

УДК 551.508.855

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-49-60

Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны

О.В. Васильев¹, С.С. Коротков¹, К.И. Галаева¹, Э.С. Бояренко¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Исследования проводятся за счет Российского научного фонда в рамках проекта
№ 23-29-00450

Аннотация: Возрастающая необходимость получения данных о метеорологической обстановке для обеспечения безопасности полета воздушных судов актуализирует разработку радиолокационных систем дистанционного сбора и обработки информации, в том числе для решения задач классификации опасных метеоявлений. Это определило первоочередную разработку отечественного метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны (МРЛК БАЗ). В статье представлены особенности построения МРЛК БАЗ, а также решаемые им основные задачи. Для классификации метеоявления от облачности до шквала в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны предложено взять за основу критерии, апробированные метеорологическими радиолокационными станциями предыдущих поколений. Данные критерии основаны на анализе распределения отражаемости по высотам с учетом вертикального профиля температуры. Кроме того, в МРЛК БАЗ дополнительно введен критерий классификации грозы в холодный период времени. Для калибровки значений критериев были разработаны математический аппарат и специальное программное обеспечение. Для набора статистических данных МРЛК БАЗ были установлены в различных климатических районах: Центральном и Северо-Западном федеральных округах и Республике Крым. Далее была проведена эффективная валидация полученной информации. В настоящее время МРЛК БАЗ прошел предварительные, приемочные, сертификационные испытания, опытную эксплуатацию, показав при этом эффективную классификацию метеорологических явлений благодаря корректному подбору критериев принятия решений. В статье рассматривается возможность повышения достоверности и оправдываемости классификации опасных метеорологических явлений за счет дополнительного использования в критериях информации о распределении по высотам удельной скорости диссипации турбулентной энергии атмосферы, а также дополнительный набор статистических данных в различных климатических зонах Европейской территории России – Верхнем Поволжье и Краснодарском крае.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, ближняя зона аэродрома, опасные явления погоды, испытания, сертификация, валидация метеорологических данных, критерий принятия решений, классификация метеорологических явлений.

Для цитирования: Васильев О.В. Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны / О.В. Васильев, С.С. Коротков, К.И. Галаева, Э.С. Бояренко // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 2. С. 49–60. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-49-60

Decision criteria for the classification of meteorological phenomena in the weather radar complex of the near-airfield zone

O.V. Vasiliev¹, S.S. Korotkov¹, K.I. Galaeva¹, E.S. Boyarenko¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The study was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation,
project № 23-29-00450

Abstract: The increasing need to obtain data on the meteorological situation to ensure the safety of aircraft flight actualizes the development of radar systems for remote collection and processing of information, including for solving the problems of classifying dangerous weather phenomena. This determined the primary development of the domestic weather radar complex of the near

airfield zone (WR BZ). The article presents the features of the construction of the WR BZ, as well as the main tasks it solves. To classify meteorological phenomena from cloudiness to squall in the weather radar complex of the near airfield zone, it is proposed to take as a basis the criteria tested by weather radar stations of previous generations. These criteria are based on an analysis of the height distribution of reflectivity, taking into account the vertical temperature profile. In addition, a criterion for classifying thunderstorms in the cold period of time has been additionally introduced in the WR BZ. To calibrate the values of the criteria, a mathematical apparatus and special software were developed. To collect statistical data, WR BZ were installed in various climatic regions: the Central and North-Western Federal Districts and the Republic of Crimea. Further, an effective validation of the information received was carried out. At present, WR BZ has passed preliminary, acceptance, certification tests, trial operation, while demonstrating an effective classification of meteorological phenomena, thanks to the correct selection of decision criteria. The article considers the possibility of increasing the reliability and justification of the classification of dangerous meteorological phenomena through the additional use of information on the distribution of altitudes of the specific rate of dissipation of turbulent energy of the atmosphere, as well as an additional set of statistical data in various climatic zones of the European territory of Russia – the Upper Volga Region and the Krasnodar Region.

Key words: weather radar, near-airfield zone, dangerous weather phenomena, testing, certification, validation of meteorological data, decision criterion, classification of weather phenomena.

For citation: Vasiliev, O.V., Korotkov, S.S., Galaeva, K.I., Boyarenko, E.S. (2023). Decision criteria for the classification of meteorological phenomena in the weather radar complex of the near-airfield zone. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 2, pp. 49–60. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-49-60

Введение

Повсеместное внедрение метеолокаторов в XX в. обеспечило дальнейшее развитие метеорологии в части изучения погодных явлений с высокой пространственной и временной дискретностью, а также предоставило возможность использования метеорологических радиолокационных данных в синоптической практике и в прогностических моделях погоды [1–6]. В свою очередь изучение мезомасштабных явлений погоды, а именно: грозových и градовых очагов, фронтов порывов, шквалов, смерчей, бризов, конвективных ячеек, суперячеек – напрямую было связано с возможностью радиолокационного наблюдения за гидрометеорологическими образованиями [7–12].

Сегодня на территории Российской Федерации оперативно функционирует множество метеорадиолокационных систем с различными тактико-техническими характеристиками [13–15], однако существует потребность в создании малогабаритных метеорологических радиолокаторов, которые в том числе смогут работать в отдаленных регионах [16], будут устанавливаться между крупногабаритными метеолокаторами Росгидромета [17]. В настоящее время существует положительный опыт объединения метеорологических радиолокаторов с различными тактико-техническими характеристиками [18, 19].

Организацией «Бортовые аэронавигационные системы» был разработан МРЛК БАЗ, предназначенный для создания радиолокационного метеорологического поля в ближней зоне аэродрома (до 100 км от контрольной точки аэродрома). Создание отечественного МРЛК БАЗ отвечает современным требованиям импортозамещения [20].

В настоящее время МРЛК БАЗ прошел предварительные, приемочные, сертификационные испытания, опытную эксплуатацию, показав при этом эффективную оценку метеорологических явлений, параметров, характеристик [21, 22] благодаря в том числе корректному подбору критериев принятия решений для классификации метеорологических явлений.

Назначение, задачи, область применения МРЛК БАЗ

МРЛК БАЗ обеспечивает предоставление метеоинформации метеорологическим службам и подразделениям аэродромов различных видов авиации, а также другим потребителям радиолокационной метеорологической информации.

МРЛК БАЗ решает следующие задачи в соответствии с международными и отечественными требованиями:

- обнаружение и классификация метеорологических явлений при круговом и секторном обзорах пространства;
- оценка координат и размеров обнаруженных метеообъектов и явлений;
- обнаружение зон опасной турбулентности и сдвига ветра с приоритетом в секторах взлета и посадки воздушных судов;
- оценка направления и скорости перемещения обнаруженных метеообъектов.

Характерной особенностью МРЛК БАЗ является предоставление метеорологических радиолокационных данных о ветровых характеристиках (векторное поле скорости, горизонтальный и вертикальный сдвиги ветра, удельная скорость диссипации турбулентной энергии) в режиме «ОБЗОР» и в обладающем более высокой пространственной и временной дискретностью режиме «СЕКТОР» [23, 24].

Областью применения МРЛК БАЗ являются аэродромы, посадочные площадки, площадки приземления, районы возможных чрезвычайных ситуаций.

Критерии принятия решения для классификации метеорологических явлений в МРЛК БАЗ

В настоящее время основой для формулирования критериев классификации метеорологических явлений в современных отечественных метеорологических РЛС стали критерии принятия решений, разработанные для локаторов МРЛ-1,2,5¹. Данные критерии основаны на анализе распределения отражаемости атмосферы по вертикали с учетом высоты нулевой изотермы. Локатор является по сути лишь измерителем, от качества работы которого зависит достоверность классификации. Под качеством работы здесь понимается точность оценки отражаемости на фиксированных точно измеренных высотах. Таким образом, критерии классификации метеоявлений научно

обоснованы, методически выверены и являются основополагающими для метеорологических радиолокаторов с различными тактико-техническими характеристиками. Указанный факт использования идентичных основных критериев для локаторов с различными тактико-техническими характеристиками встречается на практике – в локаторах ДМРЛ-С (С-диапазона) и МРЛК БАЗ (Х-диапазона).

Для оперативной работы МРЛК БАЗ в различных климатических зонах РФ необходимо было определить конкретные значения критериев классификации метеоявлений. Для этой задачи была реализована запись «сырого» сигнала с линейного выхода РЛС с возможностью последующей настройки специального программного обеспечения (СПО) комплекса. Указанный сигнал записывался при различных синоптических ситуациях, что позволило накопить в дальнейшем статистически значимые данные для разных климатических зон [21].

Процедура калибровки значений критериев для классификации метеорологических явлений в МРЛК БАЗ для каждого пункта установки локатора выглядела следующим образом.

1. Осуществлялась запись «сырого сигнала» с выхода РЛС.

2. При воспроизведении сигнала МРЛК БАЗ на индикаторе кругового обзора были получены карты классифицированных метеорологических явлений.

3. Осуществлялась валидация полученных данных о классифицированных метеорологических явлениях МРЛК БАЗ с достоверными метеорологическими источниками: наземными метеорологическими станциями (МС) и сертифицированными радиолокаторами сети Росгидромет. Валидация данных осуществлялась в соответствии с разработанной методикой, описанной в [21].

4. При оправдавшемся явлении значение критерия рассматриваемого явления было принято и зафиксировано оператором. В противном случае в таблице критериев для классификации метеоявлений (рис. 1) вводились отличные от предыдущих значения критериев, и далее повторялись пункты 2, 3, 4.

Далее представлен перечень параметров, используемых для классификации метеорологических явлений в МРЛК БАЗ. Обозначения в наименовании параметра:

¹ Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб., 1993. 342 с.

Рис. 1. Виджет «Настройки»
Fig. 1. Widget Setting

H_0 – абсолютная высота изотермы 0°C , м;
 H_3 – высота ($H_0 + 2500$), м;
 $H_{\text{нг}}$ – высота нижней границы радиозах, м;
 $H_{\text{вг}}$ – высота верхней границы облачности, м;
 $H_{\text{троп}}$ – абсолютная высота тропопаузы, м;
 Z_1 – радиолокационная отражаемость на высоте от 0 до 2 км, dBZ;
 Z_2 – радиолокационная отражаемость на высоте от 2 до 4 км, dBZ;
 Z_3 – радиолокационная отражаемость на высоте от 4 до 6 км, dBZ;
 Z_{H_0} – радиолокационная отражаемость на высоте изотермы 0°C ($H_0^\circ\text{C}$), dBZ;
 Z_{H_3} – радиолокационная отражаемость на высоте H_3 , dBZ.

В табл. 1 приведен список параметров критериев для классификации метеорологических явлений в МРЛК БАЗ.

Заметим, что в соответствии с источником² авторами в МРЛК БАЗ были внедрены критерии классификации метеоявлений, которые по неизвестным авторам причинам отсутствуют в современных метеолокаторах (например, в ДМРЛ-С). Так, например, в МРЛК БАЗ был внедрен критерий классификации гроз для холодного периода года, поскольку грозы имеют место в любое время года в умеренных широтах³.

² Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб., 1993. 342 с.

³ Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2014 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова [Электронный ресурс] // МГУ им. М.В. Ломоносова. URL: http://www.momsu.ru/files/disk%20MO%20MSU_2014.pdf (дата обращения: 28.07.2022).

Таблица 1
Table 1

Список критериев для классификации метеорологических явлений в МРЛК БАЗ
List of criteria for the classification of weather phenomena in the
weather radar complex of the near-airfield zone – WR BZ

Код параметра критерия в СПО	Наименование и единицы измерений	Значение	Период эксплуатации
Облачность (слоистообразная облачность)			
Cl_dBZ23_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровнях Z_2 и Z_3 , dBZ	От –10 до 0	Все
Облачность (кучевая облачность)			
Cl_dBZ2_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне Z_2 , dBZ	От 10 до 40	Все
Cl_dBZ3_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне Z_3 , dBZ	От 20 до 50	Все
Cl_dBZ_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости по всему объему облака, dBZ, не менее	От 1 до 10	Все
Cl_tH_min	Пороговое значение $H_{вг}$ для кучевой облачности, м	От 400 до 6000	Все
Облачность (верхнего и среднего ярусов)			
Cl_bH_min	Пороговое значение $H_{нг}$ для облачности верхнего и среднего ярусов, м	От 1000 до 5000	Все
Осадки (слабые, умеренные, сильные)			
Rf_dBZ1	Пороговое значение отражаемости Z_1 , dBZ	От 0 до 30 (осадки слабые) От 5 до 35 (осадки умеренные) От 10 до 40 (осадки сильные)	Все
Ливневые осадки (ливень слабый, умеренный и сильный)			
Rn_dBZ1	Пороговое значение отражаемости Z_1 , dBZ	От 10 до 40 (ливень слабый) От 20 до 45 (ливень умеренный) От 25 до 50 (ливень сильный)	Все
Грозы (вер.: от 30 до 70 %; от 71 до 90 %; > 90 %)			
Th_Y	Пороговое значение комплексного критерия грозовой опасности, $Y = 0,001 \cdot H_{вг} \cdot Z_{H3}$	От 10 до 30 (гроза вероятности 30–70 %) От 10 до 40 (гроза вероятности 71–90 %) От 10 до 50 (гроза вероятности более 90 %)	Теплый
Th_dBZ_H3_max	Максимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H_3 , dBZ	От 50 до 70	Теплый

Окончание таблицы 1
Continuation of Table 1

Код параметра критерия в СПО	Наименование и единицы измерений	Значение	Период эксплуатации
Th_dBZ_H3_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости на уровне H ₃ , dBZ	От 10 до 40 (гроза вероятности 30–70 %) От 10 до 50 (гроза вероятности 71–90 %) От 10 до 60 (гроза вероятности более 90 %)	Теплый
Th_dBZ1	Пороговое значение радиолокационной отражаемости на уровне Z ₁ , dBZ	От 30 до 70	Холодный
Th_dBZ2	Пороговое значение радиолокационной отражаемости на уровне Z ₂ , dBZ	От 30 до 70	Холодный
Град (слабый, умеренный, сильный)			
Hl_Delta_H3_Ht0	Пороговое значение разности высот H ₃ и H ₀ , м	От 1000 до 5000	Теплый
Hl_dBZ_max	Максимальное значение радиолокационной отражаемости по всему объему облака, dBZ	От 30 до 50 (град слабый) От 40 до 60 (град умеренный) От 40 до 70 (град сильный)	Теплый
Шквал (слабый, умеренный, сильный)			
Fl_Delta_tH_Htr	Пороговое значение разности H _{вг} и H _{троп} , м	От –3000 до 3000	Теплый
Fl_Y	Пороговое значение комплексного критерия $Y = 0,001 \cdot H_{вг} \cdot Z_{H3}$	От 300 до 700	Теплый
Fl_dBZ3_min	Минимальное значение радиолокационной отражаемости Z ₃ , dBZ	От 20 до 50	Теплый
Fl_dBZ_max	Максимальное значение радиолокационной отражаемости по всему объему облака, dBZ	От 40 до 60 (шквал слабый) От 45 до 70 (шквал умеренный) От 50 до 70 (шквал сильный)	Теплый
Торнадо (смерч)			
Td_Delta_tH_Htr	Пороговое значение разности H _{вг} и H _{троп} , м	От 2000 до 5000	Теплый
Td_Delta_V_max	Пороговое значение разности скорости ветра между соседними значениями скорости, м/с	От 30 до 50	Теплый
Td_dBZ_max	Пороговое значение максимальной радиолокационной отражаемости по всему объему облака, dBZ	От 50 до 70	Теплый

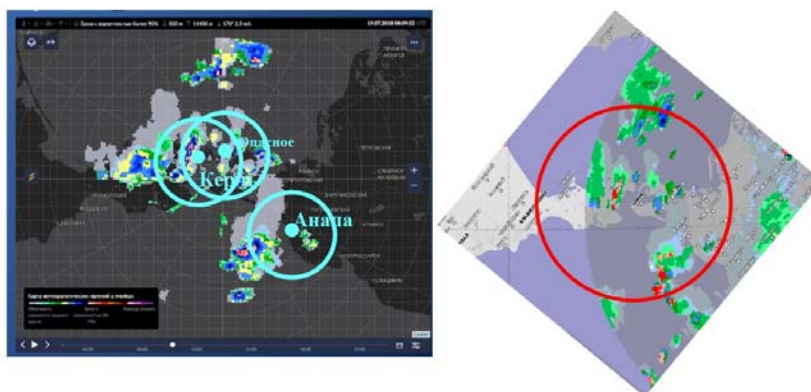


Рис. 2. Карты метеорологических явлений в ячейках по данным МРЛК БАЗ «Тамань» (слева) и ДМРЛ-С «Краснодар» (справа) от 19.07.2018 08:10 UTC. На карте ДМРЛ-С красной окружностью показан радиус действия МРЛК БАЗ

Fig. 2. Maps of weather phenomena in cells according to the WR BZ based "Taman" (left) and DWR-S "Krasnodar" (right) from 19.07.2018 08:10 UTC. The red circle shows the WR BZ radar range on the DWR-S map

Валидация данных о классифицированных метеорологических явлениях МРЛК БАЗ

На текущий момент МРЛК БАЗ прошел предварительные, приемочные, сертификационные испытания и опытную эксплуатацию. МРЛК БАЗ был установлен в следующих пунктах:

- 1) п. Орловка – Тверская область;
- 2) п. Санкт-Петербург – г. Санкт-Петербург;
- 3) п. Вишневогорский – Московская область;
- 4) п. Тамань – Республика Крым.

Для всех указанных пунктов процедуры калибровки подбирались пороговые значения критериев в соответствии с диапазонами значений, указанных в табл. 1.

В качестве примера сопоставления данных о классифицируемых метеорологических явлениях из различных источников продемонстрированы карта метеоявлений в ячейках МРЛК БАЗ с 30-км окрестностями относительно МС (рис. 2 слева) и объединенная карта метеоявлений в ячейках локаторов сети Росгидромет (рис. 2 справа). Объединенная карта метеоявлений радиолокаторов сети Росгидромета была взята из официального источника Росгидромета^{4,5}. Согласно методике грозы, наблюдаемые

на МС, подтверждаются данными МРЛК БАЗ в случае их диагностирования в 30-км окрестности относительно МС.

Грозы в 30-км окрестности МС «Керчь», «Опасное», «Анапа» (голубая окружность на рис. 2) по данным МРЛК БАЗ подтвердилась данными WAREP МС «Керчь», «Опасное», «Анапа» (гроза в окрестности с 07:35 до 10:03 UTC; гроза в окрестности с 07:50 до 11:10 UTC; гроза в окрестности с 07:14 до 10:01 UTC соответственно).

Ниже представлены другие примеры карт метеорологических явлений МРЛК БАЗ в сравнении с проверенными достоверными метеорологическими данными в различных пунктах размещения МРЛК БАЗ (рис. 3, 4).

В работе [21] было продемонстрировано, что МРЛК БАЗ осуществляет классификацию метеорологических явлений с требуемым к метеорологическим радиолокаторам уровнем оправдываемости и достоверности. При этом требуемые значения процента оправдываемости и вероятности ложных тревог были взяты из методических документов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ (Росгидромет)⁶⁻⁸. Так, например, было показано, что оправдывае-

⁴ Данные радарных наблюдений [Электронный ресурс] // Гидрометцентр России. URL: <https://meteo.info.ru/radanim> (дата обращения: 11.12.2019).

⁵ Доступ к данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [Электронный ресурс] // ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 11.12.2019).

⁶ Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета. СПб., 2013. 164 с.

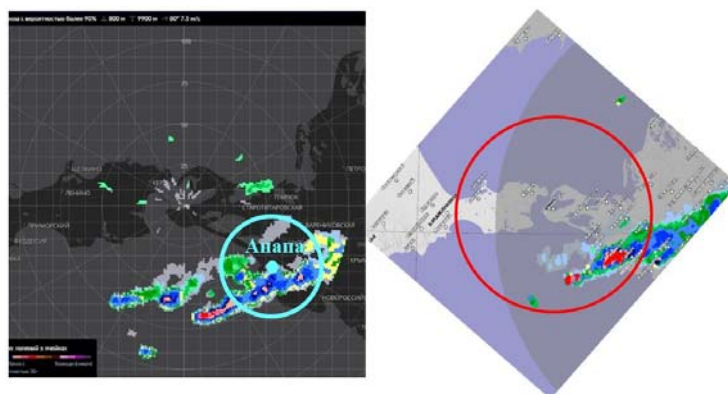


Рис. 3. Карты метеорологических явлений в ячейках по данным МРЛК БАЗ «Тамань» (слева) и ДМРЛ-С «Краснодар» (справа) от 18.07.2018 03:20 UTC. На карте ДМРЛ-С красной окружностью показан радиус действия МРЛК

Fig. 3. Maps of weather phenomena in cells according to the WR BZ based "Taman" (left) and DWR-S "Krasnodar" (right) from 18.07.2018 03:20 UTC. The red circle shows the WR BZ radar range on the DWR-S map

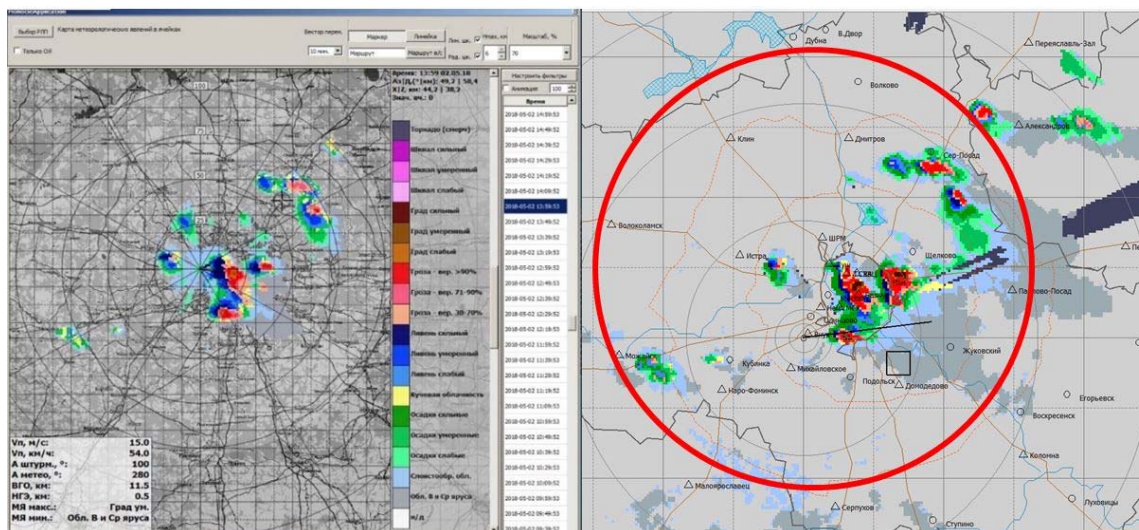


Рис. 4. Карта метеорологических явлений от 13:59 UTC по данным МРЛК БАЗ ЦВКГ им. А.А. Вишневого (слева) и от 14:00 по данным ДМРЛ-С «Долгопрудный» (справа) 02.05.2018 (красным контуром показан радиус действия МРЛК БАЗ)

Fig. 4. Maps of weather phenomena from 13:59 UTC according to the WR BZ "Central Military Clinical Hospital named after A.A. Vishnevsky" (left) and from 14:00 according to the DWR-S "Dolgoprudny" (right) 02.05.2018 (the red contour shows the radar range of the WR BZ)

мость обнаружения опасных явлений погоды (ливни, грозы, град) в МРЛК БАЗ составила более 86 % при минимальном требуемом значении оправдываемости не менее 70 %⁷. Вероятность ложных тревог опасных явлений погоды составила менее 1 % при максимальном требуемом значении вероятности ложных тре-

вог не более 40 %⁸. В работе [21] было указано, что на основании проведенного статистического анализа можно сделать статистически обоснованный вывод о приемлемом качестве работы малогабаритного метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны МРЛК БАЗ.

⁷ Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М., 2014. 110 с.

⁸ Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М., 2017. 121 с.

Предоставленные карты метеорологических явлений МРЛК БАЗ по времени, пространству и классификации метеоявлений соответствуют достоверным источникам метеоинформации. Таким образом, выбранные пороговые значения критериев метеоявлений в соответствии с описанной выше методикой были установлены верно.

При этом следует заметить, что в некоторых случаях, в особенности для классификации гроз, града, стоит использовать данные об удельной скорости диссипации турбулентной энергии для более высоких показателей оправдываемости и достоверности.

Таким образом, дальнейшее направление исследований связано с разработкой метода учета данных об удельной скорости диссипации турбулентной энергии в классификации метеорологических явлений при помощи дополнительного набора статистических данных в различных климатических зонах Европейской территории России – Верхнем Поволжье и Краснодарском крае.

Заключение

Таким образом, в настоящее время создан, испытан и сертифицирован уникальный отечественный метеорологический радиолокационный комплекс ближней зоны аэродрома МРЛК БАЗ с низкими массогабаритными характеристиками. Комплекс в полной мере соответствует современным международным и отечественным требованиям.

Критерии классификации метеоявлений в МРЛК БАЗ были сформированы в соответствии с руководящими документами Росгидромета, в которых даны универсальные параметры для определения класса метеорологического явления в метеолокаторах с различными тактико-техническими характеристиками. В отличие от других современных локаторов в МРЛК БАЗ также учтены параметры классификации гроз в холодное время. Значения критериев классификации МРЛК БАЗ были получены в результате анализа большого объема накопленных «сырых» сигнальных данных при различных синоптических ситуациях.

Благодаря корректно сформированным значениям критериев МРЛК БАЗ было показано, что качество работы малогабаритного метеорологи-

ческого радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны является приемлемым.

При этом следует заметить, что турбулентность также является информативным признаком конвективной активности атмосферы. В этом случае для повышения оправдываемости и достоверности классификации ливней, гроз, града целесообразно рассмотреть вопрос использования данных об удельной скорости диссипации турбулентной энергии в критериях классификации метеоявлений, используя статистические данные различных климатических зон Европейской территории России.

Список литературы

1. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: учеб. пособие. М.: МГУ, 2007. 127 с.
2. Гущина Д.Ю. Синоптическая метеорология: учеб. пособие. М.: МГУ, 2013. 103 с.
3. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.
4. Иванова А.Р. Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 33–46.
5. Fabry F. Radar meteorology: principles and practice. Cambridge University Press, 2015. 248 p. DOI: 10.1017/CBO9781107707405
6. Kumjian R.M. Weather radars. In: Remote sensing of clouds and precipitation. Cham: Springer International Publishing, 2018. Pp. 15–63. DOI: 10.1007/978-3-319-72583-3_2
7. MacGorman D.R., Biggerstaff M.I., Schuur T.J. Formation of charge structures in a supercell // Monthly Weather Review. 2010. Vol. 138, iss. 10. Pp. 3740–3761. DOI: 10.1175/2010MWR3160.1
8. Emersic C., Saunders C.P.R. Further laboratory investigations into the Relative Diffusional Growth Rate theory of thunderstorm electrification // Atmospheric Research. 2010. Vol. 98, iss. 2–4. Pp. 327–340. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.07.011
9. Albrecht B., Fang M., Ghate V. Exploring stratocumulus cloud-top entrainment processes and parameterizations by using Doppler cloud radar observations // Journal of the

Atmospheric Sciences. 2016. Vol. 73, iss. 2. Pp. 729–742. DOI: 10.1175/JAS-D-15-0147.1

10. Koistinen J., Hohti H., Pohjola H. Diagnosis of precipitation detection range [Электронный ресурс] // The 32nd International Conference on Radar Meteorology. AMS, 2005. 3 p. URL: <https://ams.confex.com/ams/32Rad11Mes/webprogram/Paper96254.html> (дата обращения: 13.05.2022).

11. Nanding N., Rico-Ramirez M.A. Precipitation measurement with weather radars. ICT for smart water systems: measurements and data science. The Handbook of Environmental Chemistry, 2019. Vol. 102. Pp. 1–24. DOI: 10.1007/698_2019_404

12. Boodoo S. Quantitative precipitation estimation from a C-band dual-polarized radar for the 8 July 2013 flood in Toronto, Canada / S. Boodoo, D. Hudak, A. Ryzhkov, P. Zhang, N. Donaldson, D. Sills, J. Reid // Journal of Hydrometeorology. 2015. No. 16. Pp. 2027–2044. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0003.1

13. Ефремов В.С. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов / В.С. Ефремов, Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.В. Лаврукевич, Р.М. Седлецкий [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 10. С. 4. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/oct09/6/text.html#1> (дата обращения: 29.10.2021).

14. Battaglia A. G band atmospheric radars: a new frontier in cloud physics / A. Battaglia, C.D. Westbrook, S. Kneifel, P. Kollias, N. Humpage, U. Löhnert, J. Tyynelä, G.W. Petty // Atmospheric Measurement Techniques. 2014. Vol. 7, iss. 6. Pp. 1527–1546. DOI: 10.5194/amt-7-1527-2014

15. Bechini R., Baldini L., Chandrasekar V. Polarimetric radar observations of the ice region of precipitation clouds at C-band and X-band radar frequencies // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2013. Vol. 52, iss. 5. Pp. 1147–1169. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-055.1

16. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети метеорологических радиолокаторов // Распространение радиоволн (РРВ-24): сборник трудов XXIV Всероссийской научной конференции. Иркутск, 29 июня – 05 июля 2014 г. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. Т. 3. С. 133–136.

17. Немудрый К.В. Аэродромы и аэропорты как один из элементов системы региональной авиации России [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2014. № 75. 9 с. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/3d8/3d861abaea6eace2d677527b4fe34ca.pdf> (дата обращения: 29.10.2021).

18. Istok M., Crum T. WSR-88D and TDWR-SPG data status and plans [Электронный ресурс] // National Weather Service. Family Of Services. Partners Meeting. Phoenix, AZ. 15 January 2009. URL: https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/Level_II/FOS_011509.pdf (дата обращения: 29.10.2021).

19. Germann U. Radar network / U. Germann, J. Figueras, M. Gabella, A. Hering, I. Sideris, B. Calpini // The international review of weather, climate and hydrology technologies and services. April 2016. Pp. 62–65.

20. Vasiliev O. The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex “Monocle” / O. Vasiliev, E. Bolelov, K. Galaeva, N. Gevak, S. Zyabkin, E. Kolesnikov, A. Peshko, I. Sinitsyn // 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), 2021. Pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352

21. Галаева К.И. Анализ результатов испытаний и сертификации метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 1. С. 28–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-28-40

22. Bolelov E.A. Analysis of the height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers / E.A. Bolelov, O.V. Vasiliev, K.I. Galaeva, S.A. Ziabkin // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 1. С. 19–27. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-19-27

23. Галаева К.И. Обоснование требований к современным метеорологическим локаторам ближней зоны аэродрома // Перспективные бортовые радиоэлектронные комплексы и системы: сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского». Москва, 13–14 апреля 2017. М., 2017. С. 45–48.

24. Галаева К.И. Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокацион-

ным комплексом ближней аэродромной зоны / К.И. Галаева, Э.А. Болелов, И.Б. Губерман, А.А. Ещенко, С.В. Далецкий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20 (331). С. 74–81.

References

1. Veltishchev, N.F., Stepanenko, V.M. (2007). Mesometeorological processes: tutorial. Moscow: MGU, 127 p. (in Russian)
2. Gushchina, D.Yu. (2013). Synoptic meteorology: tutorial. Moscow: MGU, 103 p. (in Russian)
3. Bogatkin, O.G. (2009). Fundamentals of aviation meteorology: textbook. St. Petersburg: RGGMU, 339 c. (in Russian)
4. Ivanova, A.R. (2009). An experience of the humidity forecasts verification and assessment of their applicability in forecasting of the aircraft icing zones. *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 34, no. 6, pp. 354–363. DOI: 10.3103/S106837390906003X (in Russian)
5. Fabry, F. (2015). Radar meteorology: principles and practice. Cambridge University Press, 248 p. DOI: 10.1017/CBO9781107707405
6. Kumjian, R.M. (2018). Weather Radars. In: Remote Sensing of Clouds and Precipitation. Cham: Springer International Publishing, pp. 15–63. DOI: 10.1007/978-3-319-72583-3_2
7. MacGorman, D.R., Biggerstaff, M.I., Schuur, T.J. (2010). Formation of charge structures in a supercell. *Monthly Weather Review*, vol. 138, issue 10, pp. 3740–3761. DOI: 10.1175/2010MWR3160.1
8. Emersic, C., Saunders, C.P.R. (2010). Further laboratory investigations into the Relative Diffusional Growth Rate theory of thunderstorm electrification. *Atmospheric Research*, vol. 98, issue 2–4, pp. 327–340. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.07.011
9. Albrecht, B., Fang, M., Ghate, V. (2016). Exploring stratocumulus cloud-top entrainment processes and parameterizations by using Doppler cloud radar observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 73, issue 2, pp. 729–742. DOI: 10.1175/JAS-D-15-0147.1
10. Koistinen, J., Hohti, H., Pohjola, H. (2005). Diagnosis of precipitation detection range. *The 32nd International Conference on Radar Meteorology*. AMS, 3 p. Available at: <https://ams.confex.com/ams/32Rad11Meso/webprogram/Paper96254.html> (accessed: 13.05.2022).
11. Nanding, N., Rico-Ramirez, M.A. (2019). Precipitation measurement with weather radars. ICT for smart water systems: measurements and data science. *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 102, pp. 1–24. DOI: 10.1007/698_2019_404
12. Boodoo, S., Hudak, D., Ryzhkov, A., Zhang, P., Donaldson, N., Sills, D., Reid, J. (2015). Quantitative precipitation estimation from a C-band dual-polarized radar for the 8 July 2013 flood in Toronto, Canada. *Journal of Hydrometeorology*, no. 16, pp. 2027–2044. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0003.1
13. Efremov, V.S., Vovshin, B.M., Vylegzhanin, I.S., Lavrukevich, V.V., Sedletsky R.M. (2009). Polarized Doppler C-band Weather Radar with Pulse Compression. *Journal of Radio Electronics*, no. 10, p. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/oct09/6/text.html#1> (accessed: 29.10.2021). (in Russian)
14. Battaglia A., Westbrook, C.D., Kneifel, S., Kollias, P., Humpage, N., Löhnert, U., Tyynelä, J., Petty, G.W. (2014). G band atmospheric radars: a new frontier in cloud physics. *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 7, issue 6, pp. 1527–1546. DOI: 10.5194/amt-7-1527-2014
15. Bechini, R., Baldini, L., Chandrasekar, V. (2013). Polarimetric radar observations of the ice region of precipitation clouds at C-band and X-band radar frequencies. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52, issue 5, pp. 1147–1169. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-055.1
16. Zhukov, V.Y., Shchukin, G.G. (2014). Status and prospects of weather radar network. *Rasprostraneniye radiovoln (RRV-24): sbornik trudov XXIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. Irkutsk: ISZF SO RAN, vol. 3, pp. 133–136. (in Russian)
17. Nemudryi, K.V. (2014). Airdromes and airports as one of the elements of Russian regional aviation system. *Trudy MAI*, no. 75, 9 p. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/3d8/3d861abae6eacea2d677527b4fe34ca.pdf> (accessed: 29.10.2021). (in Russian)
18. Istok, M., Crum, T. (2009). WSR-88D and TDWR-SPG data status and plans. *National Weather Service. Family of Services*. Partners Meeting. Phoenix, AZ. 15 January. Available at: https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/Level_II/FOS_011509.pdf (accessed: 29.10.2021).

19. Germann, U., Figueras, J., Gabella, M., Hering, A., Sideris, I., Calpini, B. (2016). Radar network. *The international review of weather, climate and hydrology technologies and services*, April, pp. 62–65.

20. Vasiliev, O., Bolelov, E., Galaeva, K., Gevak, N., Zyabkin, S., Kolesnikov, E., Peshko, A., Sinitsyn, I. (2021). The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex “Monocle”. *2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*, pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352

21. Galaeva, K.I. (2020). Results analysis of the tests and certification of near-airfield meteorological radar complex. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 28–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-28-40 (in Russian)

22. Bolelov, E.A., Vasiliev, O.V., Galaeva, K.I., Ziabkin, S.A. (2020). Analysis of the

height difference of the zero isotherm according to two temperature profilers. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 19–27. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-19-27

23. Galaeva, K.I. (2017). Substantiation of requirements for modern meteorological locators of the near zone of the aerodrome. *Perspektivnyye bortovyye radioelektronnyye komplekсы i sistemy: sbornik trudov XIV Vserossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati N.E. Zhukovskogo»*. Moscow, pp. 45–48. (in Russian)

24. Galaeva, K.I., Bolelov, E.A., Guberman, I.B., Eschenko, A.A., Daletskiy, S.V. (2018). Justification of tasks, solved by near-airfield meteorological radar complex. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no 20 (331), pp. 74–81. (in Russian)

Сведения об авторах

Васильев Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, vas_ov@mail.ru.

Коротков Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, vas_ov@mail.ru.

Галаева Ксения Игоревна, преподаватель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, ks.galaeva@mail.ru.

Бояренко Эльвира Сергеевна, аспирант кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, boyarenko.elvira@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vas_ov@mail.ru.

Sergei S. Korotkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vas_ov@mail.ru.

Ksenia I. Galaeva, Assistant of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ks.galaeva@mail.ru.

Elvira S. Boyarenko, Post-graduate of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, boyarenko.elvira@mail.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

28.10. 2022
23.03.2023

Received
Accepted for publication

28.10. 2022
23.03.2023