

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4 – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 551.501.81

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Анализ информативности признаков классификации опасных метеоявлений по результатам радиолокационных наблюдений

О.В. Васильев¹, Э.С. Бояренко¹, А.Н. Савельев², Н.В. Горбачев²

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

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

Статья подготовлена в рамках поддержанного грантом Российского научного фонда проекта
№ 23-29-00450

Аннотация: Одним из решающих факторов, влияющих на безопасность и регулярность полетов государственной и гражданской авиации, является метеорологическая обстановка. Для Европейской территории России наиболее характерны опасные метеорологические явления, связанные с кучево-дождевой облачностью: ливень, гроза, град, сопровождающиеся высокой турбулентностью атмосферы. В настоящее время метеорологические радиолокационные станции являются незаменимым источником информации о метеообстановке для воздушного транспорта. Критерии классификации опасных метеоявлений, используемые в современных РЛС, сформированы для каждого явления отдельно и основаны на знаниях лишь о высотном распределении радиолокационной отражаемости и температуры воздуха, несмотря на то, что данные РЛС оценивают ветровые характеристики атмосферы. Показано, что оптимизация критериев классификации указанных метеоявлений должна быть реализована путем обобщения критериев и их построения в соответствии с теорией различения статистических гипотез, а также дополнительным использованием информации о турбулентности атмосферы. На основании анализа радиолокационных сигналов, отраженных от метеоявлений ливень, гроза, град, были получены вероятностные распределения отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии. Проведен статистический анализ плотностей распределения вероятностей для максимального значения отражаемости Z_{max} , ее зависимости от высоты $H(Z_{max})$, а также максимума удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR_{max} и величины $H(EDR_{max})$. Для определения структуры алгоритмов классификации и правил принятия решений был выбран критерий классификации, основанный на максимуме функционала правдоподобия. При этом под приемлемой достоверностью принято значение вероятности правильной классификации не ниже 0,8. Для принятого критерия построены пороги принятия решений и вычислены полные матрицы вероятностей классификации. Результаты вычислений показали, что наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Большей разделяющей способностью обладают признаки Z_{max} , EDR_{max} , однако и для них достоверность классификации неприемлема. В статье для повышения достоверности классификации было применено совместное использование признаков в виде многомерных плотностей распределения вероятностей информационных параметров. Наилучшие результаты достигаются при использовании трех $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max})$ и четырех $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max}, H(EDR_{max}))$ признаков. В матрицах вероятностей для этих случаев достигнуты максимальные и приемлемые на уровне 0,8 значения вероятностей правильной классификации. Таким образом, в рассматриваемой задаче расширение признакового пространства за счет турбулентности атмосферы является оправданным. Данные результаты будут уточняться при увеличении времени наблюдения и варьироваться для различных климатических зон. В общем случае пороги принятия решений при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности должны быть адаптивными.

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, опасные метеорологические явления, классификация метеорологических явлений, распознавание образов, разделяющая функция признаков, байесовский подход, пороги принятия решений.

Для цитирования: Васильев О.В. Анализ информативности признаков классификации опасных метеоявлений по результатам радиолокационных наблюдений / О.В. Васильев, Э.С. Бояренко, А.Н. Савельев, Н.В. Горбачев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results

O.V. Vasiliev¹, E.S. Boyarenko¹, A.N. Savelyev², N.V. Gorbachev²

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

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article was prepared within the framework of the project № 23-29-00450 granted by the Russian Science Foundation

Abstract: One of the crucial factors affecting the safety and regularity of state and civil aviation flights is the meteorological situation. The European territory of Russia is most characterized by dangerous meteorological phenomena associated with cumulonimbus clouds: shower, thunderstorms, hail, accompanied by high atmospheric turbulence. Currently, meteorological radar stations are an indispensable source of information about the weather situation for air transport. The criteria for the classification of meteorological phenomena used in modern radar stations are formed for each event separately and are based on knowledge only about the altitude distribution of radar reflectivity and air temperature, despite the fact that radar data assess the wind characteristics of the atmosphere. It is shown that optimization of the classification criteria for the mentioned meteorological phenomena should be realized by generalization of the criteria and their construction in accordance with the theory of statistical hypothesis distinction, as well as by additional use of information on atmospheric turbulence. Based on the analysis of radar signals reflected from the meteorological events of shower, thunderstorm, and hail, probability distributions of reflectivity and specific dissipation rate of turbulent energy were obtained. Statistical analysis of probability distribution densities was carried out for: the maximum value of reflectivity Z_{max} , its dependence on height $H(Z_{max})$, as well as the maximum specific dissipation rate of turbulent energy EDR_{max} and the value $H(EDR_{max})$. The classification criterion based on the maximum probability functional was chosen to determine the structure of classification algorithms and decision rules. At the same time under the acceptable confidence is accepted the value of the probability of correct classification not lower than 0.8. For the accepted criterion the decision thresholds are constructed and the complete matrices of classification probabilities are calculated. The results of calculations showed that the worst informativeness in the classification of dangerous meteorological events of cumulonimbus cloudiness have parameters $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Parameters Z_{max} , EDR_{max} have greater separating ability, but even for them the confidence of classification is unacceptable. In the article to increase the confidence of classification the joint use of features in the form of multivariate probability distribution densities of information parameters was applied. The best results are achieved when three $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max})$ and four $p(Z_{max}, H(Z_{max}), EDR_{max}, H(EDR_{max}))$ features are used. In the probability matrices for these cases, the maximum and acceptable at 0.8 level of probabilities of correct classification are achieved. Thus, the expansion of the feature space due to atmospheric turbulence is justified in the problem under consideration. These results will be refined with increasing observation time and will vary for different climatic zones. In general, the decision thresholds for classifying dangerous meteorological events of cumulonimbus cloudiness should be adaptive.

Key words: weather radar, dangerous weather phenomena, classification of weather phenomena, pattern recognition, feature separation function, Bayesian approach, decision threshold.

For citation: Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Savelyev, A.N., Gorbachev, N.V. (2024). Analysis of informativeness of features of classification of dangerous weather events based on radar observation results. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 8–22. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-8-22

Введение

Одним из решающих факторов, влияющих на безопасность и регулярность полетов государственной и гражданской авиации, является

метеорологическая обстановка. Для Европейской территории России наиболее характерны опасные метеорологические явления (ОМЯ), связанные с кучево-дождевой облачностью (КДО): ливень, гроза, град, сопровождающиеся

высокой турбулентностью атмосферы¹ [1, 2]. Указанные ОМЯ, в отличие от обычных осадков, ветра и облачности, представляют опасность как при проведении воздушными судами (ВС) взлетно-посадочных операций, так и при выполнении полета по маршруту^{2,3}. Кроме того, ОМЯ КДО доступны радиолокационному наблюдению, так как содержат в себе радиолокационные отражатели в виде воды в различном фазовом состоянии.

В настоящее время метеорологические радиолокационные станции (МРЛС) являются незаменимым источником информации о метеообстановке для воздушного транспорта⁴. В РФ в настоящее время эксплуатируются две современные отечественные МРЛС: ДМРЛ-С [3–5] и МРЛК БЗ «Монокль» [6, 7] С- и Х-диапазонов соответственно, в полной мере отвечающих современным требованиям. Данные МРЛС, построенные по импульсно-доплеровскому принципу, при наличии отражений дополнительно позволяют оценивать ветровые характеристики атмосферы, такие как векторное поле скоростей, наличие и величину турбулентности. Данные атмосферные факторы могут быть использованы как высокоинформативные признаки наблюдения кучево-дождевой облачности, а также связанных с ней опасных метеоявлений.

Критерии классификации метеоявлений, используемые в них, были сформированы в соот-

ветствии с руководящими документами⁵ [8]. При этом все критерии классификации разработаны для каждого явления отдельно и основаны на знаниях лишь о высотном распределении радиолокационной отражаемости и температуры воздуха, несмотря на то, что данные РЛС достаточно точно определяют ветровые характеристики атмосферы.

Оптимизация критериев классификации ОМЯ КДО должна быть реализована путем:

- обобщения критериев и их построения в соответствии с теорией различения статистических гипотез [9–14];
- дополнительного использования в критерии информации о турбулентности атмосферы.

В [15] выполнена конкретизация задач оптимизации критериев классификации, сформированы параметрические описания плотностей распределения максимальной отражаемости и турбулентности по значениям и высоте.

Данная работа продолжает исследования в обозначенном направлении.

Постановка задачи

Постановка задачи классификации опасных метеорологических явлений (ОМЯ), связанных с кучево-дождевой облачностью (КДО) на основании радиолокационных наблюдений предполагает решение следующих взаимосвязанных задач:

- формирования алфавита классов, в рассматриваемом случае это «ливень – гроза – град»;
- выбора априорного признакового пространства в виде максимальных значений отражаемости $Z_{\max}$ и турбулентности $EDR_{\max}$, а также их распределения по высотам $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$;
- формирования вероятностного описания признаков в виде плотностей распределения вероятностей информационных параметров

¹ Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 124 с.

² Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 31 июля 2009 года № 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации"» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ.РУ. URL: <https://base.garant.ru/196235/> (дата обращения: 19.11.2023).

³ Приказ Министерства транспорта РФ от 3 марта 2014 г. № 60 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов"» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ.РУ. URL: <https://base.garant.ru/70747808/> (дата обращения: 19.11.2023).

⁴ Наставление по метеорологической службе авиации Вооруженных сил РФ (НАМС-95), 1995. 92 с.

⁵ Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 350 с.

Таблица 1
Table 1

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

Параметр	Ливень	Гроза	Град
	H(Zmax)		
МО	$\mu = 2$	$\mu = 3,5$	$\mu = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 3$	$\sigma_x = 4$
	H(EDRmax)		
	МО	$\mu = 3$	$\mu = 4$
СКО	$\sigma_x = 2,5$	$\sigma_x = 4$	$\sigma_x = 4,5$
	Zmax		
	МО	$\mu = 22$	$\mu = 29$
СКО	$\sigma_x = 7$	$\sigma_x = 8$	$\sigma_x = 10$
	EDRmax		
	МО	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,5$
СКО	$\sigma_x = 0,2$	$\sigma_x = 0,12$	$\sigma_x = 0,08$

$p(Z_{\max}/\omega_i)$, $p(EDR_{\max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{\max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{\max})/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$;

- выбора статистического критерия классификации ОМЯ КДО, определяющего значения порогов принятия решений, исходя из качества априорной информации и требуемой достоверности классификации.

Итерационный характер данной последовательности задач предполагает коррекцию признаков и критериев для достижения требуемой достоверности.

В [13] сформировано вероятностное описание признаков. Для оценки соответствия экспериментальных данных теоретическим были рассмотрены близкие к гауссовским распределения: логонормальное, Вейбула, Рэлея, Рэлея – Райса, β -распределение. Для плотностей распределения вероятностей $p(Z_{\max}/\omega_i)$, $p(EDR_{\max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{\max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{\max})/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$, проверка различных гипотез о виде распределений по критерию согласия χ^2 Пирсона для уровня значимости 0,01 показала максимальное соответствие экспериментальных относительных частот обобщенному распределению Рэлея – Райса:

$$p(x_i, \mu_i, \sigma_i) = \frac{x_i}{\sigma_i^2} \exp\left(\frac{-(x_i^2 + \mu_i^2)}{2\sigma_i^2}\right) I_0\left(\frac{x_i \mu_i}{\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

где $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Пара-

метры μ и σ в строгом смысле не являются математическим ожиданием (МО) и среднеквадратическим отклонением (СКО), однако соответствующим образом отражают форму распределения. Полученные по результатам экспериментальных исследований значения μ и σ для максимальных значений отражаемости и турбулентности, а также их распределения по высотам для ливня, гроз и града указаны в табл. 1. По сути, данная таблица представляет собой параметрическое описание признаков классификации ОМЯ КДО явлений «ливень – гроза – град».

Примем очевидное допущение: при отсутствии достоверной априорной информации для дальностей радиолокационного наблюдения и обоснованной матрицы потерь при принятии ошибочных решений достаточной статистикой в рассматриваемом случае является условная плотность распределения признака x при наблюдении метеоявления ω_i $p(x/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$. Данная статистика позволяет сформировать решение на основе критерия максимального правдоподобия: выбирается то решение $\omega = i$, для которого

$$p(x/\omega_i) > p(x/\omega_k) \text{ для всех } k \neq i. \quad (2)$$

Достаточные статистики, сформированные для принятых условий, определяют структуру оптимального решения и оптимальный способ обработки информации [16–18].

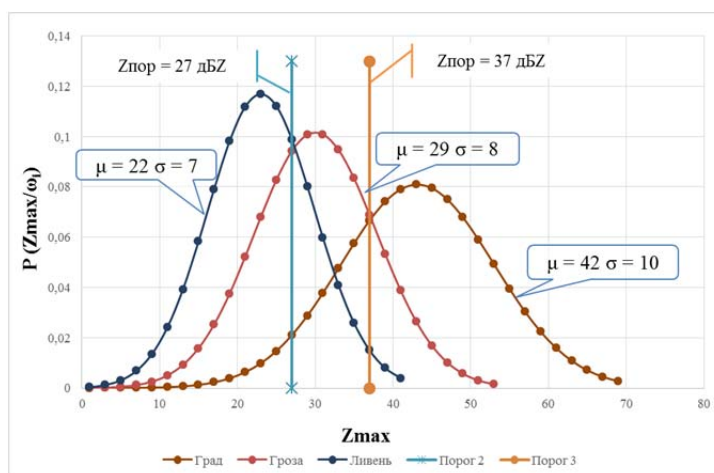


Рис. 1. Пороги принятия решений для параметра Zmax
Fig. 1. Decision thresholds for the Zmax parameter

При строгой постановке задачи классификации формирование полной группы событий предполагает наличие в алфавите класса «другое событие». В рассматриваемой постановке это метеоявление «сильный дождь» снизу по опасности и, по сути, не являющееся опасным ни по интенсивности осадков, ни по типу слоисто-дождевой облачности с выпадающими обложными осадками («сильным дождем»), а также «смерч» выше рассматриваемых явлений по опасности, но пренебрежительно редко встречающееся в умеренных широтах Европейской территории России. Последние допущения определяют пределы интегрирования при расчете соответствующих вероятностей принятия решений, как это будет показано ниже [19].

Кроме того, на данном этапе исследований примем допущение о независимости призна-

ков, что серьезно упростит решение задачи без существенного влияния на результат.

Таким образом, для принятых допущений и ограничений определим информативность признаков классификации из априорного словаря и их влияние на достоверность принятия решений. При этом под приемлемой достоверностью примем значение вероятности правильной классификации не ниже 0,8.

Анализ информативности признаков классификации ОМЯ КДО

Критерий максимума правдоподобия (2) с учетом (1) формирует порог для альтернативы i, k ; $i \neq k$ в виде решения уравнения

$$h_{\text{пор}}(i, k) = \frac{x}{\sigma_i^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_i^2}{2\sigma_i^2}} I_0\left(\frac{x\mu_i}{\sigma_i^2}\right) - \frac{x}{\sigma_k^2} e^{-\frac{x^2 + \mu_k^2}{2\sigma_k^2}} I_0\left(\frac{x\mu_k}{\sigma_k^2}\right) = 0. \quad (3)$$

Примером решения пары уравнений для плотностей распределения вероятностей $p(Z_{\text{max}}/\omega_i)$, где $i \in \{\text{л, гз, гд}\}$ (рис. 1), является формирование пары порогов: $h_{\text{л,гз}}(Z_{\text{max}}) = 27,4 \text{ dBZ}$; $h_{\text{гз,гд}}(Z_{\text{max}}) = 37,2 \text{ dBZ}$.

Для любого признака x для множества Z_{max} , EDRmax, $H(Z_{\text{max}})$, $H(\text{EDRmax})$ может быть сформирована полная матрица вероятностей классификации [9]

$$P(x) = \begin{bmatrix} P_{\text{лл}}(x) & P_{\text{лгз}}(x) & P_{\text{лгд}}(x) \\ P_{\text{гзл}}(x) & P_{\text{гзгз}}(x) & P_{\text{гзгд}}(x) \\ P_{\text{гдл}}(x) & P_{\text{гдгз}}(x) & P_{\text{гдгд}}(x) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

элементы которой вычисляются как

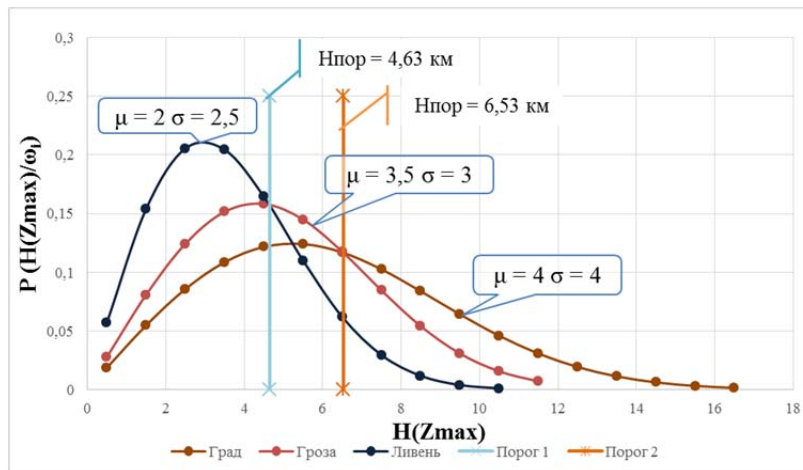


Рис. 2. Пороги принятия решений для параметра $H(Z_{max})$
Fig. 2. Decision thresholds for parameter $H(Z_{max})$

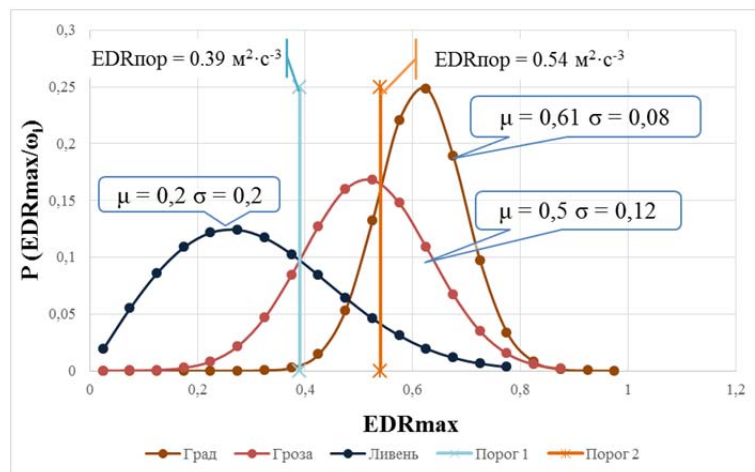


Рис. 3. Методика статистического анализа экспериментальных данных
Fig. 3. Decision thresholds for the EDRmax parameter

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Л,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, л) dx; \\ P_{Л,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, л) dx; \\ P_{Л,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, л) dx; \\ P_{ГЗ,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, гз) dx; \\ P_{ГЗ,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, гз) dx; \\ P_{ГЗ,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, гз) dx; \\ P_{ГД,Л}(x) = \int_0^{h_{Л,ГЗ}(x)} p(x, гд) dx; \\ P_{ГД,ГЗ}(x) = \int_{h_{Л,ГЗ}(x)}^{h_{ГЗ,ГД}(x)} p(x, гд) dx; \\ P_{ГД,ГД}(x) = \int_{h_{ГЗ,ГД}(x)}^{\infty} p(x, гд) dx, \end{array} \right. \quad (5)$$

где диагональные элементы определяют достоверность принятия правильных решений.

Применение в качестве пределов интегрирования 0 и ∞ не совсем корректно, однако постановка задачи анализа информативности признаков классификации ОМЯ КДО это вполне допускает.

Для случая, представленного на рис. 1, получим

$$P(Z_{max}) = \begin{vmatrix} 0,715 & 0,263 & 0,022 \\ 0,347 & 0,463 & 0,19 \\ 0,05 & 0,218 & 0,732 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

В (6) при недостаточных величинах вероятностей правильной классификации наблюдаются высокие вероятности перепутывания, особенно в случае грозы. Для признака $H(Z_{max})$ (рис. 2) пороги принятия решений имеют значения $h_{Л,ГЗ}(H(Z_{max})) = 4,63\text{км}$; $h_{ГЗ,ГД}(H(Z_{max})) = 6,53\text{км}$.

Высокая площадь перекрытия кривых проявляется в неприемлемых значениях элементов всей матрицы классификации, каждого в своем качестве.

$$P(H(Z_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,759} & 0,153 & 0,088 \\ 0,518 & \mathbf{0,205} & 0,277 \\ 0,374 & 0,177 & \mathbf{0,449} \end{vmatrix}. (7)$$

Практически аналогичная картина наблюдается для признака $H(EDR_{max})$, где пороги имеют значения: $h_{л,гз}(EDR_{max}) = 5,09$ км; $h_{гз,гд}(H(EDR_{max})) = 6,89$ км

$$P(H(EDR_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,791} & 0,156 & 0,053 \\ 0,463 & \mathbf{0,220} & 0,317 \\ 0,359 & 0,208 & \mathbf{0,433} \end{vmatrix}. (8)$$

Не намного лучше ситуация складывается для признака EDR_{max} (рис. 3), где пороги равны $h_{л,гз}(EDR_{max}) = 0,39$ м²с⁻³; $h_{гз,гд}(H(EDR_{max})) = 0,54$ м²с⁻³. В случае с грозой достоверность принятия решений опять неприемлема.

$$P(EDR_{max}) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,712} & 0,205 & 0,083 \\ 0,146 & \mathbf{0,440} & 0,414 \\ 0,002 & 0,170 & \mathbf{0,828} \end{vmatrix}. (9)$$

$$p(x_1, \mu_1, \sigma_1, x_2, \mu_2, \sigma_2, \dots, x_n, \mu_n, \sigma_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \mu_i, \sigma_i), \quad (10)$$

где $p(x_i, \mu_i, \sigma_i)$ определена в виде (1).

На рис. 4 и 5 изображены двумерные плотности распределения $p(Z_{max}, H(Z_{max})/\omega_i)$ и $p(EDR_{max}, H(EDR_{max})/\omega_i)$ соответственно.

Таким образом, наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$. Большей разделяющей способностью обладают признаки Z_{max} , EDR_{max} , однако и для них достоверность классификации гроз неприемлема.

Оценка вероятностей классификации ОМЯ КДО в многомерном признаковом пространстве

Очевидный выход из создавшейся ситуации предлагает теория распознавания [9, 20]. Для повышения достоверности классификации метеоявлений в заданном алфавите классов необходимо совместное использование признаков, например в виде многомерных плотностей распределения вероятностей случайных информационных параметров Z_{max} , EDR_{max} , $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$ [21]. Для принятого допущения о статистической независимости признаков их n -мерная плотность распределения вероятностей имеет вид

Пороги для двумерных случаев, полученные численным методом [18, 22], представляют собой плоскость, пересечение которой с плоскостью XOY для рассматриваемых примеров представлено в виде кривых на рис. 6 и 7.

Соответствующие матрицы вероятностей имеют вид

$$P(Z_{max}, H(Z_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,753} & 0,243 & 0,004 \\ 0,320 & \mathbf{0,505} & 0,175 \\ 0,040 & 0,216 & \mathbf{0,744} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$P(EDR_{max}, H(EDR_{max})) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,761} & 0,175 & 0,064 \\ 0,146 & \mathbf{0,463} & 0,391 \\ 0,003 & 0,181 & \mathbf{0,816} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Для наиболее информативных признаков Z_{max} и EDR_{max} матрица равна

$$P(Z_{max}, EDR_{max}) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,769} & 0,161 & 0,070 \\ 0,141 & \mathbf{0,683} & 0,176 \\ 0,031 & 0,159 & \mathbf{0,810} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

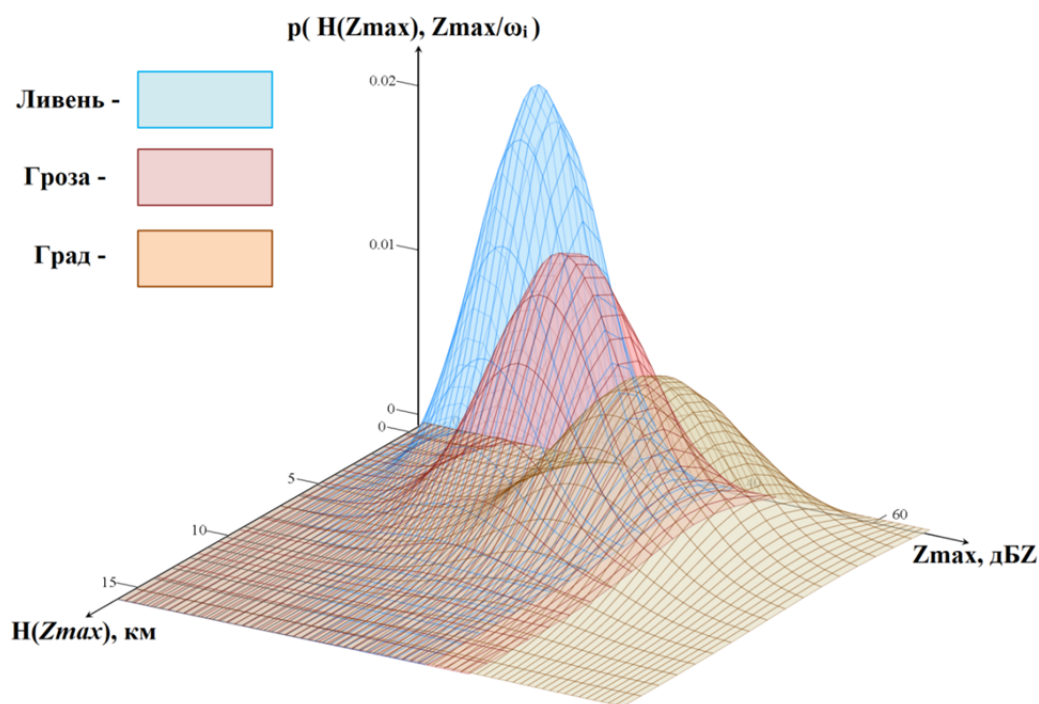


Рис. 4. Поверхность двумерной плотности вероятности радиолокационной отражаемости
Fig. 4. Surface of the two-dimensional probability density of the radar reflectivity

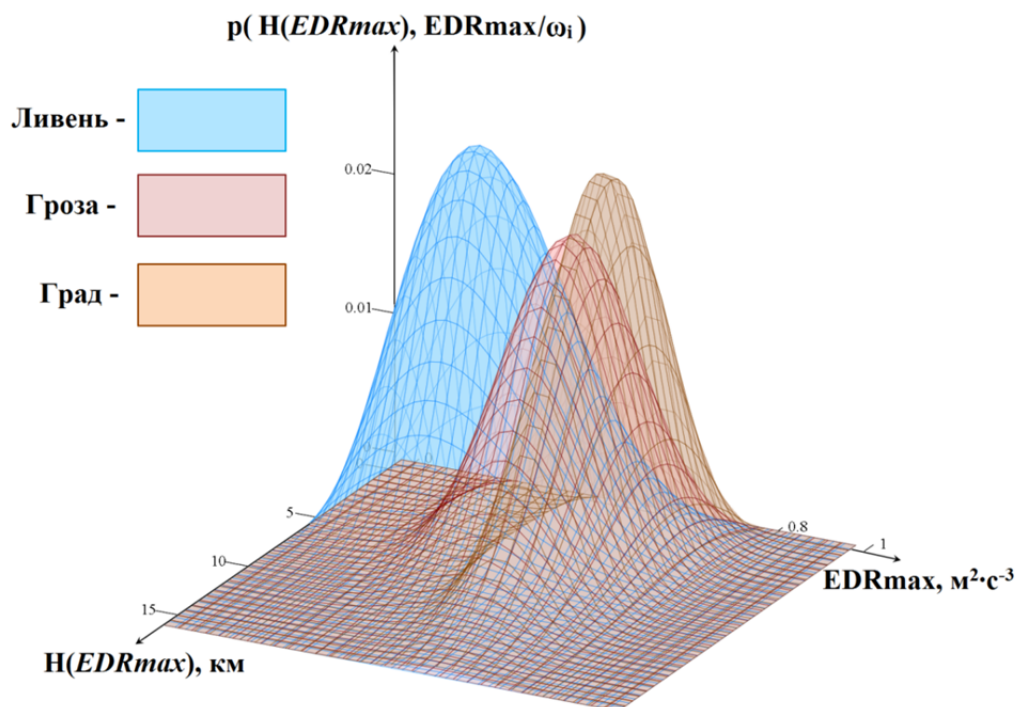


Рис. 5. Поверхность двумерной плотности вероятности EDR
Fig. 5. Surface of the two-dimensional EDR probability density

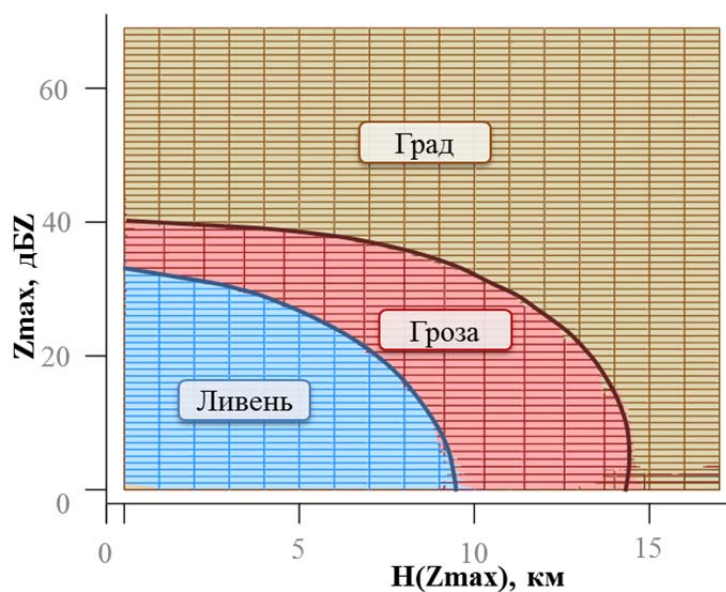


Рис. 6. Проекция разделяющей плоскости на горизонтальную плоскость для $p(H(Z_{\max}), Z_{\max}/\omega_i)$
Fig. 6. Projection of the dividing plane onto the horizontal plane for $p(H(Z_{\max}), Z_{\max}/\omega_i)$

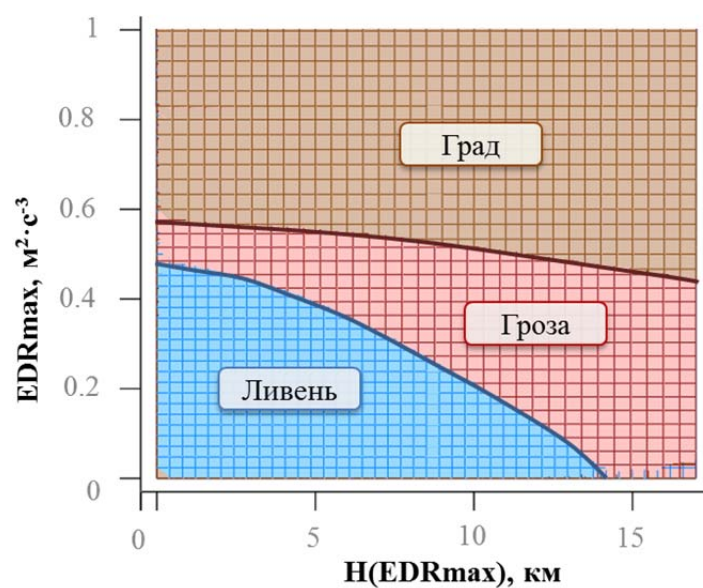


Рис. 7. Проекция разделяющей плоскости на горизонтальную плоскость для $p(H(EDR_{\max}), EDR_{\max}/\omega_i)$
Fig. 7. Projection of the dividing plane onto the horizontal plane for $p(H(EDR_{\max}), EDR_{\max}/\omega_i)$

Матрица (13) ожидаемо имеет лучшие показатели по достоверности классификации. Проанализируем рост этого показателя с увеличением размерности решаемой задачи. Получим

$$P(Z_{\max}, H(Z_{\max}), H(EDR_{\max})) = \begin{vmatrix} 0,809 & 0,174 & 0,017 \\ 0,231 & 0,553 & 0,216 \\ 0,075 & 0,173 & 0,752 \end{vmatrix}, \quad (14)$$

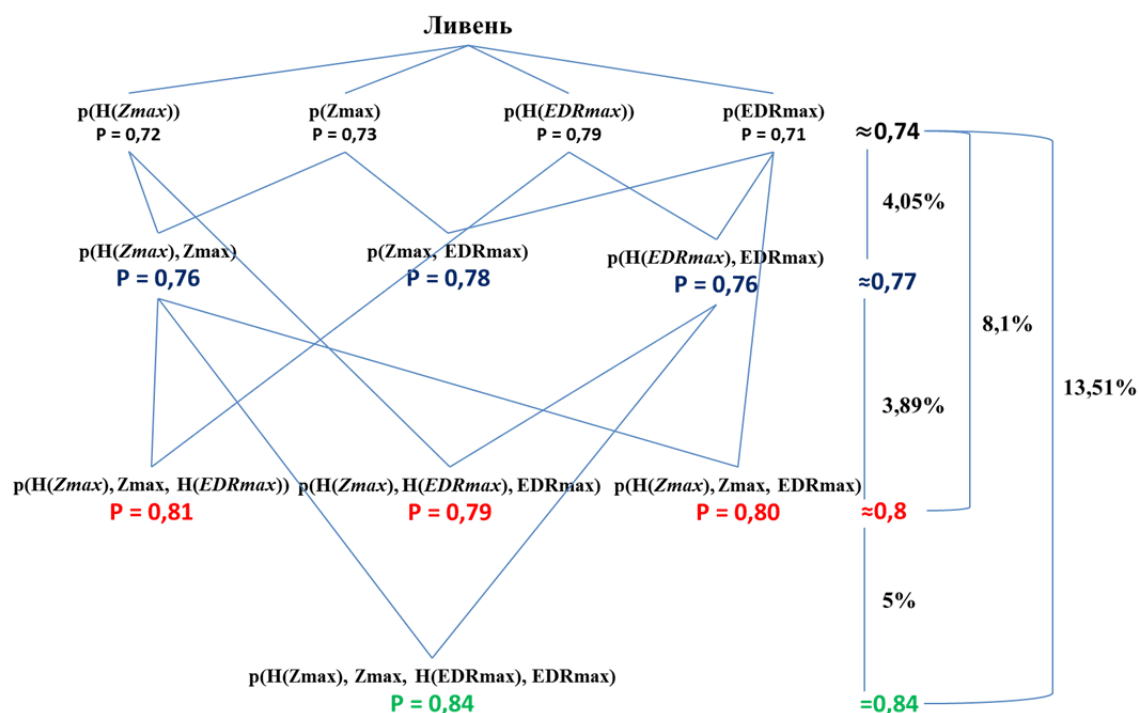


Рис. 8. Относительный прирост достоверности классификации ливня при увеличении числа признаков
Fig. 8. Relative increase in plausibility of heavy shower classification with increasing number of features

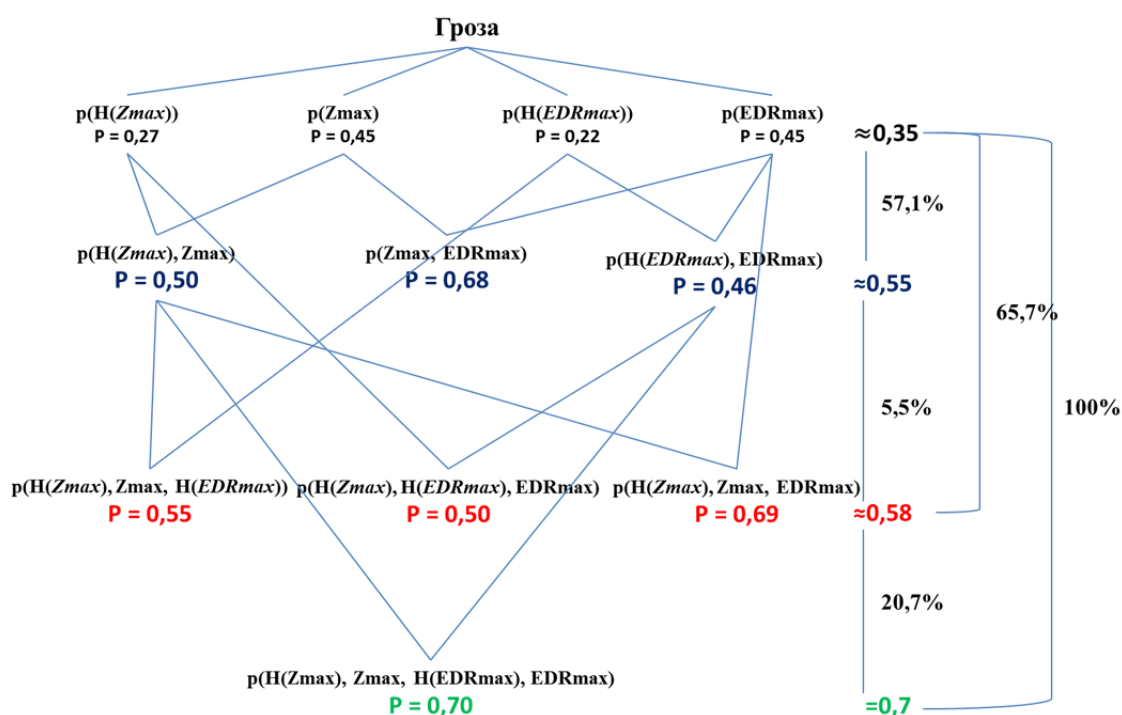


Рис. 9. Относительный прирост достоверности классификации грозы при увеличении числа признаков
Fig. 9. Relative increase in plausibility of thunderstorm classification with increasing number of features

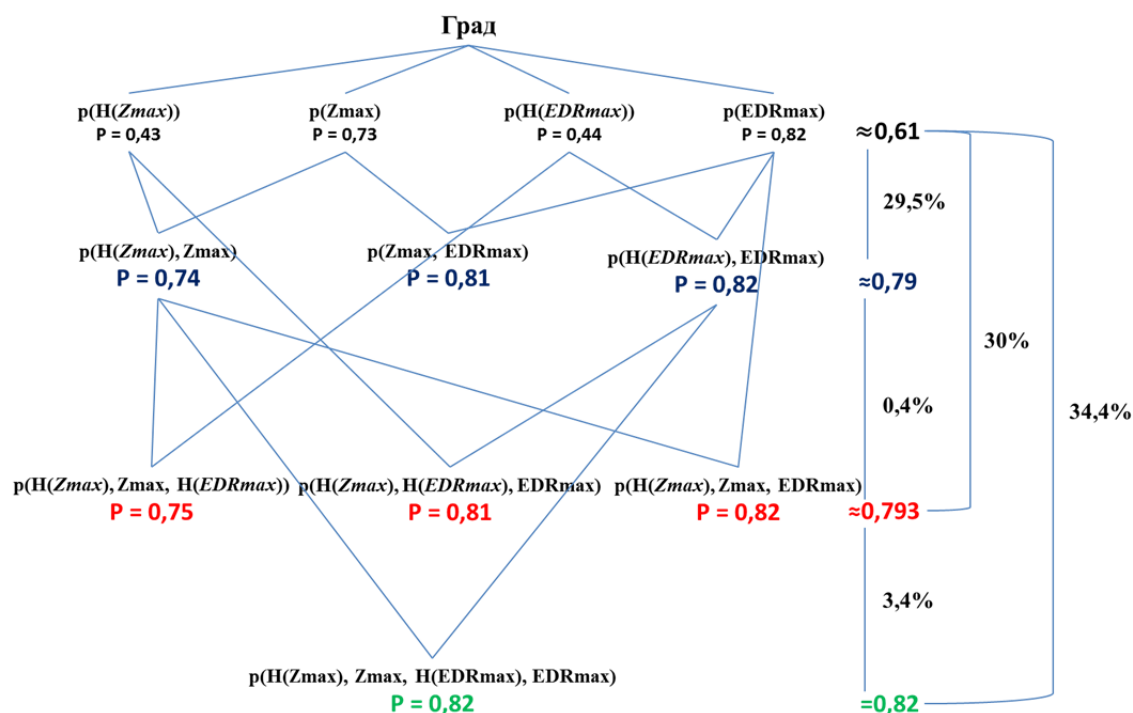


Рис. 10. Относительный прирост достоверности классификации града при увеличении числа признаков
Fig. 10. Relative increase in plausibility of hail classification with increasing number of features

$$P(EDRmax, H(EDRmax), H(Zmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,788} & 0,146 & 0,066 \\ 0,251 & \mathbf{0,497} & 0,252 \\ 0,049 & 0,144 & \mathbf{0,807} \end{vmatrix}, \quad (15)$$

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,800} & 0,195 & 0,005 \\ 0,162 & \mathbf{0,691} & 0,147 \\ 0,024 & 0,159 & \mathbf{0,817} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

И наконец,

$$P(Zmax, H(Zmax), EDRmax, H(EDRmax)) = \begin{vmatrix} \mathbf{0,839} & 0,138 & 0,023 \\ 0,145 & \mathbf{0,701} & 0,154 \\ 0,022 & 0,157 & \mathbf{0,821} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

В матрице вероятностей (17), как и ожидалось, достигнуты максимальные значения вероятностей правильной классификации. Ниже требуемого уровня лишь достоверность классификации грозы. Однако при практической реализации возможно некоторое снижение порога $h_{л,гз}$ с учетом большей опасности грозы либо одновременное «расширение» порогов $h_{л,гз}$ и $h_{гз,гд}$ для выравнивания достоверностей для всех классов.

На рис. 8–10 показаны суммарные значения и относительный прирост вероятностей

правильной классификации для ливня, грозы и града соответственно при различной номенклатуре и количестве используемых признаков. В случае с ливнем прирост от одномерной задачи к четырехмерной составил всего 13,5 %. Почти приемлемые достоверности для ливня наблюдались уже в двумерных вариантах. Для грозы общий прирост составил 100 %. Однако даже в четырехмерном варианте приемлемая достоверность классификации не достигнута. Наибольшей информативностью обладают признаки $Zmax$

и EDRmax. Распределение данных параметров по высотам коррелировано, а потому менее информативно. Суммарный процент прироста достоверности принятия решений при переходе задач в виде «одномерные – двумерные» – 30,22 %, «одномерные – трехмерные» – 34,6 %, «одномерные – четырехмерные» – 49,3 %. Это подтверждает необходимость увеличения признаков пространства в рассматриваемом случае при учете известного «проклятия размерности» [9].

Заключение

Показано, что при отсутствии достоверной априорной информации и адекватной матрицы потерь наиболее продуктивным для задачи классификации ОМЯ КДО является критерий максимального правдоподобия. Для принятого критерия получены значения порогов принятия решений и сформированы полные матрицы вероятностей классификации для одномерных, двумерных, трехмерных и четырехмерных размеров признаков пространства.

Анализ результатов показал, что наихудшую информативность при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности имеют признаки $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$. Больше разделяющей способностью обладают признаки $Z_{\max}$, $EDR_{\max}$. Таким образом, в рассматриваемой задаче расширение признаков пространства за счет турбулентности атмосферы является оправданным. Суммарный процент прироста достоверности принятия решений при переходе задач в виде «одномерные – двумерные» – 30,22 %, «одномерные – трехмерные» – 34,6 %, «одномерные – четырехмерные» – 49,3 %. Наилучшие результаты достигаются при использовании трех $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max})$ и четырех $p(Z_{\max}, H(Z_{\max}), EDR_{\max}, H(EDR_{\max}))$ признаков. В матрицах вероятностей для этих случаев достигнуты максимальные и приемлемые (на уровне 0,8) значения вероятностей правильной классификации. Незначительно

ниже требуемого уровня лишь достоверность классификации грозы. Однако в практических случаях возможно некоторое снижение порога $h_{л,гз}$ с учетом большей опасности грозы либо одновременное «расширение» порогов $h_{л,гз}$ и $h_{гз,гд}$ для выравнивания достоверностей принятия решений для всех классов.

Данные результаты основаны на наблюдениях в Верхне-Волжском районе в течение одного летнего периода. Очевидно, что они будут уточняться при увеличении времени наблюдения и варьироваться для различных климатических зон. В настоящее время авторами проводятся масштабные исследования по оценке вариативности статистических характеристик ОМЯ КДО для трех различных синоптических зон Европейской части России в течение нескольких летних периодов. Материал готовится к публикации. В общем случае пороги принятия решений при классификации опасных метеоявлений кучево-дождевой облачности должны быть адаптированы и в недалеком будущем будут формироваться автоматически.

Список литературы

1. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.
2. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации: учеб. пособие. М.: Триада ЛТД, 2016. 312 с.
3. Дядюченко В.Н., Вылегжанин И.С., Павлюков Ю.Б. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.
4. Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Использование информации, получаемой с помощью ДМРЛ-с в метеорологии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов I Российской научной конференции, Омск, 6–8 октября 2020 года. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2020. С. 83–84.

5. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 92–100.

6. Галаева К.И. Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокационным 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.

7. 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.Ye. Zhukovsky (TSCZh), 2021. Pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352

8. Басов И.А., Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В. и др. 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.

9. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен / Пер. с англ. Г.Г. Вайнштейна и А.М. Васьковского, под ред. В.Л. Стефанюка. М.: Мир, 1976. 511 с.

10. Чабан Л.Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования: учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2016. 94 с.

11. Фомин Я.А. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с.

12. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014. 632 с.

13. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 778 p. DOI: 10.1007/978-0-387-45528-0

14. Webb A.R., Copsey K.D., Cawley G. Statistical pattern recognition. 3rd ed. New York: Wiley, 2011. 672 p.

15. Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Обоснование исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

16. Гельгор А.Л., Горлов А.И., Попов Е.А. Общая теория связи. Проверка статистических гипотез. Оценивание параметров. Оптимальный прием сигналов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 227 с.

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

18. Ту Д., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: пер с англ. М.: Мир, 1978. 411 с.

19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд. М.: Наука, 1969. 576 с.

20. Мясников В.В. Распознавание образов и машинное обучение. Основные подходы: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2023. 196 с.

21. Розов А.К. Оптимальные статистические решения. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2016. 261 с.

22. Рубан А.И. Методы анализа данных: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.

References

1. Pozdnyakova, V.A. (2010). Practical aviation meteorology. Ekaterinburg: Uralskiy UTTs GA, 113 p. (in Russian)

2. Shakina, N.P., Ivanova, A.R. (2016). Forecasting meteorological conditions for aviation: Tutorial. Moscow: Triada LTD, 312 p. (in Russian)

3. Diadiuchenko, V.N., Vylegzhanin, I.S., Pavliukov, Iu.B. (2014). Doppler radars in Russia. *Nauka v Rossii*, no. 1, pp. 23–27. (in Russian)

4. Mazurov, G.I., Akselevich, V.I. (2020). The use of information obtained with the help of DMRL-S in meteorology. *Radiofizika, fotonika i issledovaniye svoistv veshchestva: te-*

zisy dokladov I Rossiiskoy nauchnoy konferentsii. Omsk: Omskiy nauchno-issledovatel'skiy institut priborostroyeniya, pp. 83–84. (in Russian)

5. **Zhukov, V.Iu., Shchukin, G.G.** (2014). The state and prospects of the network of Doppler meteorological radars. *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 92–100. (in Russian)

6. **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)

7. **Vasiliev, O., Bolelov, E., Galaeva, K., Gevak, N., Zيابкин, S., Kolesnikov, E., Peshko, A., Sinitsyn, I.** (2021). The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex “Monocle”. In: *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

8. **Basov, I.A., Dmitrieva, O.A., Dorofeev, E.V. et al.** (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. Voyeykova”, 137 p. (in Russian)

9. **Duda, R.O., Hart, P.E.** (1973). Pattern classification and scene analysis. New York: John Wiley & Sons, 512 p.

10. **Chaban, L.N.** (2016). Methods and algorithms of pattern recognition in automated decryption of remote sensing data: Tutorial. Moscow: MIIGA i K, 94 p. (in Russian)

11. **Fomin, Ya.A.** (2012). Pattern recognition: Theory and applications. 2nd ed. Moscow: FAZIS, 429 p. (in Russian)

12. **Sosulin, Yu.G., Kostrov, V.V., Parshin, Yu.N.** (2014). Evaluation and correlation signal processing and interference compensation. Moscow: Radiotekhnika, 632 p. (in Russian)

13. **Bishop, C.M.** (2006). Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 778 p. DOI: 10.1007/978-0-387-45528-0

14. **Webb, A.R., Copsey, K.D., Cawley, G.** (2011). Statistical pattern recognition. 3rd ed. New York: Wiley, 672 p.

15. **Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Galaeva, K.I.** (2023). Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

16. **Gelgor, A.L., Gorlov, A.I., Popov, E.A.** (2013). The general theory of communication. Testing statistical hypotheses. Estimation of parameters. Optimal signal reception: Tutorial. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 227 p. (in Russian)

17. **Kremer, N.Sh.** (2004). Probability theory and Mathematical statistics. 2nd ed., pererab. i dop. Moscow: YUNITI-DANA, 573 p. (in Russian)

18. **Tou, J.T., Gonzalez, R.C.** (1974). Pattern recognition principles. London: Addison-Wesley, 377 p.

19. **Venttsel, E.S.** (1969). Probability Theory. 4th ed. Moscow: Nauka, 576 p. (in Russian)

20. **Miasnikov, V.V.** (2023). Pattern recognition and machine learning. Basic approaches: Tutorial. Samara: Izd-vo Samarskogo universitetata, 196 p. (in Russian)

21. **Rozov, A.K.** (2016). Optimal statistical solutions. 2nd ed., pererab. i dop. St. Petersburg: Politekhnika, 261 p. (in Russian)

22. **Ruban, A.I.** (2004). Methods of data analysis: Tutorial. 2nd ed., ispr. i dop. Krasnoyarsk: IPTs KGTU, 319 p. (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.

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

Савельев Алексей Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, savelyev.an@bmstu.ru.

Горбачев Никита Владимирович, студент радиотехнического факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана, gorbachevnnv@student.bmstu.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.

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

Alexey N. Savelyev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Bauman Moscow State Technical University, savelyev.an@bmstu.ru.

Nikita V. Gorbachev, Student of the Radio Engineering Faculty, Bauman Moscow State Technical University, gorbachevnnv@student.bmstu.ru.

Поступила в редакцию	22.01.2024	Received	22.01.2024
Одобрена после рецензирования	22.03.2024	Approved after reviewing	22.03.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024