z_{max}=51$ dBz, что является высоким значением для осеннего (переходного) периода года, когда мощность конвекции и значения параметров кучево-дождевой облачности (высота, отражаемость, интенсивность ливневых осадков) уже не столь значительны, как в летний период, и для возникновения такого опасного явления, как шквал более 25 м/с, нужны дополнительные «триггеры», чем и явился ливневой очаг с интенсивностью локально до 10 мм/ч и СТНУ [1], вызвавшие в конкретном месте сильный шквал.

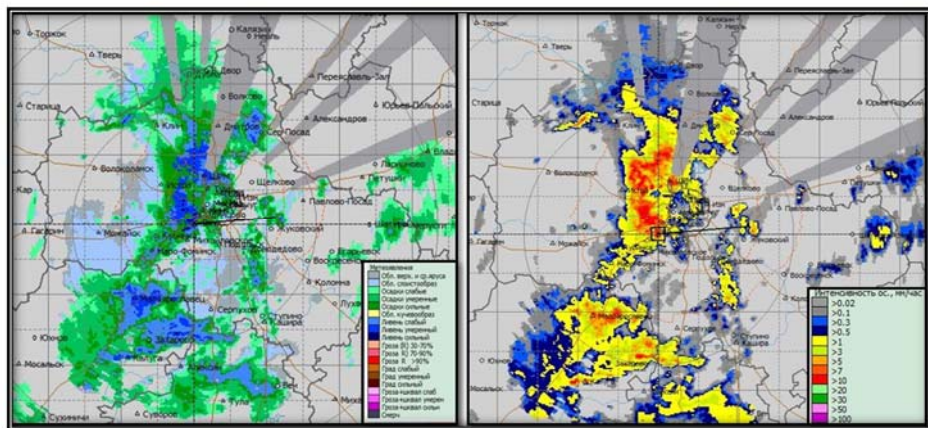


Рис. 10. Фрагменты карт ДМРЛ-С «Внуково» 07.10.2023 в 19.20 ч МСК: явлений (слева) и интенсивности осадков (справа). Градации метеоявлений и интенсивность осадков даны по цветовым шкалам.

Fig. 10. The fragments of the Vnukovo Doppler weather radar for 19:20 MSC on October 7, 2023: weather events (left) and precipitation intensity (right). The gradations of weather events and precipitation intensity are given on the color scale.

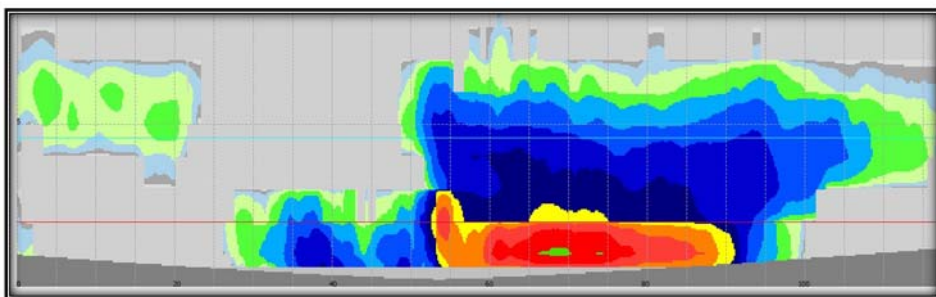


Рис. 11. Вертикальный разрез облачности по ДМРЛ-С «Внуково» в 19.20 ч МСК 07.10.2023. Локальная зеленая зона в нижнем слое соответствует максимальной отражаемости кучево-дождевого облака $Z_{max}=51$ dBz.

Fig. 11. The vertical section of cloudiness according to the Vnukovo Doppler weather radar for 19:20 MSC on October 7, 2023. The local green zone in the lower layer corresponds to the maximum reflectivity of a cumulonimbus cloud $Z_{max}=51$ dBz.

На рис. 12 приведен фрагмент карты наукастинга на 2 ч порывов ветра в 19.10 ч МСК 07.10.2023. Видно, что в районе п. Наро-Фоминск находилась зона сильного ветра со скоростью 15–20 м/с, которая по воздушному потоку двигалась к аэропорту Внуково, где и был зафиксирован шквал 26 м/с. Далее, согласно наукастингу, порывы ветра ослабевали при подходе к центральной части Москвы. В целом днем по Москве и Московской области наземной наблюдательной сетью были зафиксированы порывы ветра 12–18 м/с, что вполне соответствует прогнозам наукастинга. По данному случаю можно сделать вывод, что прогноз наукастинга имел погрешность по территории прогноза до 70 км и до 1 ч по времени осуществления максимального порыва. Но если рассматривать прогноз в целом по региону, то градация ветра 15–20 м/с была отображена правильно. Видимо, для прогноза максимальных порывов ветра в конкретном пункте необходим учет, кроме всех приведенных выше доводов, местных локальных условий, а именно: открытость местности (на полосе аэродрома Внуково) и совпадение в одно время всех условий (сильный ливнеопасный очаг и прохождение СТНУ).

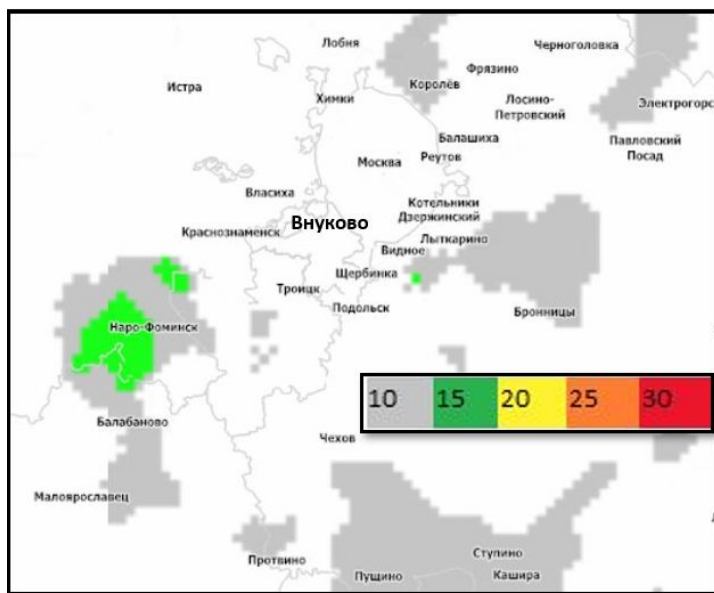


Рис. 12. Фрагмент карты наукастинга порывов ветра в 19.10 ч МСК 07.10.2023. Зеленая зона – порывы ветра зоны, двигающейся по направлению к п. Внуково, соответствующие по цветовой шкале скорости 15-20 м/с.

Fig. 12. The fragment of the wind gust map for 19:10 MSC on October 7, 2023. The green zone is wind gusts of the zone moving towards Vnukovo corresponding to the wind speed of 15-20 m/s on the color scale.

Если рассматривать модельные прогнозы с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2, COSMO-Ru6 и ICON-EUR7 порывов ветра в графическом виде на день 07.10.2023 от счета 03 ч МСК, порывы по п. Внуково до 18 м/с спрогнозированы только моделью COSMO-Ru6; прогнозы COSMO-Ru2.2 и ICON-EUR – 7–13 м/с (рис. 13). Следует вывод, что прогноз сильного ветра в переходный период также затруднителен для моделей с высоким пространственно-временным разрешением, когда и величины предикторов значительно снижены относительно летних критериев. Поэтому для разработки штормовых предупреждений о сильном ветре синоптику в оперативной работе необходимо пользоваться всеми имеющимися в наличии прогностическими инструментариями.

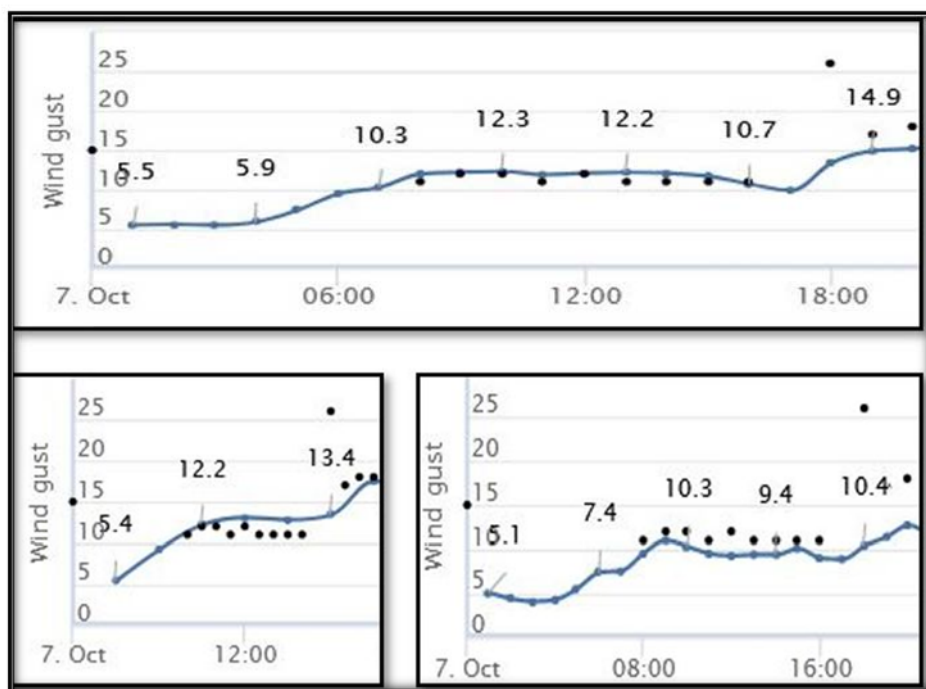


Рис. 13. Прогноз порывов ветра на день 07.10.2023 от счета 03 ч МСК: COSMO-Ru2.2 (вверху), COSMO-Ru6 (внизу слева), ICON-EUR7 (внизу справа). Синие линии – спрогнозированные порывы ветра; «жирные» точки без линий – фактические порывы.

Fig. 13. The forecast of wind gusts for the daytime on October 7, 2023 (the 03:00 MSC model run): COSMO-Ru2.2 (top), COSMO-Ru6 (bottom left), ICON-Eur7 (bottom right). The blue lines are predicted wind gusts; the bold dots without lines are observed gusts.

В целом анализ сравнения прогноза сильных порывов ветра по предлагаемому экспериментальному наукастингу, проведенный за прошедший

летне-осенний период, можно считать удачным и рекомендуемым для применения в оперативной практике после получения результатов верификации и доработки.

Наукастинг интенсивности осадков до 12 ч

Еще один вид наукастинга, предлагаемый оперативному синоптику Гидрометцентром России – это экспериментальный вариант наукастинга интенсивности осадков на базе модельного прогноза COSMO-Ru2.2 до 12 ч с использованием полей осадков по радарным данным. Технология использования модели с высоким пространственно-временным разрешением позволила увеличить срок прогноза интенсивности осадков до 12 ч. С помощью анимации отслеживается процесс в движении с видимой трансформацией зон интенсивности осадков, что дает возможность оперативному синоптику корректировать и уточнять прогнозы и консультации о неблагоприятных и опасных явлениях погоды по территории ЕТР, где есть покрытие радиолокационной сетью ДМРЛ-С.

Приведем пример консультации о комплексе неблагоприятных метеорологических явлениях, связанных с развитием конвекции, по московскому мегаполису с использованием наукастинга об интенсивности осадков с заблаговременностью до 12 ч, с помощью которого был рассчитан подход к мегаполису зоны осадков на холодном атмосферном фронте с грозами на день 18.07.2023. Утром был выпущен детализированный прогноз погоды (рис. 14): ожидался кратковременный дождь до 14 мм, местами ливень до 20 мм начиная с 12–15 ч МСК при прохождении через регион холодного атмосферного фронта с грозами.

БЮЛЕТЕНЬ ПОГОДЫ №199/д по территории г. Москва на день на период с 09.00 до 21.00 18 июля 2023 года				
Прогноз метеоусловий				
День: 09.00-21.00	Облачно с прояснениями. Кратковременный дождь, местами ливень (количество осадков 7-14 мм, местами до 20 мм). В отдельных районах гроза, град. Максимальная температура воздуха 26...28°C. Ветер юго-западный 5-10 м/с, при грозе местами порывы 15-20 м/с.			
Время (мск)	09 ⁰⁰ -12 ⁰⁰	12 ⁰⁰ -15 ⁰⁰	15 ⁰⁰ -18 ⁰⁰	18 ⁰⁰ -21 ⁰⁰
Состояние погоды				
Кол. осадков (мм)	-	0.5	7.5	12
Температура воздуха (°C)	23...25	26...28	22...24	18...20
Направление ветра	ЮЗ	ЮЗ	ЮЗ	ЮЗ
Скорость ветра (м/с)	5-8	6-9	6-9	7-10
Порывы ветра (м/с)	-	-	15	20

Рис. 14. Пример детализированного прогноза погоды по московскому мегаполису на день 18.07.2023.

Fig. 14. The example of the detailed weather forecast for the Moscow megalopolis for the daytime on July 18, 2023.

Дежурный синоптик выпустил консультацию о неблагоприятных явлениях погоды, в совокупности образующих «комплекс неблагоприятных явлений»: гроза, ливень, сильный ветер, град (рис. 15). На рис. 16 приведены карты наукастинга интенсивности осадков по Центральному федеральному округу.



Рис. 15. Пример консультации о КМЯ по московскому мегаполису на день 18.07.2023, выпущенной в 11.40 ч МСК.

Fig. 15. The example of the consultation about the complex of weather events for the Moscow megalopolis for the daytime on July 18, 2023 issued at 11:40 MSC.

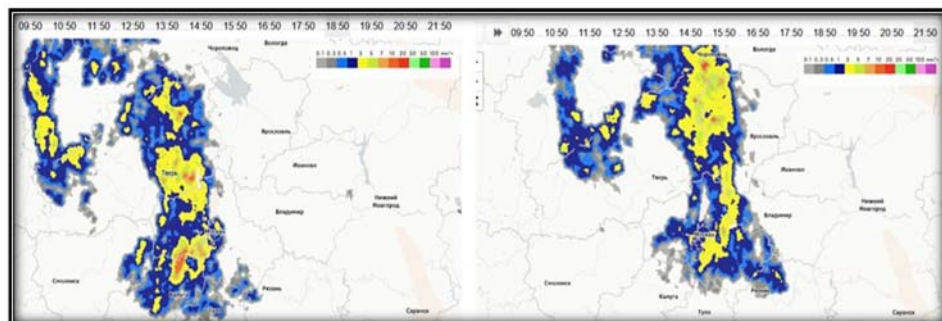


Рис. 16. Фрагменты карты наукастинга интенсивности осадков на 12 ч по ЦФО 18.07.2023 от счета 09.50 ч МСК в 18.50 ч МСК (слева) и 21.50 ч МСК (справа). Интенсивность осадков показана по цветовой шкале.

Fig. 16. The fragments of the 12-hour precipitation intensity nowcasting map for the Central Federal District at 18:50 (left) and 21:50 MSC (right) on July 18, 2023 (the 09:50 MSC model run). The precipitation intensity is shown on the color scale.

Сравнивая зоны интенсивности осадков карт наукастинга (рис. 16) и сети ДМРЛ-С (рис. 17) прежде всего по площади и конфигурации, видно, что наукастинг хорошо отразил именно центральную зону основного холодного фронта, проходившего широкой полосой в 18 ч МСК через московский регион и весь Центральный федеральный округ протяженностью с юга на север и смещением на северо-восток (рис. 18). При более детальном рассмотрении видно, что на карте наукастинга зона осадков интерпретируется одной широкой полосой, тогда как на карте

ДМРЛ-С – в виде нескольких полос различной интенсивности, локально более сильной, чем предлагает наукастинг. Кроме того, наукастинг дает некоторое запаздывание прохождения п. Москва. Надо понимать, что на зону осадков может сильно оказывать влияние сам московский мегаполис, активизируя или размывая ее в зависимости от интенсивности атмосферного фронта, времени года, суток и направления перемещения. Модель не всегда точно может спрогнозировать трансформацию зоны осадков. Однако если смотреть в целом на процесс и возможность заблаговременной разработки штормового предупреждения, предлагаемый экспериментальный наукастинг является хорошей помощью для оперативного синоптика.

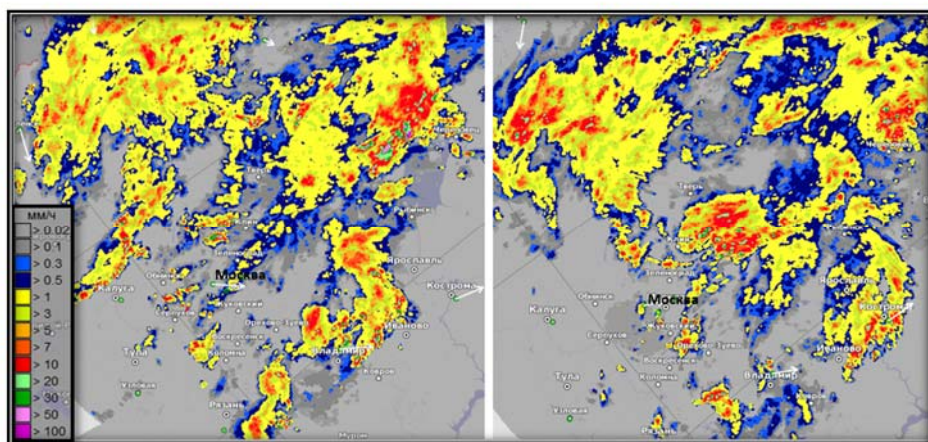


Рис. 17. Фрагменты объединенной карты интенсивности осадков сети ДМРЛ-С на сайте «Метеорад» 18.07.2023 в 18.50 ч МСК (слева) и 21.50 ч МСК (справа). Интенсивность осадков показана по цветовой шкале.

Fig. 17. The fragments of the Doppler weather radar network composite precipitation intensity map at the Meteorad website at 18:50 (left) and 21:50 MSC (right) on July 18, 2023. The precipitation intensity of is shown on the color scale.

Что касается наукастинга порывов ветра по данному случаю, также можно отметить, что по карте была видна подходящая к московскому мегаполису (на рис. 19) зона сильного ветра 15–20 м/с (зеленый цвет) с локальной областью 20–25 м/с (желтый цвет), связанная с прохождением через регион холодного атмосферного фронта. Правильность и своевременность выпуска консультации о комплексе неблагоприятных явлений погоды подтверждается фактическими данными по осадкам и порывам ветра, зафиксированным в мегаполисе (местами сильные осадки 16–23 мм за день, порывы ветра до 15–17 м/с).

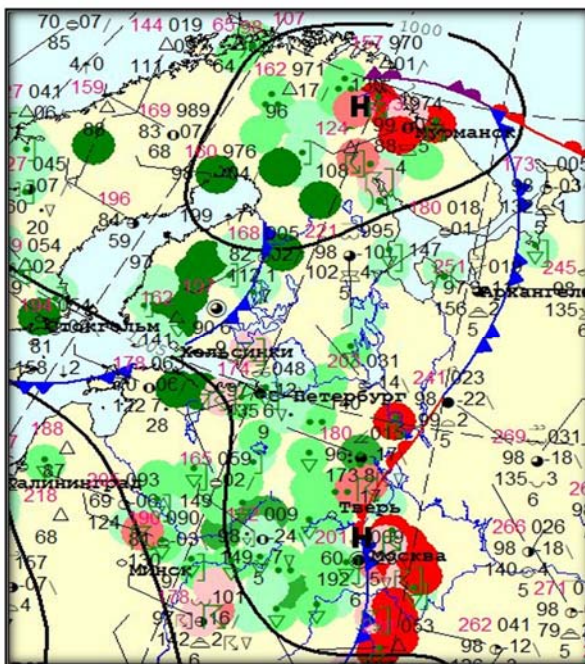


Рис. 18. Фрагмент карты погоды с фронтальным анализом за 18 ч МСК 18.07.2323 с выделенными цветом явлениями погоды: красным – грозы, зеленым – осадки.

Fig. 18. The fragment of the weather chart with frontal analysis for 18:00 MSC on July 18, 2023 with colored weather phenomena: thunderstorms are red, precipitation is green.

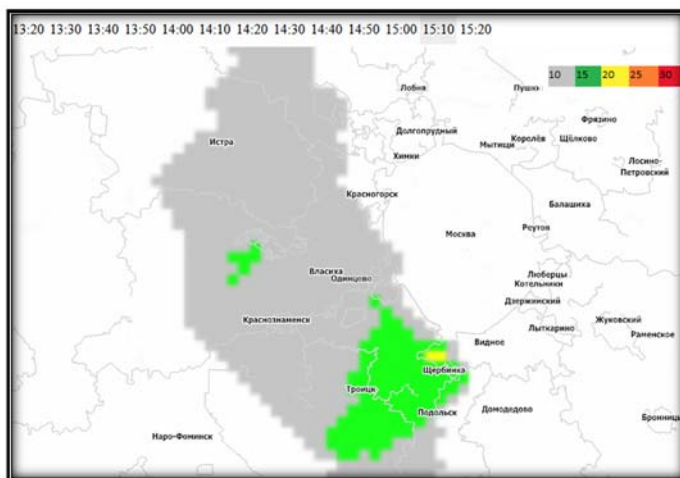


Рис. 19. Фрагмент карты наукастинга порывов ветра на 15.10 ч МСК 18.07.2023.

Fig. 19. The fragment of the wind gust nowcasting map for 15:10 MSC on July 18, 2023.

Возможности экспериментального радиолокационного мониторинга для предупреждения о возникновении конвективных штормов с сильными порывами ветра при шквалах

Радиолокационная экспериментальная диагностика мощных конвективных штормов, под которыми подразумеваются основные контрастные атмосферные фронты с активной грозовой деятельностью, осуществляемая в реальном режиме времени с периодичностью 10 минут и пространственным разрешением 0.05 градусов на основе информации сети ДМРЛ-С и численного прогнозирования, дает оперативному синоптику возможность уточнить силу прогнозируемого ветра (шквала) при принятии решения о штормовом предупреждении/консультации. Диагностируются порывы ветра в градациях скорости ветра 15–33 м/с (рис. 20, левая панель), шквалов в трех градациях интенсивности (рис. 20, правая панель) и в градации опасных явлений при порывах (25 м/с и более), т. е. тремя независимыми подходами, а также максимальная скорость восходящего потока воздуха, указывающая на возможную силу опасного конвективного явления (рис. 21, правая панель).

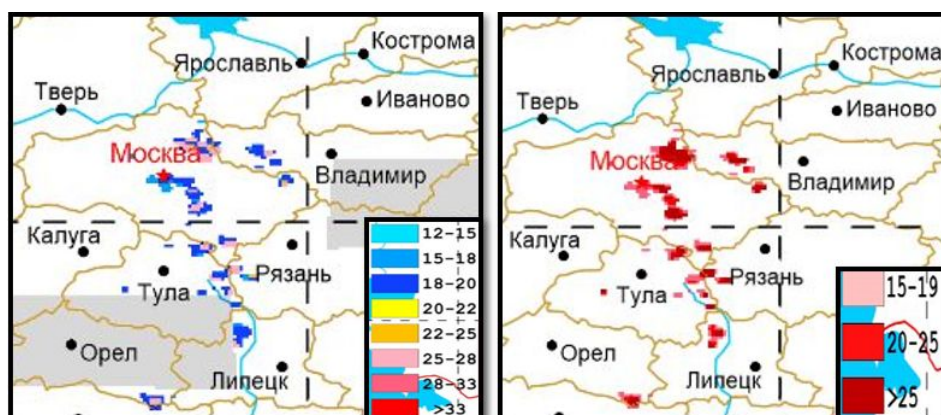


Рис. 20. Фрагменты карт в 15.40 ч МСК 18.07.2023 диагноза порывов ветра (слева – в градации скорости ветра 15–25 м/с, справа – шквалов в трех градациях интенсивности).

Fig. 20. The fragments of the wind gust diagnosis maps for 15:40 MSC on July 18, 2023 (in the 15-25 m/s gradation of wind speed (left), squalls in three gradations of intensity (right)).

Приведен пример ситуации 18.07.2023, рассмотренной выше, когда использовался экспериментальный диагноз радиолокационных данных для разработки штормовой консультации по московскому мегаполису. Карта порывов ветра правильно диагностировала порывы по московскому региону в основной градации 18–20 м/с, локально до 25 м/с, а карта опасных

порывов – до 25 м/с, что было несколько завышено (рис. 21). Карта диагноза максимальной скорости восходящего потока (20–25 м/с) правильно отражала активно выраженную конвекцию на контрастном холодном атмосферном фронте с возможностью реализации сильных конвективных явлений (ливней и шквалистых порывов ветра), что идентифицировал локалатор ДМРЛ-С «Внуково» и подтвердили данные наземной наблюдательской сети.

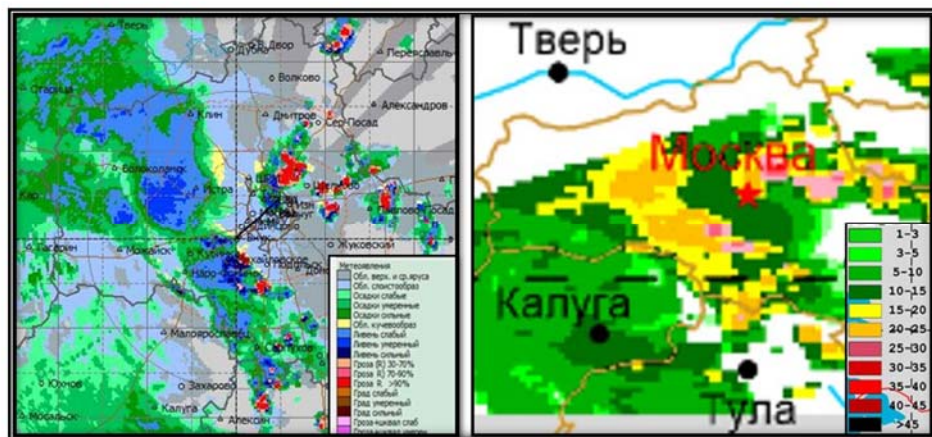


Рис. 21. Фрагменты карт в 15.10 ч МСК 18.07.2023 метеоявлений ДМРЛ-С «Внуково» (слева) и диагноза максимальной скорости восходящего потока воздуха (справа). Цветовые шкалы указывают: слева – явления, справа – максимальную конвективную скорость потока в м/с, являющуюся одним из параметров конвекции, характеризующим опасные конвективные явления.

Fig. 21. The fragments of the maps for 15:10 MSC on July 18, 2023: Vnukovo Doppler radar weather events (left) and the diagnosis of maximum updraft velocity (right). The color scales indicate: weather events (left), maximum convective flow velocity (m/s) (right), which is one of the convection parameters characterizing severe convective weather events.

Выводы

1) Использование предложенных экспериментальных методов наукастинга интенсивности осадков до 12 ч и порывов ветра до 2 ч, а также технологии диагноза опасных конвективных явлений на основе данных сети ДМРЛ-С позволяет более точно показать развитие неблагоприятных и опасных явлениях погоды конвективного характера с учетом их трансформации на ближайшие часы, что улучшает прогноз этих явлений погоды ;

2) продукция моделей с высоким пространственно-временным разрешением COSMO-Ru2.2 и COSMO-Ru6 (индексы конвекции и карты) позволяет уточнять сверхкраткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды;

3) для сверхкраткосрочного прогноза максимальных порывов ветра/шквалов в градации «опасные» необходимо учитывать наличие струйного течения нижних уровней;

4) при прогнозе конвективных явлений для обслуживаемого пункта/района необходимо учитывать зоны сильных конвективных явлений (сильных порывов ветра и осадков), визуализированных на картах численных расчетов модели COSMO-Ru2.2, в том числе в соседних областях;

5) при использовании наукастинга порывов ветра на период до 2 ч анализировать максимальные спрогнозированные порывы ветра в зоне радиусом до 50 км, не проецируя результат на конкретную точку местности;

6) при прогнозе сильных осадков, особенно в летний период, используя наукастинг до 12 ч, учитывать возможную активизацию или ослабление осадкообразующей зоны при подходе к мегаполисам.

Список литературы

1. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть I. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 704 с.

2. Инструкция для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике. М.: Росгидромет, 2016. 31 с.

3. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С ("ГИМЕТ-2010"). М.: Росгидромет, 2011. 108 с.

4. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1996. 306 с.

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

6. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды. РД 52.27.723-2009. 22 с.

7. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2019. 65 с.

8. Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 48-57.

9. Васильев П.П., Васильева Е.Л. Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 118-133.

10. Дмитриева Т.Г, Песков Б.Е. Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением двух случаев особо сильных шквалов на европейской части России летом 2010 г. // Метеорология и гидрология. 2013. № 2. С.18-30.

References

1. Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Spast' I. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 704 p. [in Russ.].

2. Instrukciya dlya operativno-prognosticheskikh i aviametpodrazdelenij Rosgidrometa po ispol'zovaniyu informacii DMRL v sinopticheskoy praktike. Moscow, Rosgidromet, 2016, 31 p. [in Russ.].

3. Programmnoe obespechenie vtorichnoj obrabotki informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S ("GIMET-2010"). Moscow, Rosgidromet, 2011, 108 p. [in Russ.].

4. *Rusin I.N., Tarakanov G.G.* Sverhkratkosrochnye prognozy pogody. Saint Petersburg, Izd-vo RGGMI, 1996, 306 p. [in Russ.].

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

6. Bazovye trebovaniya k tekhnologii podgotovki kratkosrochnyh prognozov pogody. RD 52.27.723-2009, 22 p. [in Russ.].

7. Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. RD 52.27.724-2019, 65 p. [in Russ.].

8. *Vasiliev A.A., Vil'fand R.M., Golubev A.D.* The joint use of mesoscale numerical and conceptual models in operational forecast of hazard weather phenomena. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 48-57 [in Russ.].

9. *Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L.* Sistema statisticheskoy interpretacii vyhodnoj produkcii gidrodinamicheskikh modelej dlya srednesrochnogo prognoza pogody. 70 let Gidrometcentru Rossii. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1999, pp. 118-133 [in Russ.].

10. *Dmitrieva T.G., Peskov B.E.* Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 71-79. DOI: 10.3103/S1068373913020027.

Поступила 10.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;

принята в печать 12.12.2023.

Submitted 10.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;

accepted for publication 12.12.2023.