

УДК 551.515.4

О возможности наукастинга гроз на московских аэродромах с использованием радарной и грозопеленгационной информации

А.Р. Иванова¹, И.А. Денисенко²

*¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*² МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия
ivanova@mecom.ru*

Проанализированы ситуации с грозами на московских аэродромах с использованием карты опасных явлений ДМРЛ-С Внуково, информации установленных на аэродромах грозопеленгаторов и выходной продукции модели COSMO-Ru02 для территории Центрального федерального округа с высоким временным разрешением. Обсуждается согласованность информации о грозах, представленной различными источниками, и возможность прогнозирования грозы на масштабах “ближнего” наукастинга (заблаговременность 2 ч) на примере эпизода в Домодедово 16 июля 2019 года.

Ключевые слова: наукастинг гроз, аэродромные наблюдения, доплеровский радар, датчик грозы, модель ЧПП, сравнение данных

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-142-161>

Feasibility of the thunderstorm nowcasting at Moscow aerodromes using radar and lightning detector information

A.R. Ivanova¹, I.A. Denisenko²

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
ivanova@mecom.ru*

Thunderstorm events at Moscow aerodromes with the use of DMRL-C data, aerodrome lightning detector TSS-928 information, and COSMO-Ru02 output data (for Central federal district area) with high time resolution are analyzed. Consistency of information about thunderstorms from different sources is discussed. Feasibility of thunderstorm nowcasting (“near” nowcasting with lead time up to 2 h) is considered on the basis of case study in Domodedovo on the 16th of May 2019.

Keywords: thunderstorm nowcasting, terminal weather observation, Doppler radar, lightning detector, NWP model, data comparison

Введение

Одной из причин возникновения опасных явлений (ОЯ), влияющих на полеты, взлет и посадку воздушных судов, является атмосферная конвекция. С ней могут быть связаны активные вертикальные движения,

сдвиги ветра, турбулентность, обледенение, электрические разряды [7]. Наиболее развитая конвекция (облака типа Cb), сопровождающаяся грозами, не только влияет на безопасность полетов, но может вызвать проблемы в функционировании аэродромных служб. Гроза принадлежит к разряду метеоусловий, по которым аэропорт может быть закрыт, причем не только на период прохождения этого явления, но и за некоторое время до его появления на аэродроме. Для некоторых крупных аэродромов разрабатываются специальные технологии по действию персонала в условиях грозовой деятельности. Подготовка к приходу грозы на аэродром сопровождается приостановкой важных предполетных работ, таких как регистрация пассажиров, их посадка/высадка, подготовка к полету судов на земле, прекращением движения транспорта по ВПП и рулежным дорожкам и т. д. На практике это означает следующее: для пассажиров на земле – задержку вылета; для тех, кто в воздухе, – уход воздушных судов на запасной аэродром или прибытие с опозданием; для авиакомпаний и аэропорта – экономические потери.

В настоящее время в нашей стране прогноз грозы по аэродрому формулируется аэродромным синоптиком на основании имеющейся у него информации: карт погоды, продукции моделей численных прогнозов погоды (ЧПП), спутниковых изображений, материалов аэрологического зондирования, а также (в основном на Европейской территории России) данных метеорологических радиолокаторов и датчиков гроз (грозопеленгаторов). Результаты сканирования радаров и грозопеленгаторов являются наиболее информативными для мониторинга грозы, приближающейся к аэродрому. Расчеты индексов конвективной неустойчивости на основании данных численного прогноза погоды позволяют заранее сделать «фоновый» прогноз гроз. Уточнение же его может быть получено только на основе информации с высоким временным разрешением, предоставляемой средствами дистанционного зондирования. Как правило, необходимое время для изменения регламента работы аэродрома в ожидании прихода грозы составляет 2 часа. Это значит, что требуется максимально точный ее прогноз на масштабе «ближнего» наукастинга (полный диапазон заблаговременности наукастинга составляет 0–6 часов [14]).

В настоящее время в мировой практике метеорологического обеспечения авиации используются различные системы наукастинга гроз. Обзор таких систем и технологий наукастинга грозовой облачности подробно изложен в [3]. Источником информации для прогнозирования развития и перемещения грозových облаков на коротких временных масштабах могут быть данные геостационарных спутников, метеорологических радаров, грозопеленгаторов, СВЧ-радиометров и даже сообщения населения о чрезвычайных ситуациях. В зависимости от наличия наблюдательных систем и от географического региона эти данные в ряде технологий могут использоваться независимо [12, 13]. В других случаях системы наукастинга для определения положения и интенсивности грозových очагов комбинируют данные из различных источников [8–10], применяя альтернативный либо вероятностный подходы.

Прогноз грозových очагов на масштабе наукастинга осложняется довольно высокой скоростью их эволюции. Согласно исследованиям С.М. Абдуллаева с соавторами [1], анализировавшими развитие облачности в пределах мезомасштабного конвективного комплекса, внутри этого образования новые конвективные ячейки могут возникать каждые 20 минут, а каждый час – новые конвективные штормы. Активная эволюция кучево-дождевой облачности наблюдается и на атмосферных фронтах, когда при движении системы фронтальной облачности в одном направлении хорошо заметно перемещение грозových очагов вдоль фронта.

В представленной работе будут проанализированы предварительные результаты, касающиеся возможности прогнозирования прихода грозы на аэродромы Московского аэроузла – Шереметьево, Домодедово и Внуково – с заблаговременностью 2 часа при использовании доступных данных систем дистанционного зондирования ДМРЛ-С Внуково и установленных на аэродромах датчиков гроз. Кроме того, в качестве экспериментальной продукции были привлечены прогнозы модели COSMO-Ru02 для территории ЦФО с высоким временным разрешением.

Используемые материалы

Для анализа возможности наукастинга гроз в московских аэропортах Шереметьево, Внуково и Домодедово были использованы следующие материалы.

1. Базы данных METAR о фактической погоде на аэродромах европейской части России в 2015–2019 гг. Такие базы данных ежегодно создаются в отделе авиационной метеорологии Гидрометцентра России и содержат, помимо прочего, информацию о явлениях погоды с интервалом 30 мин. Только гроза, зафиксированная наблюдателем на аэродроме и отмеченная в сводке, может служить фактическим доказательством наличия этого явления.

2. Архив радарных изображений «опасные метеоявления» доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С Внуково с 10-минутной дискретностью. Отображение гроз на снимках является результатом переработки измерений радиолокационной отражаемости программным обеспечением вторичной обработки гидрометеорологической информации ПО ВОИ-2010. Критерием идентификации гроз, представленных на этих изображениях, является достижение облаками S_b уровня -20 – -25 °C. Помимо высоты верхней границы облачности учитываются следующие значения радиолокационной отражаемости: максимальное в столбе, на уровне нулевой изотермы и на уровне интенсивной кристаллизации [2]. Для получения информации о грозах были декодированы файлы радарных наблюдений с расширением .img и выбраны коды ОЯ в диапазоне от 10 до 19. Табл. 1 с кодами явлений, представленных в ПО ВОИ-2010, приведена ниже. Анализ архива радарных данных был выполнен для конвективных сезонов 2016–2018 гг.

Таблица 1. Коды опасных явлений в радарных данных
Table 1. Codes of hazardous weather in radar data

Явление	Код
Гроза слабая	10
Гроза умеренная	11
Гроза сильная	12
Град слабый	13
Град умеренный	14
Град сильный	15
Гроза + шквал слабый	16
Гроза + шквал умеренный	17
Гроза + шквал сильный	18
Смерч	18

3. Ежеминутные сообщения от датчиков гроз TSS-928 [<https://vaisala.nt-rt.ru/images/manuals/TSS928.pdf>], установленных на аэродромах. Этот датчик регистрирует и распознает внутриоблачные разряды молний и разряды «облако – земля». Максимальная дальность приема последних составляет 56 км. При получении сигнала от разряда «облако – земля» устанавливается приблизительное расстояние до молнии со следующей классификацией: в радиусе 9 км разряд относится к территории аэродрома (“OVHD”), от 9 до 19 км – ближний разряд (“NEAR”), от 19 до 56 км – дальний (“DIST”). Кроме сообщения о расстоянии до вспышки, в телеграмме датчика гроз имеется информация о направлении появления вспышки в восьми секторах (азимутах): N, NE, E, SE, S, SW, W, NW (рис. 1), а также подсчитывается общее количество вспышек за минуту. К сожалению, из-за выхода из строя и замены грозопеленгаторов в начале конвективного сезона 2019 г. прервался ряд однородных наблюдений, существовавший с 2016 г., поэтому существующую выборку нельзя в полной мере назвать репрезентативной. Кроме того, выдача информации новыми грозопеленгаторами не всегда осуществляется ежеминутно (например, за десятиминутный промежуток приходят не 10, а 6–7 сообщений), в записях, предоставленных ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета», порой содержится брак.

4. Данные анализа и прогноза численной модели прогноза погоды COSMO-Ru [6] с шагом расчетной сетки 2,2 км для территории Центрального федерального округа. Модель стартовала четыре раза в сутки в 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ, необходимая заблаговременность прогноза от каждого срока – от 4 до 10 ч с дискретностью 10 мин. Таким образом, удалось получить модельную информацию для всех сроков радарных наблюдений (было принято допущение, что качество прогноза в таком диапазоне заблаговременностей меняется незначительно). Поля приземного давления и температуры, а также влажности, геопотенциала, составляющих

скорости ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 гПа были использованы для расчета характеристик неустойчивости атмосферы. Для записи большого количества заблаговременностей (37 + начальные данные) прогноза отделом информационных технологий Гидрометцентра России была специально организована база данных CMAV. Данные базы CMAV стали доступны с 25 июня 2019 года.

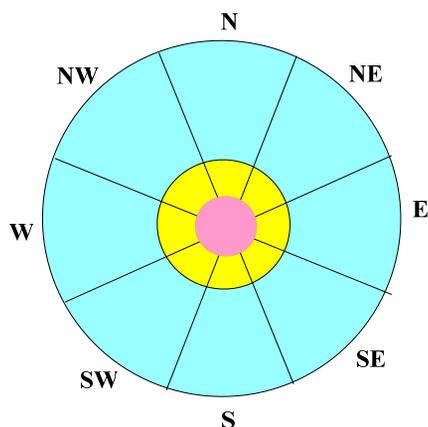


Рис. 1. Схема получения данных от грозопеленгатора. Голубым цветом обозначены сектора, где на расстоянии от 19 до 56 км фиксируются «дальние» вспышки (DIST), желтым – регистрируются «ближние» вспышки (NEAR) на расстоянии от 9 до 19 км, розовый круг радиусом 9 км считается территорией аэродрома (вспышки «над головой» – OVHD).

Fig. 1. The scheme for obtaining data from a lightning radar. The blue color indicates the sectors where “distant” flashes (DIST) are recorded at a distance of 19 to 56 km, the yellow ones indicate the “near” flashes (NEAR) at a distance of 9 to 19 km, the pink circle with a radius of 9 km (OVHD).

Анализ данных

Грозы в сводках METAR

Несмотря на сравнительно близкое расположение московских аэродромов (расстояние между Внуково и Шереметьево составляет 40 км, между Внуково и Домодедово – 44 км, между Шереметьево и Домодедово – 70 км), существуют различия в продолжительности периодов с грозами и их повторяемости. В качестве примера приведем данные сводок METAR, содержащих информацию о грозе на аэродромах за последние пять лет (2015–2019 гг.). Во Внуково в этот период гроза была зафиксирована в 175 получасовых сводках, в Шереметьево – 139, Домодедово – 145. Стоит отметить существенное изменение от года к году количества сводок с грозами (табл. 2).

Таблица 2. Количество сообщений METAR с грозами на московских аэродромах в 2015–2019 гг. (в скобках указаны даты самого раннего и самого позднего явления)

Table 2. Number of METAR reports with thunderstorm in 2015-2019 (the dates of the first and last event are shown in parentheses)

Аэропорт	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	Всего
Внуково	34 (16.04-1.08)	56 (3.06-30.08)	25 (10.06-23.08)	37 (16.04-22.09)	23 (5.05-18.07)	175
Домодедово	51 (16.04-21.09)	28 (22.05-30.08)	17 (28.05-13.09)	29 (16.04-31.08)	14 (8.05-15.08)	139
Шереметьево	44 (1.02-13.08)	41 (26.02-3.10)	23 (28.05-7.09)	22 (16.04-15.08)	15 (8.05-15.08)	145

Хотя, как правило, развитие конвективной деятельности, связанной с грозами, отмечается в теплый период, в Шереметьево в 2015 и 2016 гг. наблюдались зимние грозы (в феврале). При этом в 2015 г. температура воздуха у земли составила -4°C , в 2016 г. $+1^{\circ}\text{C}$. Отметим, что зимние грозы в Москве не являются исключительным явлением, последняя интенсивная зимняя гроза на юго-западе Москвы наблюдалась 19 января 2019 года.

Количество сводок, однако, не полностью отражает информацию о грозах на аэродроме. Отдельные грозовые облака, проходя над аэродромом, могут быть отражены в единственной сводке. В других случаях гроза на аэродроме может наблюдаться в течение нескольких часов. В Российской Федерации по данным за 2001–2015 гг. самая продолжительная гроза отмечалась в июне 2006 г. в аэропорту Стригино (Нижний Новгород) – в течение 7 ч [4]. Для московских аэродромов, по данным наблюдений последних пяти лет, наиболее продолжительные эпизоды грозы (отмеченные подряд без перерывов в шести получасовых сводках) были зафиксированы во Внуково 18 июля 2016 г. с 2.30 до 5.00 ч ВСВ и в Шереметьево 18 мая 2018 г. с 11.30 до 14.00 ч ВСВ.

Грозы по данным ДМРЛ-С

Анализ радарной информации начинался с изображений «Опасные явления», относящихся к 2-часовому периоду до появления грозы в сводках METAR. При этом принимались во внимание следующие факторы:

- наличие грозовых «засветок» в зоне действия радара – зоне кругового охвата с радиусом 200 км (процессы в крайнем 50-километровом кольце не рассматривались из-за возможных сильных искажений на краю обзора);

- время появления таких гроз;

- организация грозовых очагов, свидетельствующая о природе гроз (внутримассовые или фронтальные);

- направление движения грозовых очагов.

Задача такого анализа состояла в необходимости выяснить, как скоро на основании имеющейся информации можно идентифицировать очаг грозы, который достигнет в свое время аэродрома.

Оказалось, что определить источник грозовой деятельности по радарным данным на масштабах «ближнего» наукастинга не всегда представляется возможным. Как правило, при прохождении через регион атмосферного фронта грозовая деятельность на нем может отчетливо просматриваться задолго до подхода к аэродрому (фронт обычно движется со скоростью 30–50 км/ч). С внутримассовыми грозами ситуация более сложная.

Так, в некоторых случаях за 2 ч до появления грозы на аэродроме признаки грозовой деятельности в зоне охвата радара вообще могут отсутствовать. На рис. 2 приведен пример ситуации с внутримассовой грозой, зафиксированной в 9.30 ч ВСВ на аэродроме Шереметьево.

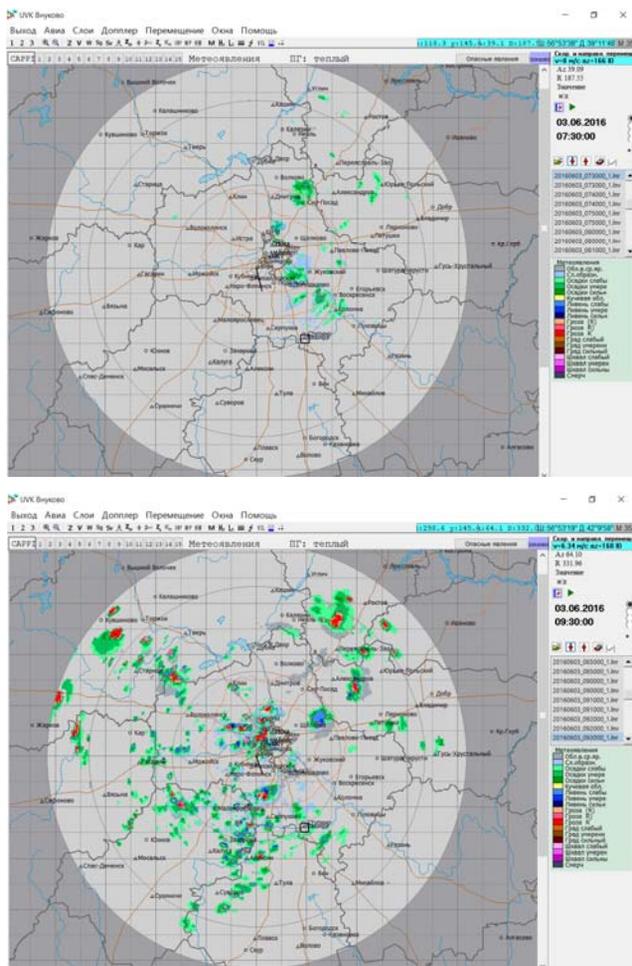


Рис. 2. Опасные явления на экране радара Внуково (грозы изображены красным) 3 июня 2016 г. в 7.30 ч ВСВ (вверху) и в 9.30 ч ВСВ (внизу).

Fig. 2. Hazardous weather on the Vnukovo radar screen (thunderstorms are shown in red) on June 3, 2016 at 7.30 UTC (above) and at 9.30 UTC (below).

В 7.30 ч ВСВ ситуация была не только не грозовой, но даже малооблачной. Небольшая область слабых осадков наблюдалась к северо-востоку от аэродрома. Через 2 часа ситуация кардинально изменилась: на фоне дневного прогрева произошло образование множества очагов внутримассовых гроз.

Еще более показательным является случай с грозой в Шереметьево, отмеченный в сводках METAR 19 июля 2016 г. в 16 ч ВСВ. В это время основная грозовая деятельность прослеживалась на юге Московской области в районе Серпухова (рис. 3). По данным радара, еще в 15.30 ч ВСВ в районе аэродрома имеет место только слоистая облачность, а через 10 мин на снимках виден уже мощный грозовой очаг, в течение 20 мин миновавший аэродром, двигаясь в направлении на северо-запад.

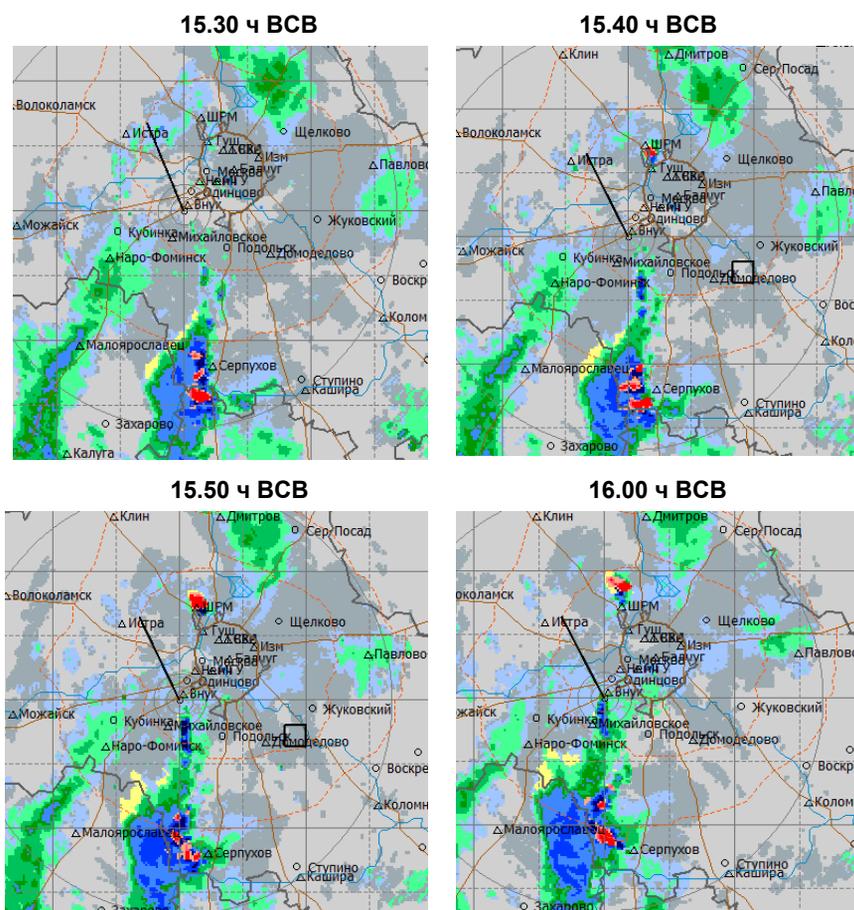


Рис. 3. Образование внутримассового грозового очага вблизи аэродрома Шереметьево 19 июля 2016 г. по данным радара Внуково.

Fig. 3. The formation of air-mass thunderstorm cell near the Sheremetyevo airport on July 19, 2016 according to the Vnukovo radar.

Гораздо проще прогнозировать грозу на аэродроме при движении четко выраженного атмосферного фронта с вынужденной конвекцией, такого, который представлен на рис. 4. Этот случай имел место 30 августа 2016 г. В этот день грозы отмечались при прохождении фронта с северо-запада последовательно в сводках METAR аэродрома Шереметьево (10.30 и 11.00 ч ВСВ), Внуково (13.00 ч ВСВ) и Домодедово (13.30 и 14.00 ч ВСВ).

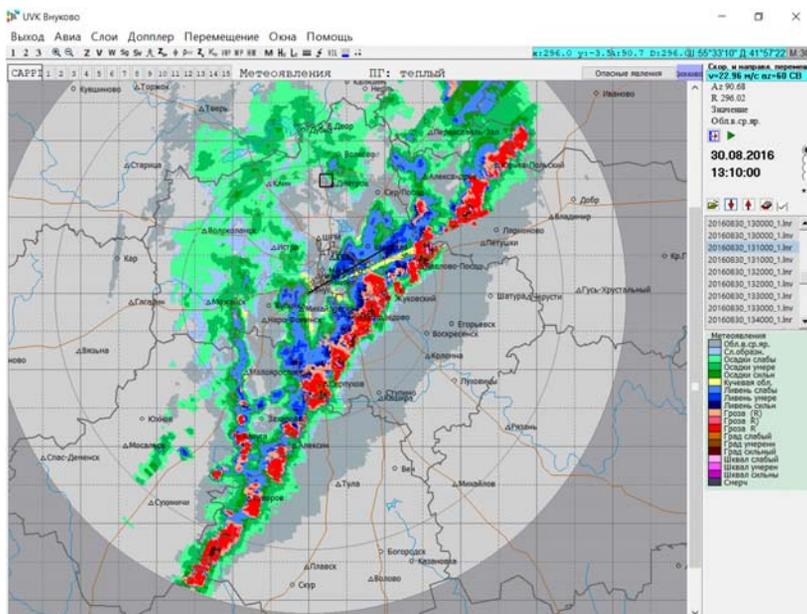


Рис. 4. Радарное изображение случая прохождения фронта с грозами 30 августа 2016 г.

Fig. 4. Radar image of a front passage with thunderstorms on August 30, 2016.

Анализ архива данных радарных изображений за 2016–2018 гг. (146 эпизодов гроз на трех аэродромах) позволил сделать следующие выводы. Около 85 % гроз, отмеченных на аэродромах, были связаны с фронтальной облачностью. Примерно в 90 % случаев за 2 часа до регистрации грозы на аэродроме очаги грозовой активности наблюдались в зоне обзора радара, но далеко не всегда в том секторе, где в дальнейшем формировалась облачность, ставшая причиной грозы в аэропорту. В 9 % случаев факт грозы на аэродроме не подтверждался данными радара – наблюдались более слабые конвективные явления (чаще всего сильные ливни).

Согласно анализу радарной информации, для всех трех аэродромов было характерно формирование гроз при наличии переноса с западной составляющей: для Внуково – в 78 % случаев, Шереметьево – 59 %, Домодедово – в 81 % случаев.

Особенности подготовки различных данных для технологии наукастинга

Данные ДМРЛ-С

В Гидрометцентр России данные сети радаров поступают из ФГБУ «ЦАО» Росгидромета. В результате каждого 10-минутного кругового сканирования формируются файлы данных в режиме «Отражаемость» с расширением .Inr и в режиме «Скорость» с расширением .Inv. Данные ДМРЛ-С после вторичной обработки содержат как конические, так и горизонтальные сечения 1×1 , 2×2 , 4×4 км. В данной работе использовались горизонтальные сечения CAPPI и сетка 1×1 км. Шаги сетки отсчитываются от центральной точки, в которой находится радар. Программа декодирования файлов в формате .Inr была написана с использованием языка Python и позволила получить на выходе массив размером 504×504 , состоящий из значений кодов ОЯ, относящихся к радарным пикселям карты размером $\sim 1\times 1$ км. Поскольку координаты пикселей не имели привязки к географической сетке, данные радара не могли быть без предварительной обработки сопоставлены с другой информацией. По этой причине с помощью библиотеки *proj* для языка Python [<https://proj.org/index.html>] была произведена картографическая трансформация эквидистантных координат радарных данных в географические.

Данные грозопеленгаторов

Данные грозопеленгаторов – количество вспышек, регистрируемых на определенном расстоянии в определенном направлении от грозопеленгатора – также нуждались в географической привязке. Задача усложнялась геометрическими особенностями частей обзора (см. рис. 1). Было принято следующее решение: определить координаты узлов радарной сетки, принадлежащих каждому из 17 секторов обзора (8 дальних + 8 ближних + центральный) каждого из трех грозопеленгаторов, установленных на аэродромах. Поскольку в материалах, предоставленных ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета», присутствовали данные о количестве вспышек с дискретностью 1 мин, а время кругового сканирования радарного луча занимает 10 мин, для каждого сектора суммировались данные о вспышках за соответствующий 10-минутный интервал.

Информация модели COSMO-Ru02

Для решения задачи наукастинга требуются численные прогнозы с высоким пространственным и временным разрешением. Модель COSMO-Ru02 на тот момент была единственной оперативной моделью с максимально высоким горизонтальным разрешением для исследуемой территории. Для сопоставления данных модели с радарной информацией была проведена географическая привязка радарных пикселей размером 1×1 км к узлам модельной сетки с шагом 2,2 км. При сравнении данных за срок радарного сканирования из набора заблаговременностей выбиралась

соответствующая данному сроку. Например, для радарной информации за срок 23.50 ч ВСВ использовался модельный расчет с 18.00 ч ВСВ на 6 ч 50 мин, а в 15.20 – заблаговременность 9.20 со стартового срока 6.00 ч ВСВ. Следует отметить, однако, что используемая версия модели имела существенный недостаток, связанный с отсутствием усвоения радарных данных, которое, как будет показано далее, оказалось критичным при моделировании процессов конвективной неустойчивости. На основании прогностических полей температуры и влажности был произведен расчет ряда параметров, которые при превышении ими определенных пороговых значений могут быть индикаторами гроз. Для этой цели был выбран K -индекс (индекс Вайтинга):

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}), \quad (1)$$

где T – температура; Td – точка росы; индекс означает значение на соответствующей изобарической поверхности в гПа. K -индекс позволяет прогнозировать грозу при $K \geq 20$.

Помимо этого, проверялось наличие гроз по пороговым значениям других индикаторов гроз [11], таких как Vertical Total Index (≥ 26):

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (2)$$

и Total Total Index (≥ 44):

$$TT = (T_{850} - Td_{850}) - 2T_{500}. \quad (3)$$

Сравнение данных из различных источников

Принципиальный подход к наукастингу заключается в следующем. Если существует несколько источников, представляющих информацию с высоким разрешением по пространству и времени, прежде всего надо проверить согласованность этой информации, определить степень доверия к каждому источнику и таким образом установить весовые функции для принятия решения.

На данном этапе реализовать эту задачу в полной мере не удалось. Это было связано не только с техническими причинами (замена датчиков гроз, поздняя организация базы данных численных прогнозов с учащенными заблаговременностями, отсутствие надлежащего усвоения радарных данных численной моделью), но и с природной аномалией: лето 2019 г. в исследуемом регионе оказалось довольно холодным, атмосферные условия чаще всего не способствовали активному развитию конвекции, и повторяемость гроз на аэродромах оказалась крайне низкой. Например, на аэродроме Домодедово грозой были отмечены в июне – 2 дня, в июле – 3 дня и в августе – 1 день. В отсутствие репрезентативной выборки данных аэродромных наблюдений было принято решение провести сравнение показателей грозовой активности на основании

информации об опасных явлениях, идентифицированных ДМРЛ-С Внуково. Всего было выбрано 354 радарных файла, в которых содержатся коды явлений, связанных с грозой (см. табл. 1), за даты и временные интервалы (с 10-минутной дискретностью), указанные в табл. 3.

Таблица 3. Периоды времени 2019 г., в которые в зоне обзора ДМРЛ-С Внуково наблюдались грозы

Table 3. Periods of time when thunderstorms were observed during circular scanning by Vnukovo radar

Дата	Время, ч ВСВ
08.07.2019	5.30–19.00
09.07.2019	12.30–18.00
10.07.2019	8.30–12.00
16.07.2019	11.10–18.30
18.07.2019	9.30–19.00
19.07.2019	13.00–17.30
20.07.2019	9.30–16.30
24.07.2019	9.00–14.00

Попытка сравнить радарные данные о грозе с показаниями датчиков гроз на аэродромах свелась к тому, что пришлось ограничиться исследованием регистрации разрядов в различных секторах обзора грозопеленгатора только на аэродроме Домодедово (где количество бракованных сообщений было наименьшим среди трех приборов). Сравнение проводилось следующим образом: если грозопеленгатор регистрировал хотя бы одну вспышку в одном из 17 секторов в период 10-минутного радарного сканирования, это подтверждало наличие грозы в данном секторе. При этом радарная информация о наличии гроз «интегрировалась» во всех узлах радарной сетки, принадлежащих данному сектору грозопеленгатора.

Результаты исследования на выборке из 6048 случаев (секторов) показали следующее (табл. 4).

Таблица 4. Количество секторов грозопеленгатора Домодедово, в которых было зафиксировано наличие или отсутствие электрических разрядов, или явление, связанное с грозой, по данным ДМРЛ-С Внуково

Table 4. Amount of Domodedovo lightning detector sectors where electric charges were registered or thunderstorms in radar data were observed

Гроза по радару	Разряды грозопеленгатора	
	есть	нет
есть	173	484
нет	66	5295

Как радар, так и грозопеленгатор чаще всего в отсутствие грозы не дают сигналов (88 % секторов), в 3 % случаев оба прибора грозу в секторе зафиксировали. В оставшихся 9 % секторов информация о грозе от радара не совпадает с данными грозопеленгатора. Чаще радар идентифицировал грозу (484 случая) в отсутствие сигналов грозопеленгатора, гораздо реже имела место обратная ситуация (66 случаев). Повторяемость грозы, оцененная по данным грозопеленгатора, составила для данной выборки 3,9 %, по данным радара – 10,9 %.

Для сравнения радиолокационной информации о грозе с прогностическими значениями индексов гроз, рассчитанными по выходным данным модели COSMO-Ru02, принималась во внимание внутренняя часть зоны радарного обзора размером 352×352 точки. Отметим, что анализируемые радарные файлы отличались количеством точек: в каждой области 352×352 присутствовало некоторое количество пикселей с отсутствием информации (код 255), которые не учитывались при сопоставлении с модельными индексами.

Результаты этого сопоставления значительно отличаются от картины сравнения с грозопеленгационными данными. Это связано с гораздо большей выборкой (узлы, а не сектора для территории большего размера, чем зона сканирования грозопеленгатора), с несовершенством модельного прогноза, а также с поточечным методом оценки, который, как известно, является самым строгим. Значения индексов, рассчитанные по прогностическим данным о температуре и влажности в узлах сетки модели COSMO-Ru02 с дискретностью 10 мин, сравнивались с информацией о грозе (согласно табл. 1) в ближайшем узле радарной сетки для того же времени сканирования.

Очевидно, что из-за отсутствия надлежащего усвоения радарных данных в этой версии модели согласие информации о грозах от двух источников оказалось неудовлетворительным (табл. 5). Повторяемость грозы в узлах сетки для выборки, содержащей около 40 млн узлов (39546616), по данным радара составила 0,19 %, по расчетам модельных пороговых значений грозových индексов – 27–69 %, что свидетельствует о значительной переоценке моделью областей с конвективной неустойчивостью (и подтверждается далее конкретным примером). Совпадение случаев наличия явления отмечается всего в 0,04–0,12 % узлов, отсутствия – в 31–72 %. При этом несоответствие радарной и модельной информации о наличии или отсутствии грозы весьма значительно, особенно для индекса VT .

Отметим, что, как показали эксперименты с расчетами по модельным данным, вариации с пороговым значением K -индекса, а также других индексов грозовой активности, не привели к улучшению результата. Это свидетельствует о том, что очаги конвективной неустойчивости воспроизводятся в данной версии модели некорректно (в данном случае

показания радара ближе к реальности; как было показано выше, согласно аэродромным наблюдениям, радар неверно оценивает грозу всего в 9 % случаев).

Таблица 5. Количество узлов сетки модели и соответствующих им узлов радарной сетки, для которых проверялось наличие и отсутствие грозы по радарным и модельным данным
Table 5. Number of model grid points and corresponding radar grid points where occurrence and non-occurrence of thunderstorm are calculated (model) or observed (radar)

Гроза по радару	K ≥ 20	
	есть	нет
есть	28014 (0,07 %)	48896 (0,12 %)
нет	10980357 (27,77 %)	28489349 (72,04 %)
	VT ≥ 26	
	есть	нет
есть	49402 (0,12 %)	27868 (0,07%)
нет	27160408 (68,68 %)	12309298 (31,13 %)
	TT ≥ 44	
	есть	нет
есть	18691 (0,04 %)	58219 (0,15 %)
нет	13981370 (35,35 %)	25488336 (64,45 %)

Анализ случая грозы в аэропорту Домодедово 16 июля 2019 года

Для анализа возможности наукастинга гроз на московских аэродромах был выбран один из редких (для конвективного сезона 2019 г.) случаев с грозой на аэродроме Домодедово. Согласно получасовым сводкам METAR, гроза здесь отмечалась три срока подряд: в 14.00, 14.30 и 15.00 ч ВСВ. В этот день, как видно на фрагментах кольцевых карт (рис. 5а, б), Московский регион располагался вблизи точки фронтальной окклюзии. Источником гроз стала вынужденная конвекция на фронтах. В период с 12 до 15 ч ВСВ на картах отчетливо прослеживается волновая деятельность на холодном фронте, способствующая усилению грозовой деятельности вблизи Москвы, при этом теплый фронт находится практически в стационарном состоянии.

По данным ДМРЛ-Внуково, в 12 ч ВСВ (за 2 ч до прихода грозы на аэродром) ближайшее скопление грозовых очагов прослеживалось на юго-западе, между Калугой и Малоярославцем (не показано). Затем красные грозовые очаги стали возникать ближе к аэродрому и двигаться

в его сторону из южных секторов. На радарных изображениях ОЯ вблизи аэродрома отмечалось в 14.00 и 14.30 ч ВСВ как «гроза умеренная» (рис. 5в, г), в 15.00 ч ВСВ – как «гроза слабая».

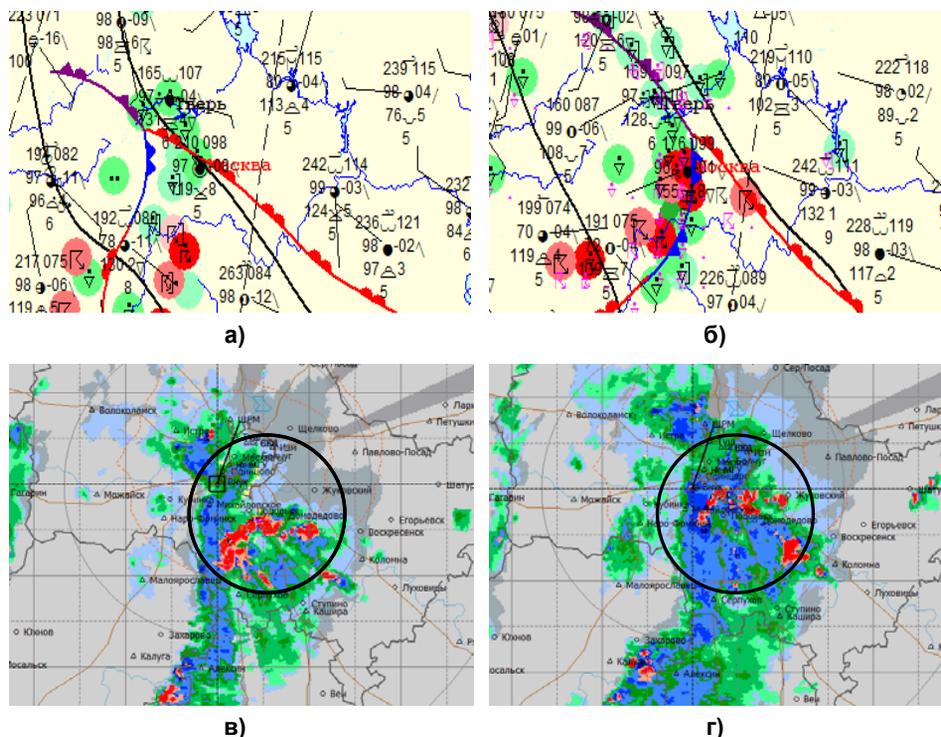


Рис. 5. Фрагменты кольцевых карт за 12 ч (а) и 15 ч ВСВ (б) и обзоры радарного сканирования ДМРЛ-С Внуково за 14.00 ч (в) и 14.30 ч ВСВ (г). Черная окружность – область действия грозопеленгатора в аэропорту Домодедово.

Fig. 5. Fragments of weather maps at 12 UTC (a) and 15 UTC (б) and radar scanning view of radar Vnukovo in 14.00 (в) and 14.30 (г) UTC. Black circle is Domodedovo lightning detector area of validity

По информации датчика гроз на аэродроме Домодедово (рис. 6), первые разряды, свидетельствующие о подходе грозового облака, были зафиксированы в «дальнем» южном секторе только в 13.12 ВСВ, т. е. менее чем за час до прихода грозы на аэродром. При этом увеличение разрядов в северных и северо-восточных секторах можно наблюдать уже в конце периода. Это означает, что грозовая облачность аэродром миновала. Пик развития грозы пришелся на период с 14.20 до 14.30 ВСВ, когда достигло максимума количество всплеск категории «OVHD» (165) и число межоблачных разрядов (1685). Общее количество зарегистрированных разрядов за эти 10 мин превысило 2200.

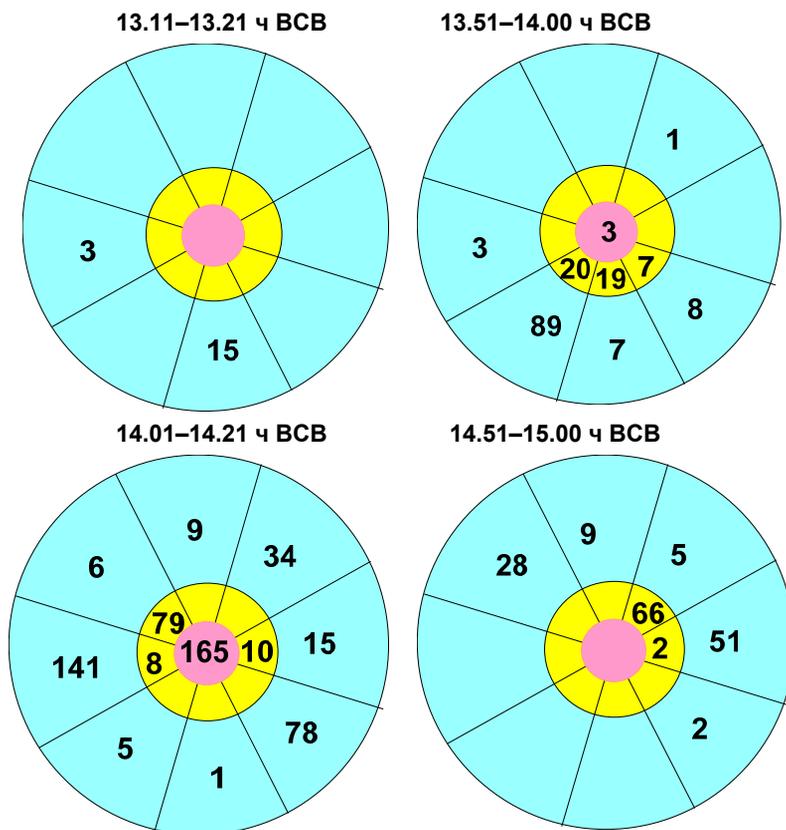


Рис. 6. Показания грозопеленгатора (количество разрядов) на аэродроме Домодедово в период прохождения грозы 16.07.2019 г.

Fig. 6. Domodedovo lightning detector data (number of electric charges) during thunderstorm passage 16.07.2019.

Определение областей сильной конвективной неустойчивости, соответствующей грозе, рассчитанных на основании пороговых значений параметров K , VT и TT , показало полное расхождение с действительностью несмотря на то, что распределение по территории трех индексов сильно различается (рис. 7). Однако ни один из них не предсказал грозу, проходившую в это время над аэродромом Домодедово (рис. 7а). Расчетные зоны с грозами оказались весьма обширными в сравнении с показаниями радара и располагались в зависимости от характеристики на юго-западе и/или северо-востоке области, эквивалентной зоне сканирования радара.

Принимая во внимание, что стратификация температуры в модели не воспроизводится удовлетворительно, мы попытались все же использовать модельный прогноз ветра для экстраполяции грозовых очагов. Была предпринята попытка пошагового 10-минутного переноса грозовых радарных пикселей в поле модельного ветра на 700 и 500 гПа. Однако

и в этом случае ни один из «грозовых» пикселей, отмеченных на экране радара за 120, 60, 40, 30 и 20 мин до регистрации грозы наблюдателем, не оказался в зоне аэродрома. Причиной этого может быть как отсутствие учета эволюции грозовой облачности при данном подходе, так и сложная структура поля ветра в области реальной окклюзии, которая, очевидно, также недостаточно хорошо была спрогнозирована моделью.

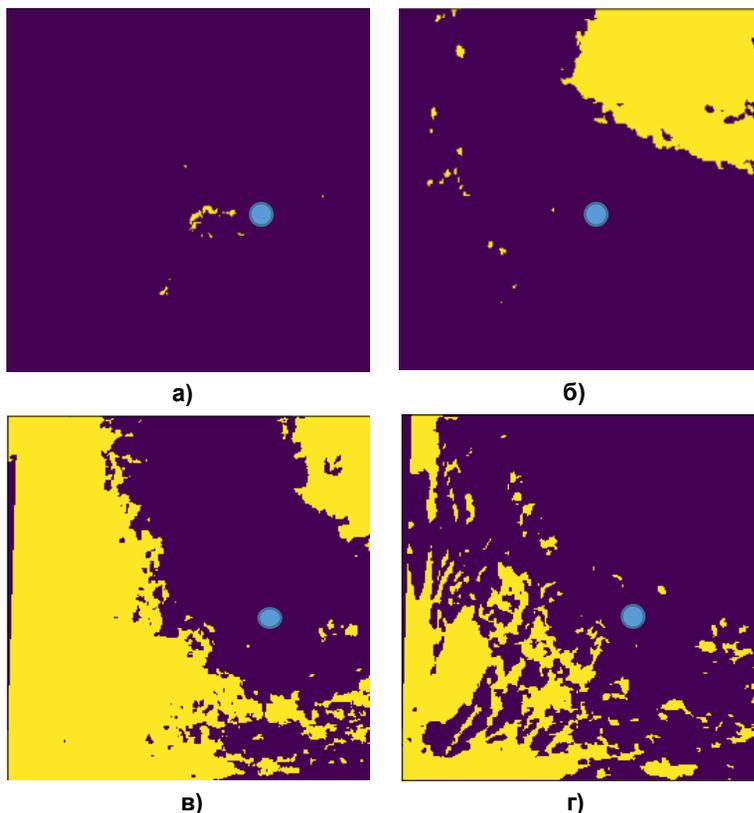


Рис. 7. Грозы, обозначенные желтым, в поле 504×504 ДМРЛ-С Внуково (а) и модельные значения индекса $K \geq 20$ (б), $VT \geq 26$ (в), $TT \geq 44$ (г) для этой же территории для срока 14 ч ВСВ 16.07.2019. Положение аэродрома Домодедово показано голубой точкой.

Fig. 7. Thunderstorms (in yellow) according to radar Vnukovo data (а) and model values $K \geq 20$ (б), $VT \geq 26$ (в), $TT \geq 44$ (г) within the same area at 14 UTC 15.07.2019. Domodedovo aerodrome area is marked by blue dot.

Заключение

В настоящее время наукастинг, особенно в приложении к прогнозированию погоды для авиации, является задачей, требующей скорейшего решения. Долгое время в нашей стране его развитие тормозилось

недостаточным техническим оснащением сети, дефицитом средств дистанционного зондирования, позволяющих получать результаты измерений в режиме реального времени с высокой частотой. Однако, как показывает проведенное исследование, даже наличие необходимой информационной составляющей наукастинга (модель с высоким пространственным разрешением и высокочастотные данные наблюдений) не является гарантией успеха.

Успешность наукастинга гроз в мировой практике имеет не слишком высокие показатели даже с привлечением всей технической мощи и колоссального объема информации дистанционного зондирования [3]. Так, максимальный индекс Пирса прогноза грозовой активности на 2 ч с применением многокомпонентной системы грозового наукастинга LNWS составил всего 0,32 [9]. Опыт показывает, что появление и эволюция грозовой конвекции весьма трудно поддаются прогнозу даже на коротких участках времени. Алгоритм DBSCAN, применяемый в метеослужбе ЮАР и усваивающий информацию грозопеленгаторов, позволяет успешно отслеживать обнаруженные грозы на временном отрезке, не превышающем 20 мин [12]. Довольно успешный наукастинг гроз в Швейцарии с применением мультисенсорной системы TRT действует на интервале времени до 45 мин [8].

В нашем случае успешность реализации наукастинга гроз ограничили следующие факторы:

– отсутствие необходимых архивов данных грозопеленгаторов (в связи с заменой приборов архивы, собранные ранее в 2015–2017 гг., оказались нерепрезентативными), большое количество брака в данных (для исследования удалось использовать только информацию прибора в Домодедово), их ограниченный радиус действия (до 56 км);

– отсутствие надлежащего усвоения радарных данных (в квазинепрерывном режиме) и несовершенство используемой версии численной модели; в частности, по этой причине зоны конвективной неустойчивости, соответствующие грозам, не совпадали с областями, где это явление регистрировалось.

Из положительных результатов следует отметить удовлетворительное согласие информации о грозах ДМРЛ-С Внуково и датчика гроз в аэропорту Домодедово. Расхождение их результатов наблюдалось всего в 9 % случаев, причем радар в сравнении с грозопеленгатором отмечал наличие гроз в три раза чаще. Поэтому, возможно, при проведении дальнейших исследований в задаче аэродромного наукастинга гроз следует оценить потенциал использования продуктов первичной, а не вторичной обработки радарной информации, например максимальные значения радиолокационной отражаемости на различных уровнях. Усвоение радарной информации в начальных данных модели COSMO-Ru (latent heat nudging) должно существенно улучшить воспроизведение температурной стратификации, определяющей развитие конвективной неустойчивости,

в узлах модельной сетки, что позволяет смотреть в будущее с осторожным оптимизмом. Однако следует помнить, что помимо реализации информативной компоненты наукастинга на базе модели численного прогноза погоды и средств высокочастотных наблюдений потребуется решать вопрос технологической составляющей, связанной с непрерывными передачей и приемом большого количества информации.

Авторы благодарят за помощь в организации сбора данных для настоящей статьи сотрудников ФГБУ «Гидрометцентр России» Д.В. Блинова, А.В. Смирнова, Е.Н. Скриптунову, И.И. Кулакову, А.Д. Голубева, Е.В. Васильева и сотрудников ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета» Т.К. Кулик, С. Пономарева и Д. Морякова.

Список литературы

1. Абдуллаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 5. С. 34–45.
2. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического лоатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М.: 2017. 110 с.
3. Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 11. С. 71–83.
4. Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Об изменении некоторых климатических характеристик на аэродромах Российской Федерации в 2001–2015 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 39–53.
5. Иванова А.Р., Шакина Н.П. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 360. С. 113–134.
6. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревакотова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4. С. 37–53.
7. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
8. Hering A., Nisi G., Bruna D. et al. Fully automated thunderstorm warning and operating nowcasting at Meteoswiss // *Proceedings of European Conference on Severe Storms 2015*, 14–18 September 2015, Wiener Neustadt, Austria, ECSS2015-80-1.
9. Meng Q., Yao W., Xu L. Development of Lightning Nowcasting and Warning Technique and Its Application // *Adv. Meteorol.* 2019. Article ID 2405936, 9 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/2405936>
10. Meyer V.K., Holler H., Betz H.D. Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data // *Atm. Chem. Phys. Disc.* 2013. Vol. 13. P. 2179–2216.
11. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe-storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Waether Central. Tech. Report 200 (Rev). United States: Air Weather Service, 1972. 250 p.
12. Padayachee P., van Rooyen R., van Ginkel O. Nowcasting thunderstorms using real-time lightning data // *SAIEE Smart Grid Conference*, Eskom Academy of Learning, 2017
13. Sieglaff J.M., Cronce L.M., Feltz W.F., Bedka K.M., Pavolonis M.J., Heidinger A.K. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2011. Vol. 50. P. 110–126.
14. WMO-No 1198. Guidelines for Nowcasting Techniques. 2017 edition, 67 p.

References

1. Abdullaev, S.M., Zhelnin, A.A., Lenskaya, O.Y. Life cycle of mesoscale convective systems. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 5, pp. 285–292 DOI: 10.3103/S1068373909050033
2. Vremennye metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo lokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike. Moscow, 2017, 110 p. [in Russ.].
3. Ivanova A.R. International Practices of Thunderstorm Nowcasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 11, pp. 756–763. DOI: 10.3103/S1068373919110050
4. Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Variations in Some Climatological Characteristics at the Aerodromes of the Russian Federation in 2001–2015. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 5, pp. 302–312. DOI: 10.3103/S1068373918050047
5. Ivanova A.R., Shakina N.P. Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 113–134 [in Russ.].
6. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V. COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 37–53 [in Russ.].
7. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 312 p. [in Russ.].
8. Hering A., Nisi G., Bruna D. et al. Fully automated thunderstorm warning and operating nowcasting at Meteoswiss. Proceedings of European Conference on Severe Storms 2015, 14–18 September 2015, Wiener Neustadt, Austria, ECSS2015-80-1.
9. Meng Q., Yao W., Xu L. Development of Lightning Nowcasting and Warning Technique and Its Application. *Adv. Meteorol.*, 2019, Article ID 2405936, 9 p., DOI: 10.1155/2019/2405936.
10. Meyer V.K., Holler H., Betz H.D. Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data. *Atm. Chem. Phys. Disc.*, 2013, vol. 13, pp. 2179–2216.
11. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe-storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Waether Central. Tech. Report 200 (Rev). United States: Air Weather Service, 1972, 250 p.
12. Padayachee P., van Rooyen R., van Ginkel O. Nowcasting thunderstorms using real-time lightning data. SAIEE Smart Grid Conference, Eskom Academy of Learning, 2017.
13. Sieglaff J.M., Cnonce L.M., Feltz W.F., Bedka K.M., Pavolonis M.J., Heidinger A.K. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2011, vol. 50, pp. 110–126.
14. WMO-No 1198. Guidelines for Nowcasting Techniques. 2017, 67 p.

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

Received by the editor 06.12.2019.