

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.501.81
doi: 10.17223/25421379/36/8

АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ВАРИАТИВНОСТИ И ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖАЕМОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОЙ ОБЛАЧНОСТИ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ



Эдуард Анатольевич Болелов¹, Олег Валерьевич Васильев²,
Эльвира Сергеевна Бояренко³, Ксения Игоревна Галаева⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

¹ edbolelov@mail.ru

² vas_ov@mail.ru

³ boyarenko.elvira@mail.ru

⁴ ks.galaeva@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вероятностные описания географической вариативности статистических характеристик радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии для Тверской, Воронежской и Калининградской областей. В качестве исходного материала использованы данные наблюдений метеорологических радиолокационных комплексов ближней зоны аэродрома для летнего периода 2023 г. Анализируется временная изменчивость статистических характеристик параметров распределения признаков для Верхне-Волжского региона России за период с 2022 по 2023 г.

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

Источник финансирования: Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 23-29-00450 «Исследование отражательных и турбулентных характеристик атмосферы с использованием нового отечественного метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны “Монокль” в различных климатических зонах в интересах повышения достоверности автоматической классификации опасных метеоявлений».

Для цитирования: Болелов Э.А., Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Анализ географической вариативности и временной изменчивости статистических характеристик отражаемости и турбулентности атмосферы для кучево-дождевой облачности на европейской территории России // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 139–152. doi: 10.17223/25421379/36/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/36/8

ANALYSIS OF GEOGRAPHICAL FLEXIBILITY AND TEMPORAL VARIABILITY OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC REFLECTIVITY AND TURBULENCE FOR CUMULONIMBUS CLOUDS IN THE EUROPEAN ZONE OF RUSSIA

Eduard A. Bolelov¹, Oleg V. Vasiliev², Elvira S. Boyarenko³, Ksenia I. Galaeva⁴

^{1, 2, 3, 4} Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

¹ edbolelov@mail.ru

² vas_ov@mail.ru

³ boyarenko.elvira@mail.ru

⁴ ks.galaeva@mail.ru

Abstract. The climate changes observed in recent years may lead to an increase in the number of hydrometeorological phenomena resulting from the development of convective clouds. For timely detection and further monitoring of dangerous weather events of convective origin, such as heavy rain, thunderstorms and hail, radar methods are used to obtain information on the structure and movement of clouds in real time. The purpose of this paper is to study probabilistic descriptions of the geographical variation of the statistical characteristics of radar reflectivity and specific dissipation rate of turbulent energy for different climatic

zones of the European territory of Russia. Three positions were selected from all operational weather radar WR in the European territory of Russia, located in the following regions: Tver, Voronezh and Kaliningrad. The zones were selected based on the local characteristics of a particular climatic zone, annual precipitation and average number of days with thunderstorms per year. For the analysis of statistical characteristics were used data from meteorological radar stations in the considered zones during the summer period of 2023. The methodology of research on regional changes in parameters obtained in the territory of Kaliningrad region and Voronezh is described. Statistical characteristics were analyzed and empirical distribution laws were established. On the basis of which the trends of changes in the threshold values for each of the selected regions were considered. The study showed that the characteristics of atmospheric reflectivity and turbulence have a pronounced geographical variation of the parameters Zmax and EDRmax. Differences were observed both within the same region and between different regions. In addition, the temporal variability of the statistical characteristics of the parameters of the trait distribution for the Upper-Volga region of Russia was analyzed. The linear trend method was used to assess the variability of characteristics over time. The data for the period from 2021 to 2023 were considered. These insignificant changes in statistical characteristics over time may be caused by changes in climatic conditions in the region under consideration. The obtained results will make it possible to refine the existing parameters of algorithms for the classification of hazardous weather events, in terms of adapting the value of decision thresholds in the classification of hazardous weather events.

Keywords: weather radar, near-airfield zone, dangerous meteorological events, classification of weather phenomena, statistical data analysis, interannual variability.

Source of financing: The study is done on state assignment of RSF "Investigation of the reflective and turbulent characteristics of the atmosphere using the new indigenous Russian near-airfield meteorological radar complex MRLC BZ "Monocle" in various climatic zones in order to increase the reliability of the automatic classification of hazardous weather phenomena".

For citation: Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. (2025) Analysis of geographical flexibility and temporal variability of statistical characteristics of atmospheric reflectivity and turbulence for cumulonimbus clouds in the European zone of Russia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 139–152. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/8

Введение

Воздушное пространство является непредсказуемой и изменчивой средой, особенно в вопросах обеспечения безопасности воздушных перевозок, требующих постоянного мониторинга метеорологической обстановки. В силу неоднородности климатических условий по всему миру, пилоты и авиационные специалисты сталкиваются с различными видами метеоявлений, которые могут представлять угрозу для безопасности полетов. Часто встречающиеся на европейской территории России (ЕТР) опасные метеоявления (ОЯ), связанные с кучево-дождевой облачностью (Cb), такие как ливень, гроза и град, могут нанести значительный ущерб воздушному судну и привести к авиационным происшествиям или катастрофам.

Все перечисленные ОЯ Cb представляют серьезную угрозу для авиации и требуют достоверного обнаружения и классификации. Данная задача решается путем использования радиолокационной информации, построения алгоритмов обработки сигналов и правил принятия решений, основанных на вероятностных описаниях признаков классификации. Признаками в предложенном методе являются распределения максимумов значений радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии по амплитуде и высоте [Бояренко и др., 2023; Васильев и др., 2023]. При этом естественным является предположение о вариативности статистических описаний признаков для различных климатических зон.

Кроме того, в последнее время отмечается существенное увеличение количества глобальных осадков над сушей. Летом из-за изменений климата неопределенность оценок трендов интенсивности и частоты осадков в отдельных регионах весьма высока. Пространственные распределения изменений в количестве осадков демонстрируют значительные региональные расхождения и сезонные контрасты. С большой вероятностью по мере повышения глобальной температуры межгодовая изменчивость количества осадков во многих континентальных регионах увеличится¹.

При изучении того или иного метеорологического явления традиционно проводят анализ его характеристик в зависимости от времени года и суток, метеорологических условий и синоптических ситуаций. Такой подход позволяет выявить некоторые закономерности, характеризующие исследуемое явление, его генезис и эволюцию. Изучение географической вариативности и временной изменчивости параметров метеоявлений предполагает анализ его статистических характеристик и установление эмпирических законов распределения [Тихонов, Бакаев, 1978; Айвазян и др., 1983; Дегтярев и др., 2015].

С этой целью в данной работе сравнивались статистические характеристики для трех различных климатических зон европейской территории России. Из всех оперативно работающих на территории ЕТР метеорологических радиолокационных комплексов ближней зоны (МРЛК БЗ) «Монокль» были выбраны три позиции, размещенные в следующих областях:

Тверская, Воронежская и Калининградская. Зоны выбраны исходя из местных особенностей годовых атмосферных осадков и среднего числа дней с грозами в год. Кроме того, для Верхневолжской зоны исследовалась межгодовая изменчивость характеристик во времени, которая может быть связана с изменением климата. Исследования вариативности вероятностных описаний позволят сформировать более корректные и настраиваемые критерии классификации ОЯ Сб в предположении, что статистические параметры признаков варьируются для различных климатических зон и, следовательно, позволят уточнить значения порогов принятия решений при классификации ОЯ.

Разработка методики проведения исследований

Оперативное обнаружение погодных условий требует знания региональных особенностей развития атмосферных процессов с учетом географического положения, близости крупных водоемов, неоднородного рельефа и т.д. В этом случае региональные особенности синоптических процессов рассматриваются в пределах отдельного региона (области, района и т.п.), границы которого выделяются по физико-географическому, метеорологическому, синоптическому или иному признаку, отвечающему целям исследования. Нередко региональные атмосферные процессы изучаются в пределах границ территориальных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Хандожко, 1988]. Из этого очевидно, что радиолокационные характеристики облачности в различных районах в определенной степени зависят от местных географических особенностей. Следовательно, критерии классификации ОЯ должны варьироваться для различных климатических зон. Формирование региональных критериев классификации должно быть основано на корректном статистическом анализе выбранных признаков классификации.

В связи с особенностями климата и географическим положением, европейская территория России уязвима к различным опасным метеорологическим явлениям, связанным с кучево-дождевой облачностью. Так, например, на юге ЕТР грозовая активность может быть более частой из-за атмосферных перепадов и влияния рельефа местности. В прибрежных районах, таких как Калининградская область, могут наблюдаться сильные ветры и штормы из-за близости к морю. Эти различия в опасных явлениях разных регионов требуют отдельных исследований, а в последующем адаптации критериев классификации ОЯ для каждого региона [Голицын и др., 2001; Акимов и др., 2009; Kononova, Lupo, 2020].

Для региональных исследований вариативности признаков классификации был проведен анализ су-

ществующих пунктов размещения МРЛК БЗ «Монокль», которые установлены в различных климатических зонах европейской территории России.

Для выбора конкретных пунктов установки МРЛК БЗ использовались карта с климатическими зонами России, карта годовых атмосферных осадков, карта среднего числа дней с грозами в год на территории Российской Федерации.

Из всех оперативно работающих на территории ЕТР МРЛК были выбраны три позиции, размещенные в следующих областях: Тверская, Воронежская и Калининградская (рис. 1).

Указанные позиции выделены исходя из региональных особенностей климата²:

– Центрально-Чернозёмный район (в частности, Воронежская область, г. Воронеж), а также Центральный район (в частности, Тверская область, аэродром Орловка) – относятся к умеренно-континентальному климату. На аэродроме Орловка в год выпадает 850–1150 мм атмосферных осадков, в том числе ливневых, в тёплый период – более 400 мм, и более 30 дней с грозами в год. В Воронеже выпадает 550–700 мм атмосферных осадков в год, в том числе ливневых, наблюдается от 20 до 30 дней с грозами в год.

Установка МРЛК БЗ в Воронеже (51,670° с.ш., 39,250° в.д.) и на аэродроме Орловка (56,142° с.ш., 34,988° в.д.), которые находятся в одной климатической зоне и расположены на расстоянии 560 км друг от друга, обусловлена необходимостью изучения особенностей трансформации воздушных масс, сопровождающихся опасными погодными явлениями, такими как ливень, гроза и град и перемещающихся преимущественно с запада на восток [Лаптиева и др., 2021].

– Северо-Западный федеральный округ, а именно Калининградская область, пос. Донское, обладает изменчивым переменным климатом – от морского до умеренно-континентального. Зимы в среднем мягкие, однако, в некоторые годы могут наблюдаться периоды более холодной погоды. Лето, в свою очередь, в регионе прохладное. В среднем в год выпадает 700–850 мм осадков, включая ливневые осадки. Количество дней с осадками составляет в среднем 185 дней. Также в регионе наблюдается более 30 дней с грозами в год [Федоров и др., 1981; Каушила и др., 1983; Двоглазова, 2019].

Установка МРЛК БЗ в пос. Донское (54,935° с.ш., 19,983° в.д.) обусловлена изучением опасных явлений погоды в характерной области с местными особенностями бризовой циркуляции атмосферы (в непосредственной близости к Балтийскому морю).

Для указанной задачи была собрана статистически значимая выборка данных об амплитудном и высотном распределении максимальных значений радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии.

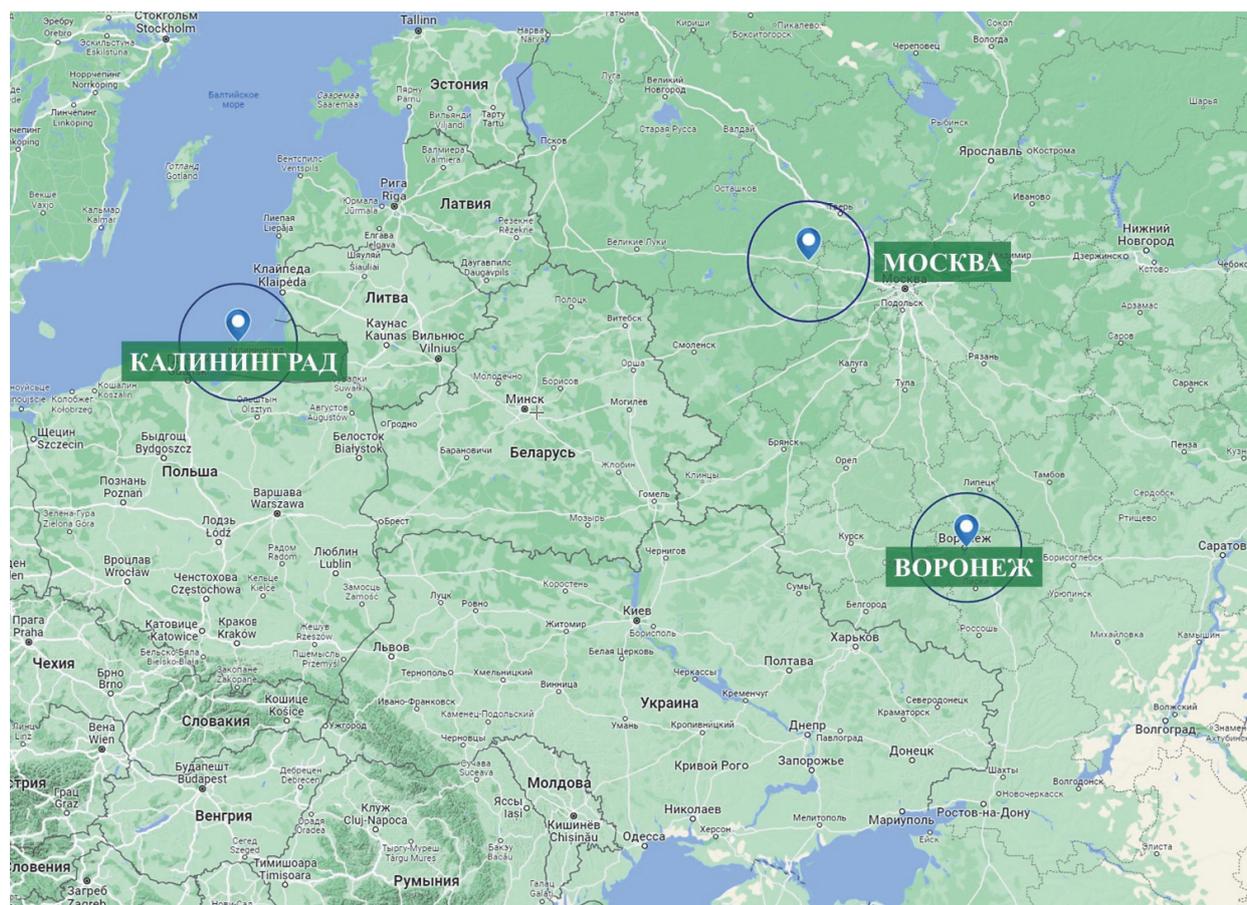


Рис. 1. Схема расположения пунктов размещения МРЛК БЗ «Монокль» на европейской территории России

Fig. 1. The layout of locations of weather radar WR BZ "Monocle" on the European territory of Russia

Была сформулирована программа экспериментального исследования опасных метеоявлений в различных климатических зонах, выделены её этапы [Дегтярев и др., 2015]:

- выбор метеостанций, локаторов ДМРЛ-С и грозопеленгаторов, расположение которых входит в радиус обзора МРЛК БЗ для проведения процедуры валидации данных;

- запись сигналов с МРЛК БЗ с опасными метеорологическими явлениями (ливень–гроза–град);

- сопоставление метеорологических радиолокационных данных МРЛК БЗ с эталонными и дополнительными источниками информации;

- автоматическое формирование горизонтальных сечений метеорологических радиолокационных продуктов в соответствии с выбранной высотой для оправдавшихся по эталонным и дополнительным источникам информации данных МРЛК БЗ;

- поиск максимального значения радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности на различных высотных уровнях;

- формирование базы данных высотного распределения параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии в облачности;

- статистическая обработка накопленных данных (выбор теоретического распределения, определение выборочных характеристик и проверка гипотезы о виде распределения).

Тверская область, расположенная в северо-западной части ЕТР, отличается умеренно-континентальным климатом с теплой летней погодой и умеренно холодными зимами, характеризующимися устойчивым и продолжительным снежным покровом. Помимо умеренного климата, Тверская область подвержена влиянию различных опасных природных явлений. Среди них выделяются сильные осадки в виде дождей и снегопадов, которые нередко сопровождаются грозами и градом [Дорофеев и др., 1992; Лазарев и др., 2016]. Для более детального изучения характерных особенностей опасных метеорологических явлений Тверской области, в 2022 и 2023 гг. были проведены исследования на аэродроме Орловка. В рамках

этой работы была проведена процедура валидации данных с использованием метеостанций, что позволило получить более точные и достоверные данные об особенностях высотного распределения параметров ОЯ в летний период.

В дополнение к исследованиям, проводимым на территории Тверской области, были проанализированы данные, полученные с Воронежской области. Область характеризуется умеренно-континентальным климатом, наблюдаются опасные климатические явления, среди которых наибольшую угрозу представляют экстремальные температурные условия, засухи, грозы с градобитием и сильными ливнями, шквалистые ветры. Как и Тверская область, Воронежская область также подвержена влиянию смены воздушных масс, что приводит к нестабильности в погодных условиях [Дмитриева, 2001; Акимов, 2013;

Веремей и др., 2013; Акимов, Акимов, 2014; Чернукульский и др., 2022].

К сопоставлению данных о явлениях по данным МРЛК БЗ в 100-километровой зоне (рис. 2) относительно пункта наблюдения, расположенном в Воронеже, были рассмотрены следующие наземные метеостанции (МС):

- 1) 34026: Конь-Колодезь: 52,15° с.ш.; 39,15° в.д.; 138 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 53 км;
- 2) 34238: Анна: 51,48° с.ш.; 40,42° в.д.; 154 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 85 км;
- 3) 34231: Лиски: 51,00° с.ш.; 39,50° в.д.; 115 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 78 км;
- 4) 34116: Старый Оскол: 51,30° с.ш.; 37,88° в.д.; 217 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 108 км;
- 5) 34123: Воронеж: 51,80° с.ш.; 39,22° в.д.; 147 м н.у.м., удаление от МРЛК БЗ 15 км.

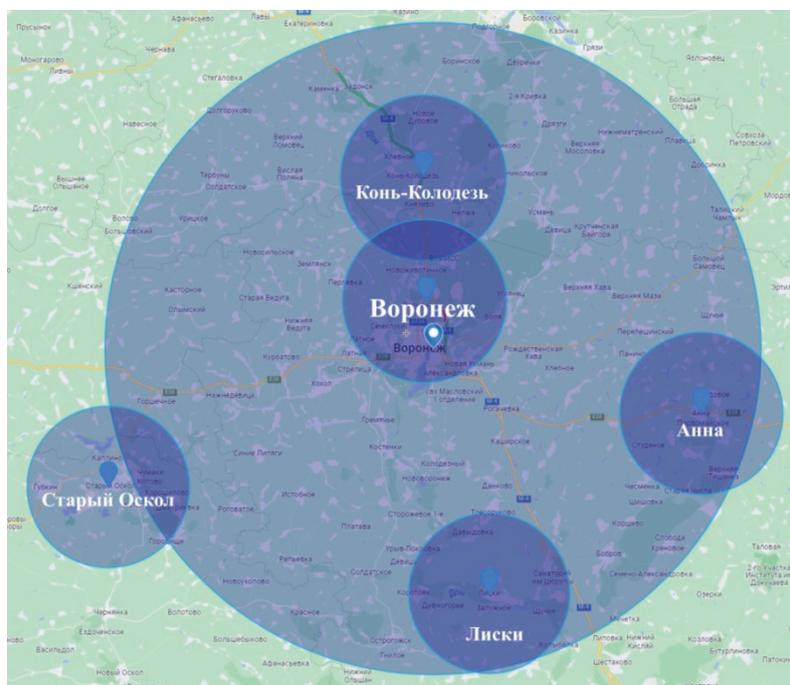


Рис. 2. Схема размещения МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в Воронеже

Fig. 2. The layout of locations of weather stations in a 100-kilometer zone relative to the observation point located in Voronezh

Калининград, расположенный на побережье Балтийского моря, имеет уникальный климат, отличающийся от климатов других регионов России. Этот регион находится в зоне влияния западных ветров, что оказывает существенное влияние на его погоду. Климат Калининграда можно охарактеризовать как переходный от морского к умеренно-континентальному. Одной из особенностей климата Калининграда является частое возникновение, развитие и угасание воздушных вихрей, циклонов и антициклонов, которые вовлекают в свои системы воздушные массы не

только умеренных широт, но и арктического и тропического происхождения. Благодаря своему приморскому положению и близости к Атлантическому океану, Калининградская область подвержена влиянию таких погодных явлений, как конвективная облачность, сильные штормовые ветры и туманы. Лето в Калининграде характеризуется усилением термической конвекции и прогревом верхних слоев атмосферы, что приводит к увеличению количества и интенсивности осадков в этом сезоне. Летние осадки часто имеют ливневый характер, сопровождаются

шквалистыми ветрами и грозами. К концу лета контрасты между морскими и континентальными воздушными массами уменьшаются, что приводит к частичному ослаблению активности атмосферных фронтов. Это может снизить интенсивность осадков, но их продолжительность сохраняется, а иногда даже увеличивается. Другим климатообразующим фактором для Калининградской области является Балтийское море, которое оказывает смягчающее воздействие на климат региона, особенно в прибрежных районах. Другим важным фактором является рельеф местности, который влияет на распределение температуры и осадков [Федоров и др., 1981; Двоглазова, 2019].

К сопоставлению информации об опасных метеоявлениях по данным МРЛК БЗ, расположенном в п. Донское в 100-километровой зоне (рис. 3) относительно пункта наблюдения, были рассмотрены следующие МС:

- 1) 26607: Пионерский: 54,95° с.ш.; 20,21 в.д.; 28 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 15 км;
- 2) 26704: Мамоново: 54,47° с.ш.; 19,93 в.д.; 23 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 52 км;
- 3) 26702: Калининград: 54,70° с.ш.; 20,62 в.д.; 21 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 39 км;
- 4) 26708: Низовье: 54,70° с.ш.; 20,77 в.д.; 10 м над у.м., удаление от МРЛК БЗ 55 км.

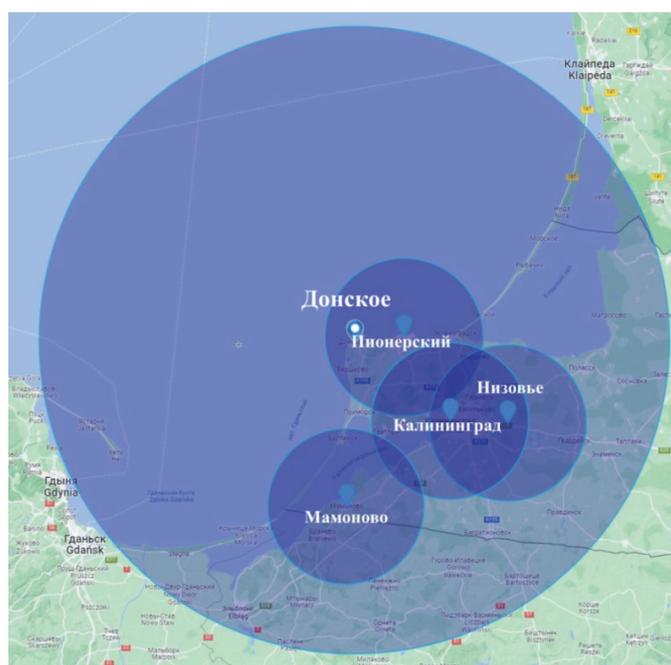


Рис. 3. Схема размещения МС в 100-километровой зоне относительно пункта наблюдения, расположенного в пос. Донское (Калининградская область)

Fig. 3. The layout of locations of weather stations in a 100-kilometer zone relative to the observation point located in the village of Donskoye (Kaliningrad region)

Важно отметить, что климат как Тверской, Воронежской, так и Калининградской областей формируется под воздействием различных факторов: географического положения, рельефа местности, близости к водным объектам и атмосферной циркуляции. Изучение климатических особенностей этих регионов имеет большое значение для прогнозирования погоды, обнаружения и классификации опасных метеоявлений.

Анализ географической вариативности статистических характеристик признаков классификации для различных регионов

Анализ параметров исследуемых метеоявлений начнём с рассмотрения особенностей распространения ОЯ на территории Воронежской области. Для

анализа был выбран летний период июнь–август 2023 г. Выборки ОЯ с ливнем, грозой, градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления.

Основные результаты анализа сводятся к следующему. Высота распространения Сб с ливневыми осадками достигает 8 км, грозовые облака достигают высоты 13–14 км, а градовые облака простираются до 15 км. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в ливневых облаках наблюдается на высоте 1–3 км и достигает значения 40,52 дБZ. В свою очередь, максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энергии в этих облаках достигает значения $0,8352 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. В грозовых облаках Z_{max} располагается на высоте 2–4 км и достигает значения 49,83 дБZ, а максимальное значение

удельной скорости диссипации турбулентной энергии составляет $0,9587 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Максимальное значение радиолокационной отражаемости в граде наблюдается на высоте 2–5 км и составляет 61,27 дБZ. EDRmax при рассмотрении градового облака составляет $0,9426 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Также можно отметить, что размеры зоны максимальной отражаемости различны для града, гроз и ливней, как и для турбулентности. «Ядро» радиоэха града имеет большую мощность и значение параметров по сравнению с грозой и, тем более, ливнем.

В работе [Васильев и др., 2023] было отмечено, что проверка различных гипотез о виде распределений радиолокационной отражаемости МРЛК по критерию согласия χ^2 Пирсона для уровня значимости 0,01 показала максимальное соответствие экспериментальных относительных частот обобщенному распределению Рэлея – Райса. Следовательно, в работе были найдены параметры распределения Райса для параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, Z_{\max} и EDR_{\max} рассматриваемых метеоявлений, что отображено на рис. 4, 5.

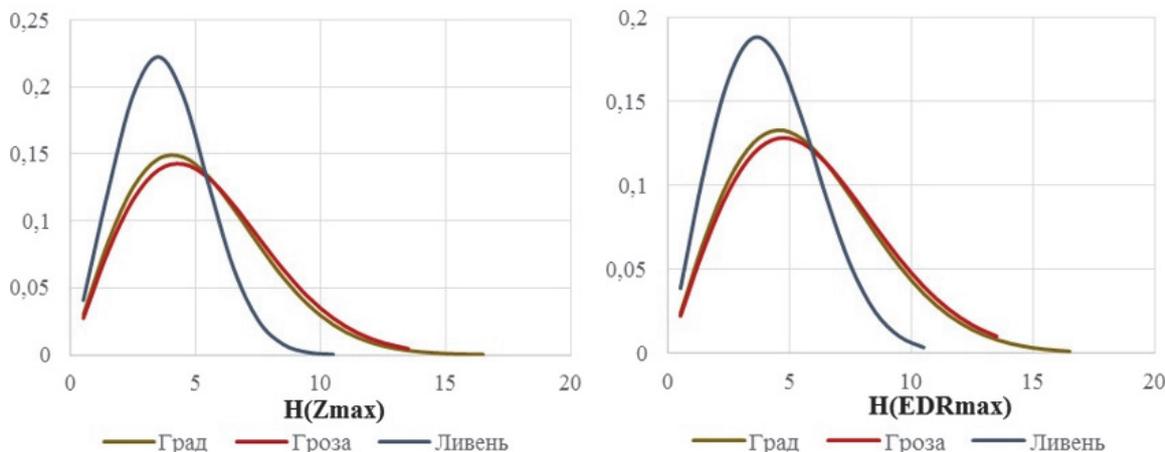


Рис. 4. Плотность распределения вероятности $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ для рассматриваемых метеоявлений, Воронежская область

Fig. 4. Density of the probability distribution Z_{\max} and EDR_{\max} by height for the meteorological phenomena under consideration, Voronezh region

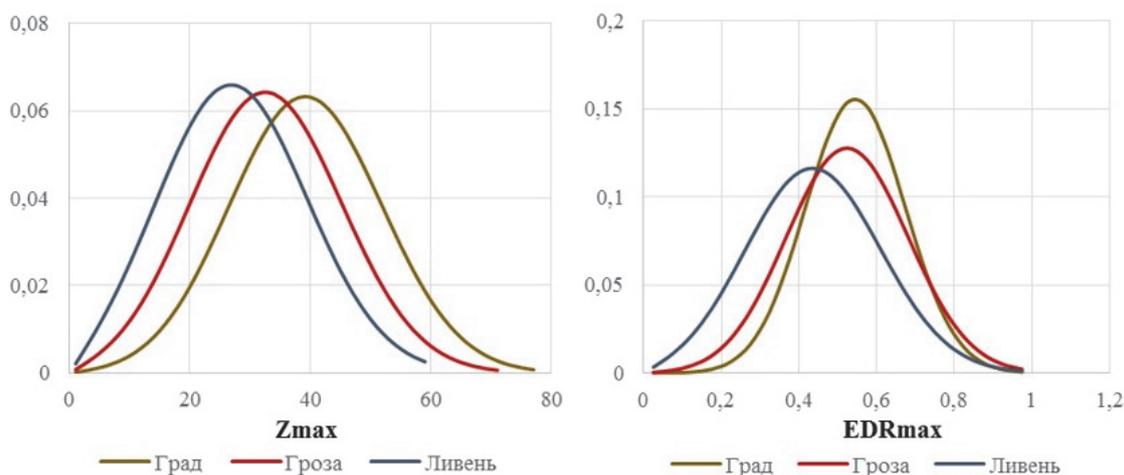


Рис. 5. Плотность распределения вероятности Z_{\max} и EDR_{\max} для рассматриваемых метеоявлений, Воронежская область

Fig.5. Probability distribution density of Z_{\max} and EDR_{\max} by values for the meteorological phenomena under consideration, Voronezh region

Для проведения анализа на территории Калининградской области также был выбран летний период июнь–август 2023 г. Выборки ОЯ с ливнем, грозой,

градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления. Максимальное значение отражаемости в граде, равное 57,1 дБZ, наблюдается на высоте 3–

6 км. В свою очередь, градовые облака могут прости- раться до высоты 13 км. Максимальное значение EDRmax, характерное для данного региона в граде составляет $0,8568 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. В грозе значение Zmax, рав- ное 45,19 дБZ, ниже, чем в кучево-дождевой облачно- сти с градом, и наблюдается на высоте около 3 км. «Ядро» радиоэха грозы занимает меньшую по срав- нению с градом площадь и распространяется по вер- тикали до высоты 12 км. Максимальное значение удельной скорости диссипации турбулентной энер- гии в грозовом облаке примерно составило $0,9732 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$. Кучево-дождевое облако с ливневым дождем имеет меньшую максимальную высоту ра- диоэха по сравнению с градом и грозой и может рас-

пространяться до 8 км. Максимальные значения отра- жаемости в ливнях отмечаются на высотах от 1 до 3 км и составляют 46,73 дБZ, в свою очередь EDRmax для данной территории исследования было зафикси- ровано около $0,6636 \text{ м}^2 \times \text{с}^{-3}$.

Распределения Райса для параметров $H(Z_{\max})$, $H(EDR_{\max})$, Z_{\max} и EDR_{\max} рассматриваемых метеояв- лений отображены на рис. 6, 7. Полученные выборочные статистические характеристики по результатам вычислений амплитудного и высотного распределения парамет- ров отражаемости и удельной скорости диссипации тур- булентной энергии для ливня, грозы и града в различных географических регионах сравним с данными, характер- ными для территории Тверской области (табл. 1).

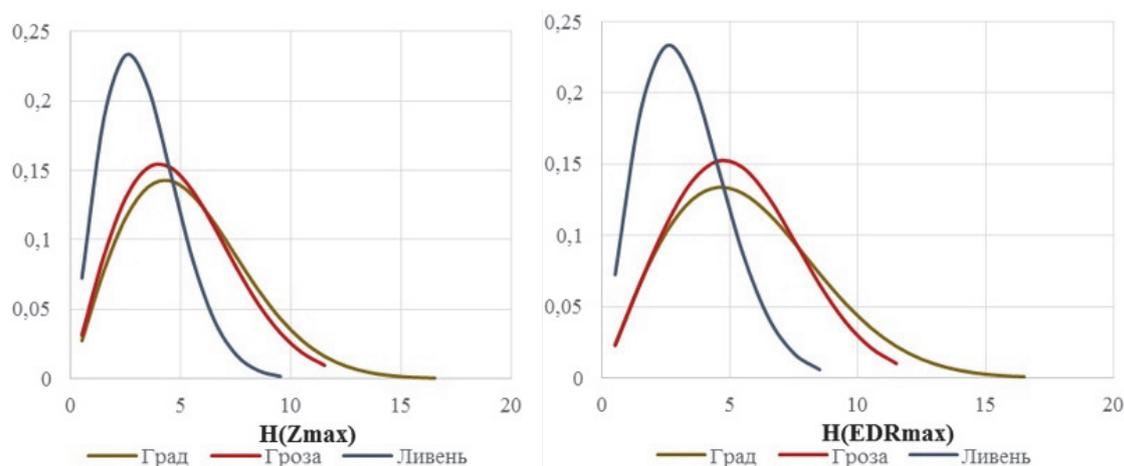


Рис. 6. Плотность распределения вероятности $H(Z_{\max})$ и $H(EDR_{\max})$ для рассматриваемых метеоявлений, Калининградская область

Fig. 6. Density of the probability distribution Z_{\max} and EDR_{\max} by height for the meteorological phenomena under consideration, Kaliningrad region

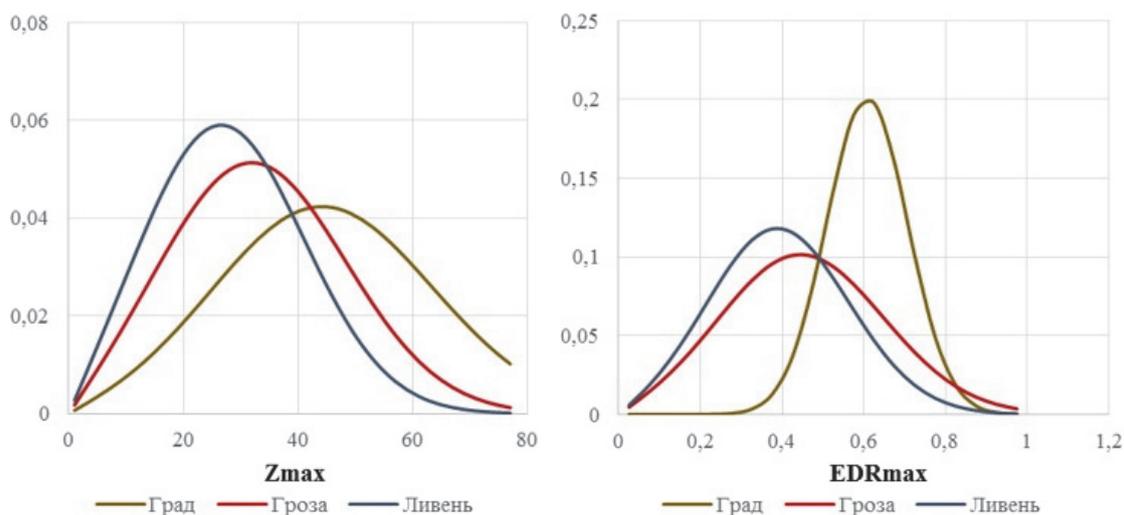


Рис. 7. Плотность распределения вероятности Z_{\max} и EDR_{\max} для рассматриваемых метеоявлений, Калининградская область

Fig. 7. Probability distribution density of Z_{\max} and EDR_{\max} by values for the meteorological phenomena under consideration, Kaliningrad region

Таблица 1

Географическая вариативность статистических характеристик параметров ОЯ, μ – математическое ожидание

Table 1

Geographical variability of statistical characteristics of meteorological phenomena parameters, μ – expected value

Параметр	Ливень			Гроза			Град		
	H(Zmax)								
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 2,5$	$\mu = 3,5$	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 4$	$\mu = 1$
H(EDRmax)									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 3$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 1$
Zmax									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 23$	$\mu = 22$	$\mu = 24$	$\mu = 28$	$\mu = 29$	$\mu = 30$	$\mu = 40$	$\mu = 42$	$\mu = 37$
EDRmax									
μ	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж	Донское	Орловка	Воронеж
	$\mu = 0,35$	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,61$	$\mu = 0,53$

Таким образом, по результатам полученных статистических характеристик параметров для ливня, грозы, града в разных географических регионах можно выделить следующую закономерность. Высота максимального значения радиолокационной отражаемости (H(Zmax)) имеет самые высокие значения для МРЛК «Орловка» по сравнению с МРЛК «Воронеж» (кроме случаев ливня) и с МРЛК «Донское». По всей видимости, завышенные значения (H(Zmax)) по данным МРЛК «Орловка» по сравнению с МРЛК «Донское» обусловлены большей толщиной воздушных масс с кучево-дождевой облачностью, которые господствовали над пунктом размещения МРЛК «Орловка» по данным приземных синоптических карт.

Значения H(Zmax) по данным Воронежской МРЛК БЗ меньше, чем значения H(Zmax), полученные на МРЛК «Орловка» (кроме случаев ливня), причём МРЛК «Воронеж» и МРЛК «Орловка» установлены в одной климатической зоне. Подобная закономерность объясняется тем, что в летний период 2023 г. воздушные массы, господствовавшие в п. Орловка и в п. Воронеж, перемещались преимущественно с северо-западного, северного направлений по данным приземных синоптических карт. Таким образом, воздушные массы с кучево-дождевой облачностью сначала господствовали над п. Орловка, а далее перемещались и трансформировались, постепенно разрушаясь и теряя количество энергии неустойчивости, к п. Воронеж (что подтверждает относительно малая величина Zmax для случаев града по данным МРЛК «Воронеж» по сравнению с данными МРЛК «Орловка»). Также косвенным подтверждением диссипации кучево-дождевой облачности к п. Воронеж являются меньшие значения величины высоты максимальной турбулентности H(EDRmax) (кроме случаев ливня) по сравнению с данным МРЛК

«Орловка». При этом завышенные значения H(Zmax) и H(EDRmax) для случаев ливня по данным МРЛК «Воронеж» будут рассмотрены более подробно в динамике вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности в дальнейших исследованиях.

Значения H(EDRmax) и значения EDRmax по данным МРЛК «Донское» обладают хаотичным характером относительно данных других МРЛК, что объясняется крайне неустойчивым морским климатом умеренных широт, а именно: процессом взаимодействия океан–атмосфера и дальнейшей взаимной перестройкой двух турбулязированных слоев. Эта перестройка охватывает в первую очередь пограничные слои атмосферы и океана, а уже затем посредством вертикальных токов, возникающих в пограничных слоях, передаётся в свободную атмосферу и глубинные слои океана.

Статистические характеристики параметров опасных метеоявлений (ливень, гроза, град) будут уточняться дополнительным сбором статистических данных, также более подробно будет рассмотрена динамика вертикальных профилей радиолокационной отражаемости и турбулентности. Важно отметить, что поиск статистических характеристик параметров опасных метеоявлений является попыткой описать их климатические особенности (с точки зрения метеолокации) того или иного района, где установка МРЛК уже осуществлена или только планируется. Указанная задача является ресурсоёмкой, поскольку к климатообразующим факторам относятся: географическая широта, подстилающая поверхность, циркуляция воздушных масс. Таким образом, авторы, решая поставленную задачу комплексно, с учётом различных факторов и статистических характеристик, уместно заключили следующее: изменение статистических

характеристик параметров опасных метеоявлений (ливень–гроза–град) в различных географических регионах объясняется особенностями трансформаций воздушных масс, а также особенностями характеристик самих воздушных масс в разных климатических районах.

На основе критерия максимального правдоподобия были определены пороги принятия решения (Нпор) для одномерных задач (табл. 2).

Установка текущих пороговых значений по экспериментальным данным представлена на рис. 8. При этом в работе [Васильев и др., 2023] были приведены базовые пороги критериев классификации МРЛК для различных метеоявлений п. Орловка, в том числе для ливня, грозы, града; они были установлены в ходе различных испытаний МРЛК и впоследствии были уточнены в работе [Васильев и др., 2023]. Из приве-

денных ниже графиков можно отметить, что для параметра Zmax порог принятия решений ливень/гроза (Нл-гз) в Воронеже сдвинулся на 10,96 %, в свою очередь, для Калининграда данный порог увеличился на 26,1 % по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Порог принятия решений гроза/град (Нгз-гд) для Воронежа сдвинулся левее на 2,8 %, а для Калининграда увеличился на 13,47 % по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке. Тенденция изменения пороговых значений для параметра EDRmax выглядит следующим образом: процентное изменение порогового значения ливень/гроза для Воронежа составляет 16,4 %, а для Калининграда 26,15 %. Пороговое значение гроза/град для Воронежа составляет 37,59 %, в то время как для Калининграда – 53,7 %.

Таблица 2

Географическая вариативность порогов принятия решения ОЯ (Нпор)

Table 2

Geographical variability of decision thresholds for dangerous weather events (Нпор)

Параметр	Ливень/Гроза			Гроза/Град		
	Zmax					
Пункт размещения МРЛК	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Нпор	27,36 дБЗ	34,49 дБЗ	30,36 дБЗ	37,18 дБЗ	42,19 дБЗ	36,14 дБЗ
EDRmax						
Пункт размещения МРЛК	Орловка	Донское	Воронеж	Орловка	Донское	Воронеж
Нпор	0,39 м ² ×с ⁻³	0,492 м ² ×с ⁻³	0,454 м ² ×с ⁻³	0,54 м ² ×с ⁻³	0,83 м ² ×с ⁻³	0,743 м ² ×с ⁻³

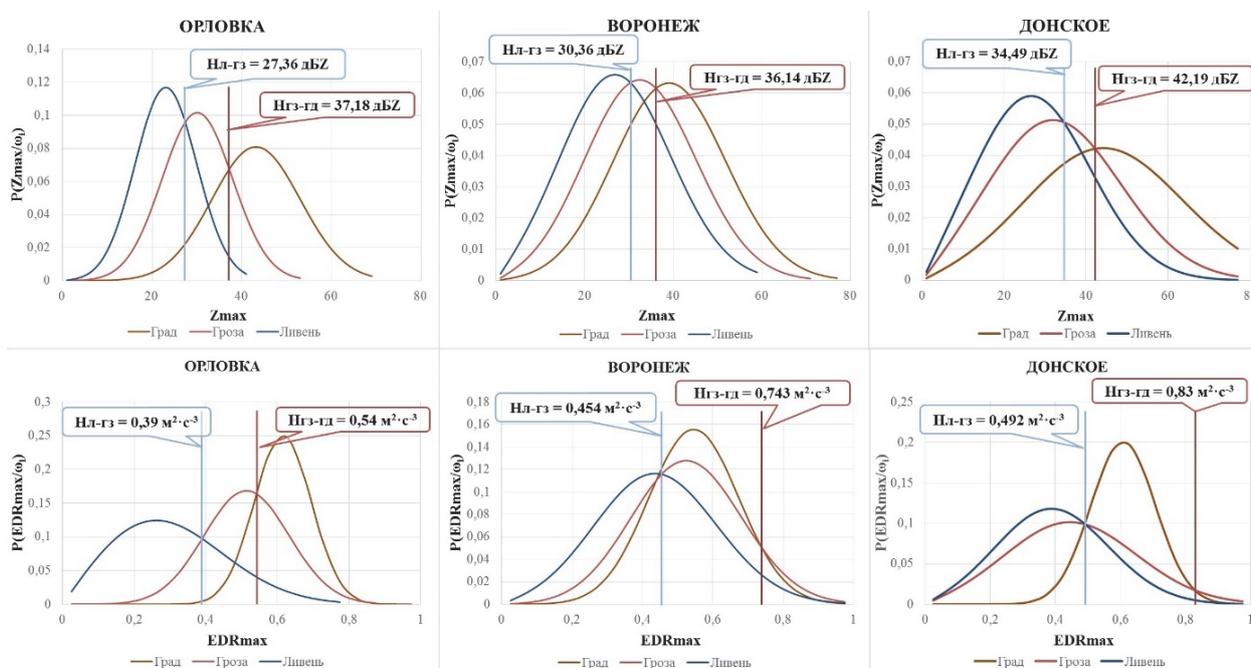


Рис. 8. Тенденции изменения пороговых значений от географического региона

Fig. 8. Trends in threshold values from a geographical region

На основе анализа экспериментальных данных можно отметить, что генезис и эволюция явления, а также пространственно-временная изменчивость его параметров обуславливаются взаимодействием макро- и мезомасштабной циркуляции и географическим фактором.

Анализ межгодовой изменчивости статистических характеристик для Верхне-Волжского региона

На основании экспериментальных данных был проведен сравнительный анализ летнего мониторинга

(июнь–август) за опасными метеоявлениями в 2022 г. и в 2023 г. для Верхне-Волжского региона. В 2022 г. выборки ОЯ с ливнем составили 50 случаев, с грозой – 25, с градом – 25 случаев; в 2023 г. выборки ОЯ с ливнем, грозой, градом составили по 25 случаев для каждого метеоявления.

Годовой ход отчетливо прослеживается по значениям статистических характеристик параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} , который показал незначительные различия. Данные, характеризующие временную изменчивость параметров, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение статистических характеристик межгодовой изменчивости параметров ОЯ по данным МРЛК «Орловка», μ – математическое ожидание

Table 3

Comparison of statistical characteristics of interannual variability of weather events parameters, μ – expected value

Параметр	Ливень		Гроза		Град	
	H(Z _{max})					
μ	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3.5$	$\mu = 3.5$	$\mu = 4$	$\mu = 4$
H(EDR _{max})						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 2$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 4$	$\mu = 4$
Z _{max}						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 22$	$\mu = 24$	$\mu = 29$	$\mu = 30$	$\mu = 42$	$\mu = 41$
EDR _{max}						
μ	2022	2023	2022	2023	2022	2023
	$\mu = 0,2$	$\mu = 0,35$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,61$	$\mu = 0,6$

В ходе работы проводились комплексные исследования, направленные на выявление долгосрочных тенденций изменения статистических характеристик.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в течение нескольких лет высотные параметры Z_{max} и EDR_{max} на территории исследования не отличаются от параметров предыдущего года.

При этом данные были собраны за летний период 2022 и 2023 гг., которые значительно отличаются друг от друга по климатическим особенностям. В летний период 2022 г. над рассматриваемой территорией наблюдалась активная циклоническая деятельность с продолжительными осадками, в летний период 2023 г. преобладала антициклональная погода, осадки были редкими, но крайне обильными по данным приземных синоптических карт. Такие тенденции изменения статистических характеристик параметров распределения несут важную информацию о взаимодействии погодных процессов. Они могут послужить основой для разработки эффективных методов адаптации при решении задач корректировки критериев классификации ОЯ Сб для конкретной местности.

Заключение

В рамках инновационного метода классификации ОЯ Сб, основанного на комплексном использовании отражательных и ветровых характеристик атмосферы, была оценена их зависимость от климатической зоны и местных особенностей циркуляции атмосферы по данным МРЛК БЗ, размещённых на аэродроме Орловка (Тверская область), в г. Воронеж (Воронежская область), в пос. Донское (Калининградская область). Проведен статистический анализ экспериментальных данных опасных метеорологических явлений по данным трёх единиц МРЛК БЗ, размещённых в различных условиях местных особенностей циркуляции атмосферы. В статье выявлены тренды изменения параметров $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} и EDR_{max} в зависимости от климатических условий и географического расположения МРЛК БЗ.

Было выявлено, что размеры зоны максимальной отражаемости различны как для града, гроз и ливней, так и для турбулентности. «Ядро» радиоэха града имеет

большую мощность и значение параметров радиолокационной отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии по сравнению с ливнем и грозой.

Полученные значения $H(Z_{\max})$, по данным Воронежской МРЛК БЗ, оказались меньше, чем значения $H(Z_{\max})$, полученные на МРЛК «Орловка» (кроме случаев ливня), что объясняется тем, что в летний период 2023 г. воздушные массы с кучево-дождевой облачностью сначала господствовали над п. Орловка, а далее перемещались и трансформировались, постепенно разрушаясь и теряя количество энергии неустойчивости, к п. Воронеж.

Полученные значения $H(EDR_{\max})$ и значения EDR_{\max} , по данным МРЛК «Донское», обладают хаотичным характером относительно данных других МРЛК, что объясняется крайне неустойчивым морским климатом умеренных широт, а именно: процессом взаимодействия океан–атмосфера и дальнейшей взаимной перестройкой двух турбулязированных слоев.

В типовых случаях было показано, насколько (в %) сдвигается порог принятия решения для одномерных задач для критерия максимального правдоподобия. Было установлено, что порог принятия решений для ливней, гроз и града для Калининграда смещался

больше, чем для Воронежа по сравнению с полученным пороговым значением в Орловке, что объясняется расположением пунктов МРЛК «Воронеж» и «Орловка» в одной климатической зоне. В работе показано, что изменение статистических характеристик параметров опасных метеоявлений (ливень–гроза–град) в различных географических регионах объясняется особенностями трансформаций воздушных масс, а также особенностями характеристик самих воздушных масс в разных климатических районах.

Проведенный анализ данных летнего мониторинга на территории аэродрома Орловка в 2022 и 2023 гг. показал незначительные изменения статистических данных. Анализ данных по межгодовой изменчивости выявил, что тенденции изменения характеристик кучево-дождевой облачности с ОЯ связаны с несущественными изменениями климатических условий или метеорологических факторов на рассматриваемой территории.

Полученные значения статистических характеристик изменения радиолокационных характеристик кучево-дождевой облачности с опасными метеоявлениями целесообразно учитывать при разработке методических указаний по формированию критериев классификации ОЯ Сб в конкретном регионе.

Примечания

¹ Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научное издание технологий, 2022. 124 с.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.

Список источников

Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М. : Финансы и статистика, 1983. 487 с.

Акимов В.А., Дурнев Р.А., Соколов Ю.И. Опасные гидрометеорологические явления на территории России / МЧС России. М. : ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2009. 316 с.

Акимов Л.М. Пространственно-временные закономерности распределения климатических характеристик на территории Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология 2013. № 1. С. 192–198.

Акимов Л.М., Акимов Е.Л. Характеристика циркуляционного режима территории Воронежской области // Труды Хоперского государственного заповедника : сб. ст. 2014. Вып. 9. С. 3–11.

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

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

Васильев О.В., Коротков С.С., Галаева К.И., Бояренко Э.С. Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26, № 2. С. 49–60.

Веремей Н.Е., Довгалок Ю.А., Ефимов С.В. и др. Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 32–43.

Голицын Г.С., Васильев А.А., Куличков С.Н. и др. Природные опасности России : В 6 т. / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. Т. 5. М. : КРУК, 2001. 296 с.

Двоглазова Н.В. Современное состояние климатической системы Калининградской области на фоне глобального потепления // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2019. № 1. С. 35–45

Дегтярев А.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А. Статистические методы обработки метеорологической информации : учебник. СПб. : Андреевский издательский дом, 2015. 225 с.

- Дмитриева В.А. Термический режим г. Воронежа на фоне глобального потепления климата // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2001. № 1. С. 129–135.
- Дорофеев А.А., Ткаченко А.А., Щукина А.С. и др. География Тверской области: книга / под ред. А.А. Ткаченко. Тверь : ТГУ, 1992. 290 с.
- Каушила К.А., Буз А.И., Алосявичене Г. и др. Климат Калининграда / под ред. К.А. Каушила, Ц.А. Швер. Л. : Гидрометеиздат, 1983. 143 с.
- Лазарев О.Е., Махрова Е.Д., Петина А.М. Климатическое картографирование территории Тверской области: состояние и перспективы // Вестник ТвГУ. 2016. № 1. С. 56–67.
- Лаптиева О.А., Герасименко Ю.Ю., Чечин Д.И. Климатические и географические условия Воронежской области как фон проявления негативных природных процессов // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2021. № 1 (12). С. 23–29.
- Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н. Статистическая теория радиотехнических устройств. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978. 420 с.
- Федоров Е.Е. и др. Климат Калининградской области // Почвы Калининградской области. М., 1981. С. 159–174.
- Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы : учеб. пособие. Л. : ЛГМИ, 1988. 103 с.
- Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41. doi: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41
- Konopova N.K., Lupo A.R. An Investigation of circulation regime variability and dangerous weather phenomena in Russia in the 21st century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. V. 606, No. 1. P. 012023.

References

- Aivazian S.A., Eniukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaia statistika: osnovy modelirovaniia i pervichnaia obrabotka dannykh* [Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing]. Moscow: Finansy i statistika, 1983. 487 p. In Russian
- Akimov V.A., Durnev R.A., Sokolov Iu.I. *Opasnye gidrometeorologicheskie iavleniia na territorii Rossii* [Dangerous hydrometeorological phenomena in Russia]. MCHS Rossii. Moscow: FGU VNII GOCHS (FTS), 2009. 316 p. In Russian
- Akimov L.M. *Prostranstvenno-vremennyye zakonomernosti raspredeleniya klimaticheskikh kharakteristik na territorii Voronezhskoy oblasti* [Spatiotemporal patterns of distribution of climatic characteristics on the territory of the Voronezh region] // Bulletin of Voronezh State University. 2013. No. 1. pp. 192–198. In Russian
- Akimov L.M., Akimov E.L. *Charakteristika cirkulyacionnogo rezhima territorii Voronezhskoy oblasti* [Characteristics of the circulation regime of the territory of the Voronezh region] // Proceedings of the Khopersky State Reserve. Article in the collection. 2014. Iss. 9. pp. 3–11. In Russian
- Boyarenko E.S., Bolelov E.A., Vasiliev O.V., Korotkov S.S. *Ekspierimental'nyi statisticheskii analiz radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot opasnykh meteorologicheskikh iavlenii* [Experimental statistical analysis of radar signals reflected from weather hazards]. Civil Aviation High Technologies, 2023. 26(5). pp. 19–29. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-5-19-29. In Russian
- Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. *Obosnovanie iskhodnykh dannykh parametricheskikh algoritmov klassifikatsii opasnykh meteoiaivlenii* [Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards]. Civil Aviation High Technologies, 2023. 26(6): pp. 8–21. doi: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21. In Russian
- Vasiliev O.V., Korotkov S.S., Galaeva K.I., Boyarenko E.S. Decision criteria for the classification of meteorological phenomena in the weather radar complex of the near-airfield zone // *Nauchnyi vestnik Moscow state technical university of civil aviation*. 2023. T. 26. No. 2. In Russian
- Veremey N.E., Dovgalyuk Yu.A., Efimov S.V. et al. *Issledovanie livnevoj i grozovoj aktivnosti na territorii Rossii s ispol'zovaniem chislennoj modeli konvektivnogo oblaka i dannyx reanaliza* [Study of shower and thunderstorm activity on the territory of Russia using a numerical model of convective cloud and reanalysis data] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2013. No. 1. pp. 32–43. In Russian
- Golitsyn G.S., Vasil'ev A.A., Kulichkov S.N. *Prirodnye opasnosti Rossii: Monografiia v 6 tomakh* [Natural hazards of Russia: A monograph in 6 volumes]; Ed. G.S. Golitsyna, A.A. Vasil'eva. Tom 5. Moscow: KRUK, 2001. 296 p. In Russian
- Dvoeglazova N.V. *Sovremennoe sostoyanie klimaticheskoi sistemy Kaliningradskoi oblasti na fone global'nogo potepeniya* [The current state of the climate system of the Kaliningrad region against the backdrop of global warming] // *Vestnik (Bulletin) of I. Kant Baltic Federal University*. 2019. No. 1. pp. 35–45. In Russian
- Degtiarev A.S., Drabenko V.A., Drabenko V.A. *Statisticheskie metody obrabotki meteorologicheskoi informatsii. Uchebnik* [Statistical methods of processing meteorological information. Textbook] St. Petersburg: ООО «Andreevskii izdatel'skii dom», 2015. 225 p. In Russian
- Dmitrieva V.A. *Termicheskii rezhim g. Voronezha na fone global'nogo potepeniia klimata* [The thermal regime of Voronezh against the background of global climate warming] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Geografiia. Geoekologiya*. 2001. No. 1. pp. 129–135. In Russian
- Dorofeev A.A., Tkachenko A.A., Shchukina A.S. et al. *Geografiya Tverskoi oblasti* [The geography of the Tver region] Tver. TGU, 1992. 290 p. In Russian
- Kaushila K.A., Buz A.I., Alosiaviciene G. et al. *Klimat Kaliningrada* [The climate of the Kaliningrad]. Leningrad. Gidrometeizdat, 1983. 143 p. In Russian
- Lazarev O.E., Makhrova E.D., Petina A.M. *Klimaticheskoe kartografirovaniie territorii Tverskoi oblasti: sostoyanie i perspektivy* [Climatic mapping of the territory of the Tver region: state and prospects] Bulletin of Tver State University. 2016. No. 1. pp. 56–67. In Russian
- Laptieva O.A., Gerasimenko Iu.Iu., Chechin D.I. *Klimaticheskie i geograficheskie usloviia Voronezhskoi oblasti, kak fon proiavleniia negativnykh prirodnykh protsessov* [Climatic and geographical conditions of the Voronezh region as a background for the manifestation

of negative natural processes] // *Modeli i tekhnologii prirodoobustroistva (regional'nyi aspekt)* [Models and technologies of environmental management (regional aspect)]. 2021. No. 1 (12). pp. 23–29. In Russian

Tikhonov V.I., Bakaev Iu.N. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh ustroystv* [Statistical theory of radio engineering devices]. Moscow: Izd. VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1978. 420 p. In Russian

Fedorov E.E., et al. *Klimat Kaliningradskoi oblasti* [The climate of the Kaliningrad region] // *Pochvy Kaliningradskoi oblasti* [Soils of the Kaliningrad region]. Moscow, 1981. pp. 159–174. In Russian

Khandozhko L.A. *Regional'nye sinopticheskie protsessy: Ucheb. Posobie* [Regional synoptic processes: A textbook]. Leningrad. gidrometeorol. in-t. Leningrad: LGMI, 1988. 103 p. In Russian

Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A. et al. *Opasny'e atmosferye yavleniya konvektivnogo kharaktera v Rossii: nablyudaemy'e izmeneniya po razlichny'm dannym* [Dangerous atmospheric phenomena of a convective nature in Russia: observed changes according to various data] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2022. No. 5. pp. 27–41. In Russian. doi: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41

Kononova N.K., Lupo A.R. An Investigation of circulation regime variability and dangerous weather phenomena in Russia in the 21st century. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. T. 606. No. 1. pp. 012023.

Информация об авторах:

Болелов Э.А., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: edbolelov@mail.ru

Васильев О.В., доктор технических наук, профессор, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: vas_ov@mail.ru

Бояренко Э.С., аспирант, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: boyarenko.elvira@mail.ru

Галаева К.И., кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия. E-mail: ks.galaeva@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bolelov E.A., Dr. Sci. (Technique), Associate Professor, Head of the Air Transport Radio-Electronic Equipment Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: edbolelov@mail.ru

Vasiliev O.V., Dr. Sci. (Technique), Professor, Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: vas_ov@mail.ru

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

Galaeva K.I., Cand. Sci. (Technique), Senior Lecturer, Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia. E-mail: ks.galaeva@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.04.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 10.04.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 29.08.2025