

УДК 551.501.81

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29

Экспериментальный статистический анализ радиолокационных сигналов, отраженных от опасных метеорологических явлений

Э.С. Бояренко¹, Э.А. Болелов¹, О.В. Васильев¹, С.С. Коротков¹
¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

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

Аннотация: Характер причин возникновения предпосылок к летным происшествиям по метеорологическим условиям является неизменным в течение многих лет. Для эффективной работы авиации необходимо решать вопросы своевременного обнаружения опасных метеоявлений и определения их интенсивности. В настоящей статье обсуждаются исследования атмосферной отражаемости и турбулентности в кучево-дождевых облаках с использованием метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны. Экспериментальные исследования проводятся в интересах получения оценок статистических характеристик распределения отражаемости и турбулентности для опасных метеоявлений. Представлена методика проведения экспериментального исследования по сбору информации об опасных метеорологических явлениях (ливень, гроза и град), особенностях распространения радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в рассматриваемых условиях для Тверской области. Проведен анализ полученных результатов: сравнения метеорологической информации, полученной при помощи метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны с достоверными источниками данных метеорологических наблюдений, полученных в ходе экспериментальных исследований. Произведены исследования горизонтальных разрезов и вертикальных профилей рассматриваемых параметров опасных метеоявлений, связанных с кучево-дождевой областью. Сформирован банк данных. Построены гистограммы распределения информационных параметров. В статье рассмотрены результаты аппроксимации экспериментальных данных по критерию χ^2 для различных законов распределения. Показано, что распределения отражаемости и турбулентности могут быть описаны обобщенным законом Райса. Полученные результаты могут быть использованы для коррекции критериев классификации опасных метеоявлений, для последующего повышения оправдываемости и достоверности при классификации опасных метеоявлений. Дальнейшее развитие способа обработки метеорологической информации также имеет большое значение для более корректной интерпретации результатов обработки экспериментальных данных дистанционного зондирования метеорологических явлений.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, ближняя зона аэродрома, опасные метеорологические явления, классификация метеорологических явлений, статистический анализ данных.

Для цитирования: Бояренко Э.С. Экспериментальный статистический анализ радиолокационных сигналов, отраженных от опасных метеорологических явлений / Э.С. Бояренко, Э.А. Болелов, О.В. Васильев, С.С. Коротков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 5. С. 19–29. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29

Experimental statistical analysis of radar signals reflected from weather hazards

E.S. Boyarenko¹, E.A. Bolelov¹, O.V. Vasiliev¹, S.S. Korotkov¹
¹Moscow 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 nature of the causes of prerequisites for flight accidents due to meteorological conditions has remained unchanged for many years. For the effective operation of aviation, it is necessary to solve the issues of the timely detection of weather hazards

and the identification of their intensity. This article discusses the research into the atmospheric reflectivity and turbulence in cumulonimbus clouds using a near-field meteorological radar system. Experimental studies are carried out with the aim of obtaining estimates of statistical characteristics of the reflectivity distribution and turbulence for weather hazards. The methodology for conducting an experimental study to obtain information about the weather hazards (rain shower, thunderstorm and hail), special features of the radar reflectivity propagation and the specific rate of turbulent energy dissipation in the considered conditions for the Tver region is presented. The analysis of the obtained results has been carried out: comparisons of meteorological data derived, using the meteorological radar complex of the near airfield zone (WR BZ), with the reliable sources of meteorological observation data obtained during experimental studies. Studies of horizontal sections and vertical profiles of the weather hazards parameters under consideration, associated with the cumulonimbus area, have been carried out. A data bank has been formed. Histograms of the information parameter distribution have been constructed. The article considers the results of experimental data approximation, using the χ^2 criterion for various distribution laws. It is shown that the distributions of reflectivity and turbulence can be described by the generalized Rice's law. The results obtained can be used to correct the classification criteria of weather hazards to subsequently increase the justification and reliability of the weather hazard classification. The further development of the method to process meteorological information is also of paramount importance to more correctly interpretate experimental data processing results of remote meteorological phenomena sensing.

Key words: meteorological radar, near-airfield zone, weather hazards, classification of weather phenomena, statistical data analysis.

For citation: Boyarenko, E.S., Bolelov, E.A., Vasiliev, O.V., Korotkov, S.S. (2023). Experimental statistical analysis of radar signals reflected from weather hazards. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 5, pp. 19–29. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29

Введение

Мониторинг условий погоды является важнейшей задачей для гражданской авиации, поскольку неблагоприятные метеосостояния продолжают оставаться часто определяющими факторами в ряде авиационных происшествий и инцидентов. Радиолокационный мониторинг погоды предполагает использование наземных метеорологических радиолокационных станций (РЛС) для анализа метеосостояния и классификации опасных явлений погоды в соответствии с принятыми критериями [1]. Как показано в [2, 3], данные критерии имеют, по мнению авторов, ряд недостатков: они далеки от оптимальных с точки зрения теории принятия решений, не учитывают информацию о распределении ветровых характеристик, а также особенности кучево-грозовой активности в различных климатических зонах. Очевидно, что один из приоритетных путей повышения достоверности классификации опасных метеоявлений – совместный учет высотного распределения отражательных и турбулентных характеристик атмосферы для различных фаз развития кучево-грозовой облачности. Тем более что вопрос зависимости параметров удельной скорости диссипации турбулентной энергии для различных метеоявлений до сих пор де-

тально не изучен [4–7]. Оптимизация критериев классификации с точки зрения теории различения статистических гипотез может быть достигнута путем использования вероятностных описаний распределения турбулентности и отражаемости по высотам для различных метеоявлений.

Любое исследование экспериментальных данных включает в себя несколько этапов [8–10].

1. Определение цели исследований.
2. Разработку методики проведения исследований.
3. Сбор экспериментальных данных, их предварительный обзор, оценку факторов и исхода.
4. Анализ данных.
5. Интерпретацию результатов анализа.
6. Аппроксимацию экспериментальных данных.

Очевидно, что конечной целью проводимых экспериментальных исследований является получение оценок вероятностных описаний распределения отражаемости и турбулентности для их последующего использования в решающих правилах классификации опасных метеоявлений.

На стадии методики проведения эксперимента (первый этап) необходимо сформировать требования к проведению исследований:

какой параметр будет являться исходом, характеризующим результат, как и какие данные о характере метеоявлений будут собраны, понять и определить гипотезу исследования, определить размер выборки, составить план проведения эксперимента.

Второй этап – проведение экспериментальных исследований, сбор данных, их регистрация и ввод в базу данных. Тут же проводится предварительный анализ полученных данных, который включает анализ и отбраковку «промахов» и «сбоев», восстановление пропущенных измерений, проверку однородности, объединение серий измерений и др.

Анализ данных – третий шаг проведения экспериментального исследования. Для обработки и анализа эмпирических данных, полученных в результате эксперимента, применяются различные методы математических вычислений. Первый этап этой работы заключается в изучении закона распределения эмпирических данных и проверке гипотез, на которых основан выбранный метод статистического анализа, оценка параметров распределения данных экспериментальных исследований и собственно проведение статистического анализа, а также определение статистической значимости результатов исследования.

На четвертом этапе делаются выводы и заключения по оценке всех параметров генеральной совокупности исследуемой выборки. В данном случае результаты выборочных исследований являются только отправной точкой для получения общих выводов.

Аппроксимация экспериментальных данных – это заключительный этап проведения исследований. Процесс аппроксимации заключается в построении приближенной (аппроксимирующей) функции, наиболее близко подходящей к исходным данным, но более простым.

Таким образом, данная статья посвящена оценке статистических характеристик распределения отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии атмосферы для опасных метеоявлений класса «ливень – гроза – град», пока для Верхневолжского региона.

Методика проведения экспериментальных исследований регистрации и анализа метеорологических явлений в МРЛК БЗ

С целью получения статистических описаний высотных распределений отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии был проведен анализ таких метеоявлений, как ливень, гроза и град, полученных на аэродроме Орловка (Тверская область, Zubцовский район) летом 2021 и 2022 гг. В качестве инструмента получения исходных данных была использована радиолокационная информация, полученная на выходе метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны (МРЛК БЗ) «Монокль». Рассмотрению было подвергнуто более 19 характерных дней, в течение которых проводились радиолокационные наблюдения за ливнями, грозами и градом.

Для этой задачи была реализована запись «сырого» сигнала с линейного выхода РЛС с возможностью последующего использования специального программного обеспечения (СПО) комплекса. Указанный сигнал записывался при различных синоптических ситуациях, что позволило накопить в дальнейшем статистически значимые данные.

Процедура регистрации и статистического анализа сигналов, отраженных от различных метеоявлений в МРЛК БЗ, выглядела следующим образом.

1. В ходе проведения эксперимента оператор на радиолокационной станции производил визуальную регистрацию координат погодных явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, по индикатору кругового обзора во времени, а также подсчет количества отраженных от ливней, гроз, града сигналов. Кроме того, информация, полученная с выходов приемников метеорологической станции, заносилась в базу данных в виде «сырого сигнала». Периодически фиксировались изображения обнаруженных метеоявлений на индикаторе РЛС.

2. При воспроизведении сигнала МРЛК БЗ на индикаторе были получены карты класси-

фицированных метеорологических явлений. С этой карты снималась информация о дальности до интересующего явления, длине его проекции на наклонную дальность и длительности его существования.

3. Далее осуществлялась валидация полученных данных о классифицируемых МРЛК БЗ метеорологических явлениях с достоверными метеорологическими источниками: наземными метеорологическими станциями (МС) и сертифицированными радиолокаторами сети Росгидромета (рис. 1). Валидация данных осуществлялась в соответствии с разработанной методикой, описанной в [3]. К сопоставлению данных о явлениях по данным МРЛК БЗ в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения на аэродроме Орловка были привлечены следующие метеорологические станции: Волоколамск (удаление от МРЛК БЗ 61 км), Гагарин (удаление от МРЛК БЗ 65 км), Можайск (удаление от МРЛК БЗ 94 км) и Старица (удаление от МРЛК БЗ 40 км).

4. При оправдавшемся явлении оно было принято и зафиксировано оператором для дальнейшего анализа.

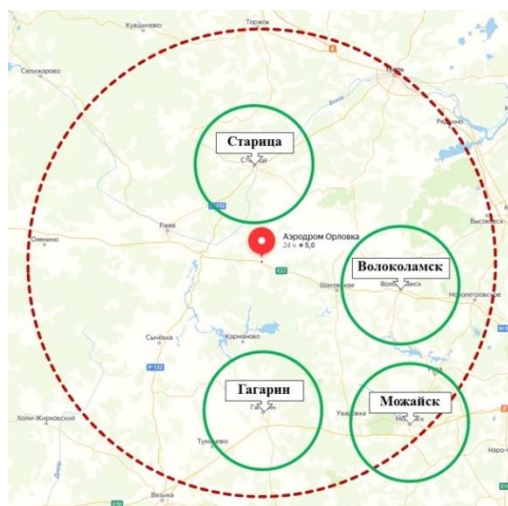


Рис. 1. Расположение МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения на аэродроме Орловка, имеющей зону перекрытия с МРЛК БЗ

Fig. 1. Location of meteorological stations in a 100-kilometer zone relative to the observation station at Orlovka airfield, which has an overlap zone with the WR BZ

5. Далее был проведен анализ горизонтального разреза кучево-дождевых облаков, в результате которого для каждого разреза кучево-дождевых облаков было найдено распределение отражаемости (Z) и удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) [2].

Статистический анализ экспериментальных данных опасных метеорологических явлений «ливень – гроза – град»

На основе анализа экспериментальных данных были получены статистические распределения экспериментальных данных для ливней, гроз и града.

В процессе обработки данных на каждой высоте с дискретом 1 км были оценены следующие необходимые параметры, представленные на рис. 2:

- 1) максимальное значение радиолокационной отражаемости;
- 2) максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии.

Пример некоторых первичных данных о радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии, полученных при наблюдении за ливневыми осадками, представлен в табл. 1.

Также по вышеприведенной методике с помощью МРЛК БЗ были получены первичные данные высотного распределения параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии для гроз и града.

В качестве первого обязательного этапа анализа параметров была применена проверка вида закона распределения случайной величины.

Путем анализа графика распределения изучаемых параметров и коэффициентов асимметрии был осуществлен выбор вида закона распределения, а также произведена оценка эксцесса. На основании сравнительного анализа меры подобия гистограммы распределения эмпирических данных с видами плотностей распределения известных за-

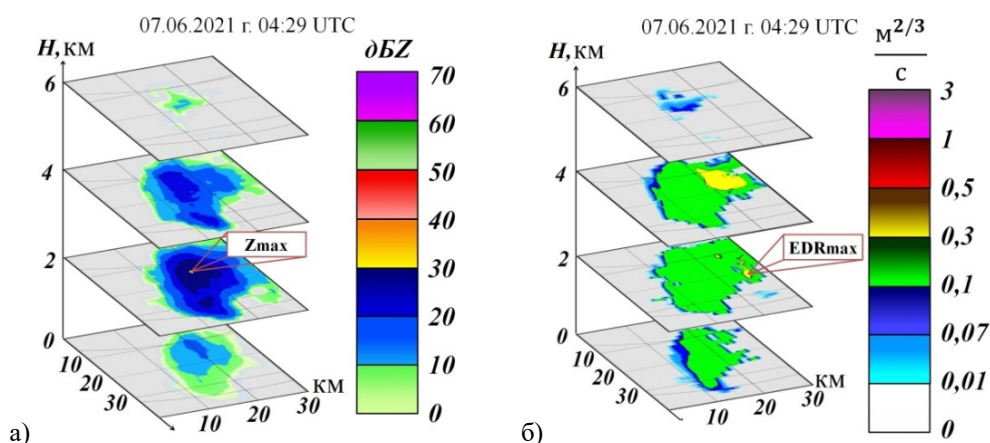


Рис. 2. Структура пространственного распределения:
а – радиолокационной отражаемости; б – удельной скорости диссипации турбулентной энергии
Fig. 2. Structure of the space distribution of (a) radar reflectivity and (б) the specific rate of turbulent energy dissipation

Таблица 1
Table 1

Фрагмент экспериментальных данных $Z_{\max}$ и $EDR_{\max}$ ливней
Fragment of experimental data $Z_{\max}$ and $EDR_{\max}$ of rain showers

№ Опыта	Н, км	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$Z_{\max}$	10,94	25,03	26	20,67	21,43	20,41	13,61	0			
2		8,66	24,39	25,77	26,94	23,98	23,19	17,41	11,67	0		
3		12,18	24,82	29,59	24,5	21,69	19,11	8,94	0			
4		4,08	22,3	23,18	23,91	22,47	15,65	6,7	0			
...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
47		13,98	29,8	35,69	32,29	27,48	20,21	0				
48		13,04	32,43	33,9	29,77	22,55	0					
49		9,86	23,19	26,14	21	13,13	0					
50		9,11	24,57	24,25	21,18	13,31	0					
1	$EDR_{\max}$	0,098	0,595	0,269	0,649	0,286	0,158	0				
2		0,1248	0,2426	0,2793	0,3624	0,3498	0,3216	0,2726	0			
3		0,1535	0,2596	0,2360	0,2936	0,2944	0,2152	0				
4		0,0646	0,1494	0,2499	0,2650	0,2884	0,2647	0,1459	0			
...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
47		0,2443	0,4060	0,4567	0,5590	0,6069	0,6851	0				
48		0,2336	0,4226	0,4161	0,4198	0,5154	0,0877	0				
49		0,0873	0,2240	0,2878	0,2644	0,0911	0					
50		0,1161	0,2080	0,2444	0,2304	0,1623	0,0127	0				

конов был проведен подбор подходящего распределения для проведения дальнейшей оценки.

Поскольку все данные, полученные в результате проведения эксперимента, однород-

ны (все ряды ведут себя примерно одинаково), было выполнено усреднение по опытам, то есть были просуммированы все значения параметров для каждой высоты и произведено деление на общее количество испыта-

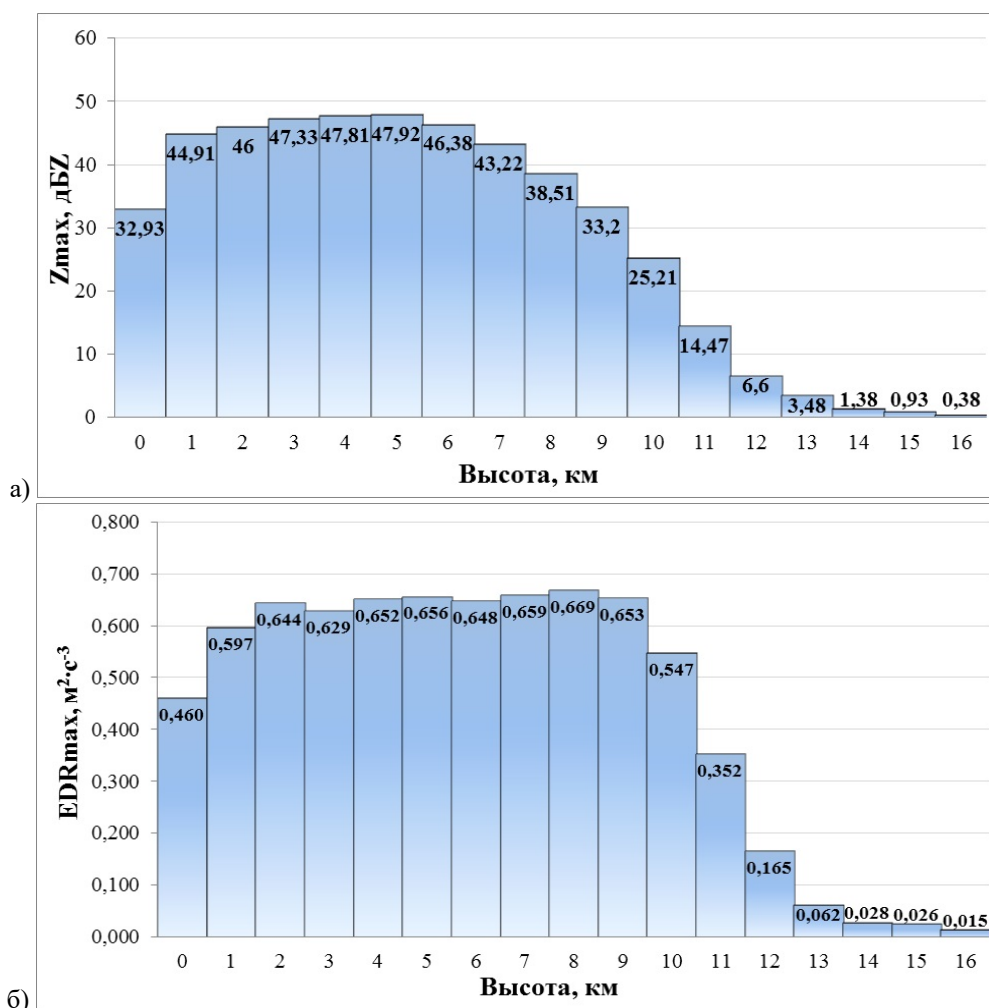


Рис. 3. Пример гистограммы распределения параметров от высоты для града: а – $Z_{\max}$; б – $EDR_{\max}$
Fig. 3. Example of the histogram of parameters (a) $Z_{\max}$ and (b) $EDR_{\max}$ distribution from the height for hail

ний – 50. Сумма этих экспериментальных относительных частот должна быть равна единице. Далее были заданы центры интервалов высоты (в километрах), необходимые для построения графика гистограммы. По исходным данным были построены гистограммы относительных частот (рис. 3).

После выбора подходящего закона распределения была произведена оценка его параметров. Определены выборочные характеристики: выборочное среднее и выборочное СКО. Поскольку эксперимент не подразумевал попадание каких-либо результатов опытов в разные интервалы, для нахождения характеристик были применены формулы (1) и (2) для вычисления характеристик дискретных случайных величин [11]:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (1)$$

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 p_i, \quad (2)$$

где p_i – по сути эмпирические отнормированные частоты;

x_i – значения высоты;

$x_i p_i$ – произведение эмпирических частот и значения высоты;

a – произведения эмпирических частот и значения высоты просуммированы по всем интервалам высоты, получаем выборочное среднее.

Выборочное СКО (формула (3)) было рассчитано как корень из дисперсии:

$$\sigma_x = \sqrt{D(x)}. \quad (3)$$

Таблица 2
Table 2

Параметры распределения Райса для ливня, грозы и града
Rice distribution parameters for the rain shower, thunderstorm and hail

Параметр	Ливень	Гроза	Град
	Радиолокационная отражаемость		
Математическое ожидание	$\mu_x = 2$	$\mu_x = 3,5$	$\mu_x = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 3$	$\sigma_x = 4$
	Удельная скорость диссипации турбулентной энергии		
Математическое ожидание	$\mu_x = 2$	$\mu_x = 3$	$\mu_x = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 4$	$\sigma_x = 4,5$

Для выбранного закона распределения была осуществлена проверка статистических гипотез о соответствии эмпирических данных с применением критериев согласия. В тех случаях когда гипотеза подтверждена, был сделан вывод о том, что выбранное теоретическое распределение согласуется с данными, полученными в результате проведения экспериментального исследования. В противном случае, когда гипотеза не принята, было сделано заключение, что искомый теоретический закон распределения плохо согласуется с результатами наблюдений.

В соответствии с приведенной выше методикой были проверены гипотезы о том, что искомое распределение подчиняется логнормальному закону распределения, распределению Вейбулла, Рэлея, β -распределению по критерию χ^2 Пирсона. Однако выбранные теоретические законы для уровня значимости 0,01 плохо согласовывались с опытными данными и были отвергнуты. На основании проведенной проверки был сделан вывод о том, что наиболее подходящее распределение, описывающее параметры отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии по высоте в соответствии с выбранным критерием, – обобщенный закон Рэлея – Райса.

Аппроксимация экспериментальных данных параметров отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии

ливней, гроз и града была проведена с использованием критерия χ^2 [12] с уровнем значимости 0,01 для распределения Райса, имеющего плотностью распределения указанную ниже

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x\mu}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, μ – математические ожидания и σ^2 – дисперсия.

Параметры μ и σ^2 в данном случае не являются математическим ожиданием и дисперсией. Эти параметры отражают форму и масштаб распределений, но их можно считать в качестве оценки математического ожидания и дисперсии при сравнительном анализе.

Полученные по результатам экспериментальных исследований плотности распределения вероятностей высоты максимальных значений отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии для ливня, гроз и града имеют параметры, указанные в табл. 2.

Распределения Райса для параметров турбулентности и отражаемости, рассматриваемых метеоявлений отображены на рис. 4 и 5.

Данные оценки плотности распределения вероятностей для ливней, гроз и града позволили выявить некоторые глобальные харак-

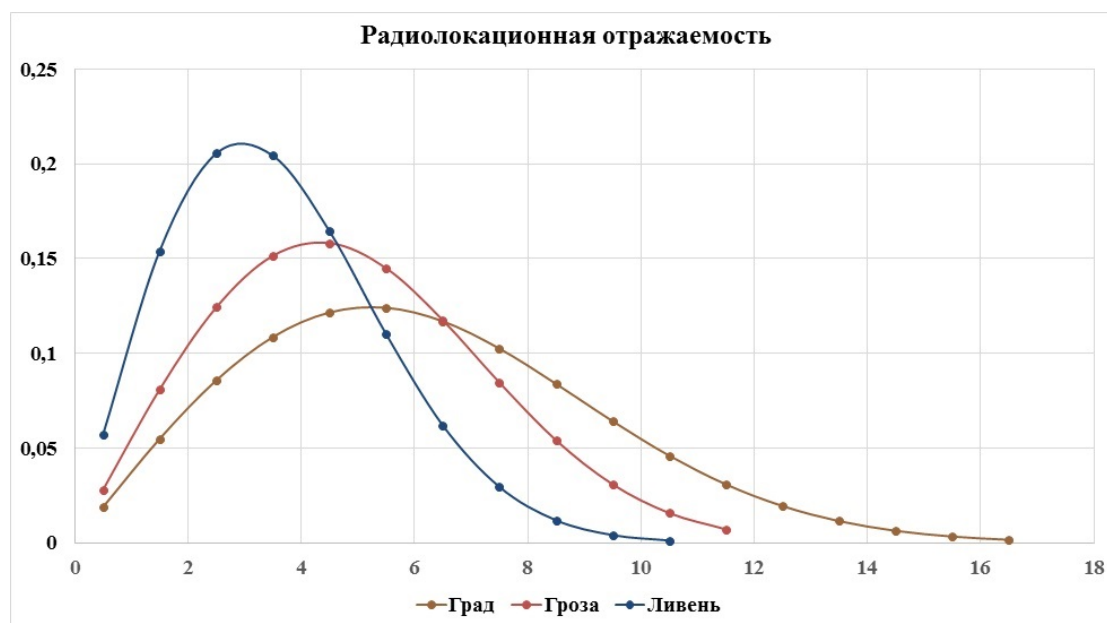


Рис. 4. Плотность распределения вероятности радиолокационной отражаемости для рассматриваемых метеоявлений
Fig. 4. Probability distribution density of radar reflectivity for the weather phenomena under consideration

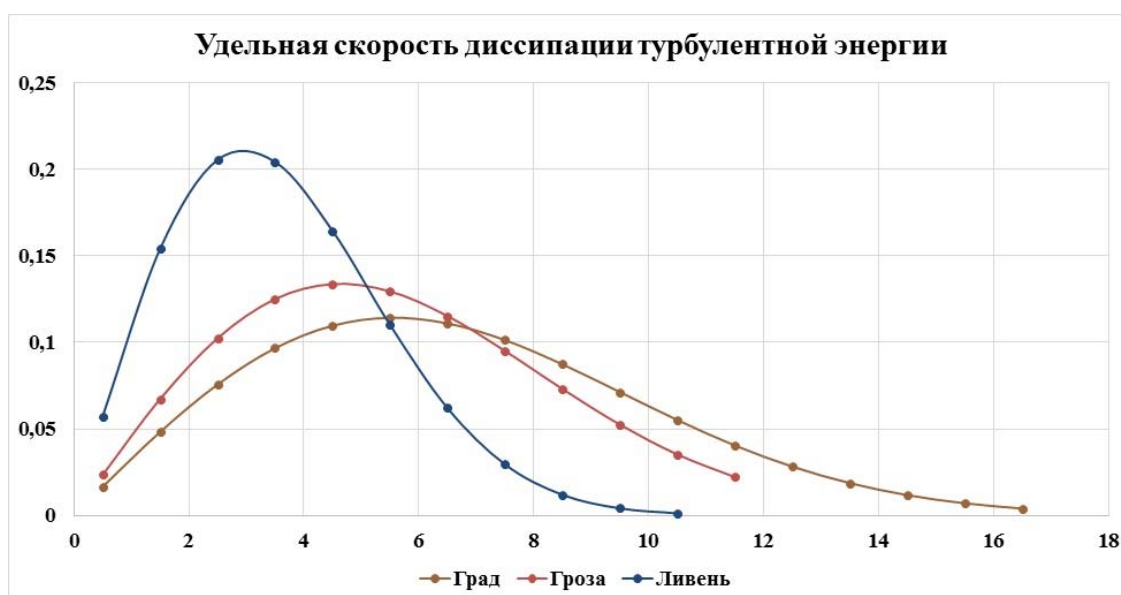


Рис. 5. Плотность распределения вероятности и удельная скорость диссипации турбулентной энергии для рассматриваемых метеоявлений
Fig. 5. Probability distribution density of the turbulent energy dissipation specific rate for the weather phenomena under consideration

теристики развития конвективной облачности и могут быть использованы для коррекции критериев классификации опасных метеоявлений в Верхневолжском регионе в теплое время года.

Заключение

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований высотного распределения атмосферной отражаемости

и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в ливнях, грозах и граде, полученные при использовании отечественного метеорологического радиолокационного комплекса МРЛК БЗ «Монокль». Суть исследований сводится к анализу радиолокационных сигналов, отраженных от реальных опасных метеоявлений, собранных в летний период, и аппроксимации полученных данных известными законами распределения. В результате была сформирована база данных в виде значений $Z_{\max}$ EDR $_{\max}$, распределенных по высотам с дискретом 1 км. Статистический анализ по критерию согласия Пирсона χ^2 показал, что плотности могут быть аппроксимированы законом распределения Райса. Получены оценки значений вероятностных описаний распределения для рассматриваемых явлений. Данные оценки могут быть использованы для корректировки критериев классификации опасных метеоявлений в Верхневолжском регионе в теплое время года.

Авторы отдают себе отчет в том, что представленные параметрические описания были получены при допущении о стационарности наблюдаемых процессов. Продолжение наблюдений позволит при необходимости выявить тренды и скорректировать вероятностные описания. Кроме того, дальнейшие исследования будут проводиться для получения набора статистических данных в различных климатических зонах Европейской территории России. Все это позволит адаптировать критерии классификации для различных климатических регионов.

Список литературы

1. Басов И.А., Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормоповещения и метеобеспечения авиации. СПб.: ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», 2013. 137 с.
2. Vasiliev O.V. Concerning the issue of classification of hazardous weather events / O.V. Vasiliev, E.S. Boyarenko, K.I. Galaeva, S.A. Zyabkin // 2022 XIX Technical Scientific

Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh). IEEE, 2022. P. 76–78.

3. 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

4. Feist M. A statistical approach to evaluate the parametrisation of turbulence in convection-permitting models using radar-retrieved eddy dissipation rates: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Reading, 2018. 253 p.

5. Bouniol D., Illingworth A., Hogan R. Deriving turbulent kinetic energy dissipation rate within clouds using ground based radar // Proceedings of ERAD, 2004. Pp. 281–285.

6. Kollias P. Radar observations of updrafts, downdrafts, and turbulence in fair-weather cumuli / P. Kollias, B.A. Albrecht, R. Lhermitte, A. Savtchenko // Journal of the atmospheric sciences. 2001. Vol. 58, iss. 13. Pp. 1750–1766. DOI: 10.1175/1520-0469(2001)058<1750:ROOUDA>2.0.CO;2

7. Meischner P. Eddy dissipation rates in thunderstorms estimated by Doppler radar in relation to aircraft in situ measurements / P. Meischner, R. Baumann, H. Höller, T. Jank // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2001. Vol. 18, iss. 10. Pp. 1609–1627. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<1609:EDRITE>2.0.CO;2

8. Григораш О.В. Методология экспериментальных исследований // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 127. С. 849–864. DOI: 10.21515/1990-4665-127-059

9. Пономарев А.Б., Пикулева Э.А. Методология научных исследований: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. 186 с.

10. Круглов В.И. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении: учеб. пособие / В.И. Круглов, В.И. Ершов, А.С. Чумадин, В.В. Курицына. М.: Логос, 2011. 432 с.

11. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

12. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.

References

1. Basov, I.A., Dmitrieva, O.A., Dorofeev, E.V. (2013). Methodological guidelines for the production of meteorological radar observations on the DMRL-S on the Roshydromet network for the purpose of storm warning and meteorological support of aviation. St. Petersburg: FGBU "GGO im. A.I. Voeykova", 137 p. (in Russian)

2. Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Galaeva, K.I., Zyabkin, S.A. (2022). Concerning the issue of classification of hazardous weather events. In: 2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), IEEE, pp. 76–78.

3. 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 (in Russian)

4. Feist, M. (2018). A statistical approach to evaluate the parametrisation of turbulence in convection-permitting models using radar-retrieved eddy dissipation rates: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Reading, 253 p.

5. Bouniol, D., Illingworth, A., Hogan, R. (2004). Deriving turbulent kinetic energy dissipation rate within clouds using ground based radar. In: *Proceedings of ERAD*, pp. 281–285.

6. Kollias, P., Albrecht, B.A., Lhermitte, R., Savtchenko, A. (2001). Radar observations of updrafts, downdrafts, and turbulence in fair-weather cumuli. *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 58, issue 13, pp. 1750–1766. DOI: 10.1175/1520-0469(2001)058<1750:ROOUDA>2.0.CO;2

7. Meischner, P., Baumann, R., Höller, H., Jank, T. (2001). Eddy dissipation rates in thunderstorms estimated by Doppler radar in relation to aircraft in situ measurements. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, vol. 18, issue 10, pp. 1609–1627. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<1609:EDRITE>2.0.CO;2

8. Grigorash, O.V. (2017). Methodology of experimental researches. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, no. 127, pp. 849–864. DOI: 10.21515/1990-4665-127-059

9. Ponomarev, A.B., Pikuleva, E.A. (2014). Research Methodology: Tutorial. Perm': Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo unistituta, 186 p. (in Russian)

10. Kruglov, V.I., Ershov, V.I., Chumadi, A.S., Kuritsyn, V.V. (2011). Methodology of scientific research in aircraft and rocket science: Tutorial. Moscow: Logos, 432 p. (in Russian)

11. Kremer, N.S. (2004). Probability theory and Mathematical statistics. 2nd ed., pererab. i dop. Moscow: UNITY, 573 p. (in Russian)

12. Ayvazyan, S.A., Enyukov, I.S., Meshalkin, L.D. (1983). Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing. Moscow: Finansy i statistika, 471 p. (in Russian)

Сведения об авторах

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

Болелов Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, edbolelov@mail.ru.

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 кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, vas_ov@mail.ru.

Information about the authors

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

Eduard A. Bolelov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, the Head of the Technical Maintenance of Air Transport Radio-Electronic Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, edbolelov@mail.ru.

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

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

Поступила в редакцию	06.02.2023	Received	06.02.2023
Одобрена после рецензирования	25.05.2023	Approved after reviewing	25.05.2023
Принята в печать	21.09.2023	Accepted for publication	21.09.2023