



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии, климатологии и охраны атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование грозовых явлений в районе аэропорта Пулково»

**Исполнитель**

**Колесников Егор Константинович**  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель**

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

**Канухина Анна Юрьевна**  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
И.о. заведующего кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

**Дробжева Яна Викторовна**  
(фамилия, имя, отчество)

« 03 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## Содержание

Введение	3
Глава 1. Теоретические основы изучения грозовой деятельности	6
1.1. Понятие грозовых явлений и их метеорологическая природа	6
1.2. Основные механизмы формирования атмосферной неустойчивости	11
1.3. Классификация гроз: синоптические и термодинамические подходы	14
1.4. Индексы конвективной неустойчивости атмосферы и их прогностическая значимость	16
1.5. Обзор отечественных и зарубежных исследований грозовой активности	19
Глава 2. Методика и исходные данные исследования гроз в районе аэропорта Пулково	23
2.1. Район исследования и метеорологические особенности территории	23
2.2. Источники данных и методы их обработки	28
2.3. Критерии выделения синоптических ситуаций и алгоритм классификации гроз	30
2.4. Расчёт и интерпретация термодинамических индексов	33
2.5. Использование аэрологических и спутниковых данных в идентификации типов гроз	36
Глава 3. Анализ грозовых явлений в районе Пулково в 2015–2022 гг.	39
3.1. Обобщённая статистика грозовых случаев по сезонам и годам	39
3.2. Распределение гроз по синоптическим типам и их характеристика	42
3.3. Сопоставление термодинамических индексов с фактическими грозами	48
3.4. Сравнительный анализ грозовой активности с другими регионами России и зарубежными примерами	51
3.5. Прогностическая оценка пороговых значений индексов неустойчивости для региона	54
Заключение	57
Список использованных источников	60

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастающей климатической нестабильности и учащающихся экстремальных погодных явлений грозовая активность приобретает особое значение не только как объект фундаментальных метеорологических исследований, но и как фактор, непосредственно влияющий на безопасность объектов транспортной и критической инфраструктуры. Среди наиболее уязвимых секторов, подверженных рискам, связанным с грозами, особое место занимают авиационные комплексы, где любые нарушения в погодной устойчивости могут повлечь серьёзные сбои в работе навигационных и диспетчерских систем, нарушить графики авиаперевозок и представлять угрозу как для воздушных судов, так и для наземного персонала. В этом контексте аэропорт Пулково, как крупнейший воздушный узел северо-западного региона России, представляет собой приоритетную площадку для комплексного исследования грозовых явлений, их характеристик, динамики и факторов возникновения.

Следует отметить, что гроза — это сложный атмосферный процесс, обусловленный развитием глубокой конвекции в условиях термодинамической неустойчивости атмосферы. Её проявления — молнии, гром, шквалистый ветер и интенсивные осадки — представляют собой не только угрозу для технических систем, но и играют важную роль в перераспределении тепловой энергии и влаги в тропосфере. Грозовая деятельность напрямую связана с процессами вертикального развития кучево-дождевых облаков, образующихся при определённых синоптических условиях, включая фронтальные взаимодействия, циклоническую активность и локальные эффекты подстилающей поверхности. В настоящее время особое внимание уделяется прогнозированию и раннему обнаружению гроз, что требует точного понимания предшествующих условий их формирования, включая характеристики термодинамических индексов, аэрологических параметров и типов атмосферной стратификации.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности краткосрочного прогноза опасных метеорологических явлений в условиях высокой плотности воздушного движения, а также отсутствием в отечественной научной литературе системного анализа грозовой активности в районе конкретных объектов аэротехнической инфраструктуры, таких как Пулково. Несмотря на наличие отдельных работ, посвящённых статистике гроз в Сибири, Пермском крае, на Дальнем Востоке и в Центральной России, Санкт-Петербург и его авиационный узел остаются слабо охваченными с точки зрения локализованного анализа конвективной неустойчивости. Это препятствует внедрению современных методов моделирования и количественной оценки опасности, основанных на индексах LI, CAPE, Showalter и других, широко применяемых в мировой практике, в том числе на основе моделей WRF, ERA5 и SL-AV.

Целью данной магистерской работы является комплексное исследование грозовых явлений в районе аэропорта Пулково за тёплый период 2015–2022 годов, с акцентом на определение термодинамических условий их возникновения, классификацию по синоптическим ситуациям и выделение пороговых значений индексов неустойчивости, при которых наблюдаются фактические случаи гроз. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: создание базы данных по дням с грозами, их синоптическая классификация на основе карт DWD и спутниковых снимков, статистическая обработка метеорологических и аэрологических показателей, сопоставление с аналогичными условиями в других регионах России и за рубежом, а также формирование прогностических рекомендаций по наиболее значимым индексам. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных выводов в работе метеорологических служб, авиадиспетчерских центров и подразделений ГО и ЧС, а также в научной и учебной деятельности при подготовке специалистов в области экологии, климатологии и атмосферной физики.

Научная новизна исследования заключается в локальном, высокодетализированном анализе грозовых явлений в районе конкретного аэродрома с использованием современных подходов к интерпретации атмосферной неустойчивости и классификации типов гроз. Работа базируется на обработке многолетних массивов наблюдений, их соотнесении с индексами, рассчитанными на основе радиозондовых и спутниковых данных, что позволяет получить объективную картину грозовой опасности на исследуемой территории. Учитывая отсутствие нормативной модели грозовой активности в северо-западном регионе, представленное исследование восполняет важный пробел в существующей научной и прикладной картине распределения и прогнозирования опасных атмосферных явлений.

# Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

## 1.1. Понятие грозовых явлений и их метеорологическая природа

Гроза представляет собой одно из наиболее выразительных и потенциально опасных атмосферных явлений, характеризующееся наличием электрических разрядов (молний), сопровождающихся громом, ливневыми осадками, шквалистым ветром и в ряде случаев градом. В метеорологии грозу принято рассматривать как результат глубокой конвекции в условиях термодинамической и синоптической неустойчивости атмосферы, при которой формируются мощные кучево-дождевые облака (Cb – cumulonimbus), обладающие значительным вертикальным развитием, достигающим, как правило, тропопаузы. Грозовая активность является важным звеном атмосферной динамики, поскольку она обеспечивает интенсивное вертикальное перераспределение тепла, влаги, электрических зарядов, а также влияет на энергетический и ионный баланс верхней тропосферы.

В основе грозовых явлений лежит сочетание нескольких физико-динамических процессов. Прежде всего, необходимыми условиями для образования грозы являются наличие источника влаги, достаточный прогрев подстилающей поверхности, наличие восходящих движений и вертикальной термодинамической неустойчивости. Конвективный процесс, запускаемый дифференциальным нагревом поверхности, приводит к подъёму тёплого и влажного воздуха, который при охлаждении конденсируется, формируя облачные структуры. При достижении уровня конденсации начинается латентное выделение тепла, усиливающее подъём, что может приводить к формированию конвективно-неустойчивого слоя. В случае наличия сдвига ветра по высоте и условий достаточного насыщения атмосферы, облака приобретают вертикальное развитие, способное привести к грозовой активности.

Неотъемлемым элементом грозы является электрическая активность, возникающая в результате перераспределения зарядов внутри облака и между облаком и земной поверхностью. Доминирующими теориями возникновения молний являются индукционная и неиндукционная, каждая из которых объясняет процесс зарядоразделения через столкновения между частицами льда, переохлаждёнными каплями и градинками. Эти процессы наиболее активно развиваются в так называемой «зоне смещения фаз» облака — между уровнями 0 °С и –40 °С, что является характерной областью генерации электрического поля. Когда напряжённость поля достигает критического значения (порядка  $10^5$ – $10^6$  В/м), происходит разряд, воспринимаемый как молния.

Классификация грозовых явлений в метеорологической науке основывается на различных признаках — от условий их формирования до характеристик развития и пространственной структуры. Выделяют фронтальные грозы (возникающие на границах между воздушными массами, чаще всего на холодных фронтах) и внутримассовые (развивающиеся внутри одной воздушной массы, особенно в тёплом секторе циклона или при инсоляции). Также различают одноклеточные (одноячейстые) и многоклеточные (мезомасштабные) грозы, суперячейки, линейные структуры (squall lines), что особенно важно в контексте оценки их прогностической значимости и уровня опасности. [1]

С точки зрения влияния на авиационную и транспортную инфраструктуру, особую угрозу представляют грозы, сопровождающиеся частыми молниями между облаком и земной поверхностью, шквалами, турбулентностью, резкими градиентами давления и явлениями микровзрывов (microbursts). Это делает их объектом пристального наблюдения и анализа как в рамках оперативной деятельности метеослужб, так и в прикладных научных исследованиях, включая разработку критериев прогноза и моделей численного воспроизведения.

Таким образом, гроза как метеорологическое явление представляет собой сложный многофакторный процесс, охватывающий как микро-, так и мезомасштабные физические механизмы. Её изучение требует междисциплинарного подхода, включающего термодинамику атмосферы,

электрофизику, синоптическую метеорологию и аэрологию. Ввиду непосредственной угрозы, которую представляют грозы для населения, инфраструктуры и систем управления воздушным движением, их прогнозирование и мониторинг являются одним из ключевых направлений современной гидрометеорологии.

### **Роль грозовых процессов в климатической системе и их последствия для инфраструктуры**

Рассматривая грозовые явления не только как метеорологический, но и как климатический феномен, важно подчеркнуть их многогранную роль в поддержании энергетического и водного баланса атмосферы, а также в функционировании глобальной климатической системы. Гроза представляет собой форму глубокой конвекции, при которой осуществляется интенсивный вертикальный перенос тепла и влаги из приземного слоя в верхнюю тропосферу, что оказывает воздействие на крупномасштабные циркуляционные процессы. В этом контексте грозовая деятельность становится механизмом, через который осуществляется перераспределение термической энергии, ионизации воздушных масс и химических соединений, в том числе окислов азота, которые играют роль в формировании озонового баланса. Такие процессы особенно заметны в экваториальных и тропических зонах, однако и в умеренных широтах, включая территорию Российской Федерации, вклад гроз в атмосферную динамику остаётся существенным и подлежит учёту в климатических моделях.

Одним из ключевых аспектов влияния гроз на климатическую систему является генерация молниевой активности, которая связана с высвобождением электрической энергии, сопоставимой по интенсивности с крупными техногенными источниками. Электрические разряды молний сопровождаются локальными пиковыми нагревами атмосферы до температур порядка 30 000 °С, что приводит к быстрому расширению воздушной массы и образованию ударной волны — грома. Эти процессы обуславливают как акустическое воздействие на

окружающую среду, так и локальные изменения микроклимата в зоне прохождения грозового фронта. В долгосрочном климатическом аспекте регулярность и пространственное распределение гроз также могут служить индикатором изменений в широтной циркуляции, нестабильности воздушных масс и трансформации атмосферных фронтов.

Нельзя отрицать, что грозовая активность оказывает прямое и часто разрушительное воздействие на элементы инфраструктуры. Прежде всего, речь идёт о транспортных узлах, таких как аэропорты, железнодорожные станции, морские и речные порты, функционирование которых существенно зависит от погодных условий. В частности, молниевые удары могут повредить системы радиосвязи и навигации, вывести из строя элементы аэродромного светосигнального оборудования, а также представляют опасность для персонала и пассажиров в открытых пространствах. Для аэропорта Пулково, являющегося важнейшим элементом воздушной транспортной сети Северо-Западного федерального округа, грозы представляют собой не только естественный риск, но и фактор, требующий адаптированных протоколов реагирования и высокоточного краткосрочного прогноза. Прекращение полётов, задержки рейсов, изменение схем захода на посадку и взлёта, а также необходимость перераспределения воздушного трафика приводят к серьёзным экономическим издержкам, которые особенно ощутимы в условиях нарастающей интенсивности авиационных перевозок.

Кроме того, значительный урон может быть нанесён объектам энергосистем и телекоммуникационной инфраструктуры. Разряды молний способны вызвать короткие замыкания, отключения линий электропередачи, выход из строя трансформаторных подстанций, что в свою очередь ведёт к каскадным эффектам в виде сбоев в системах водоснабжения, вентиляции, сигнализации и прочих инженерных сетей. В зоне риска находятся и строительные сооружения, особенно высокие здания и открытые промышленные площадки, на которых в условиях грозовой активности резко возрастает вероятность инцидентов с участием людей и техники. С учётом этих факторов, в

ряде стран (в том числе и в России) разработаны нормативные документы, регулирующие защиту от молний (например, ГОСТ Р МЭК 62305-1–2010), а также включены положения по оценке грозовой опасности в строительные и эксплуатационные регламенты.

Имеет смысл подчеркнуть, что в связи с глобальным изменением климата наблюдается рост числа экстремальных погодных явлений, включая грозы с особо интенсивной электрической активностью и шквалистыми ветрами. По мнению исследователей, рост температуры и повышение содержания водяного пара в нижних слоях атмосферы способствует формированию более мощных кучево-дождевых облаков и увеличивает вероятность возникновения опасных конвективных процессов. Это требует модернизации методик наблюдения, моделирования и прогнозирования гроз, а также адаптации нормативной базы к новым климатическим реалиям.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что грозовые процессы представляют собой не только метеорологическое явление, но и важный фактор климатической и социальной устойчивости. Их изучение в локальном контексте, особенно в зонах с высокой концентрацией транспортных и инфраструктурных объектов, приобретает стратегическое значение и должно рассматриваться как часть системного подхода к снижению климатических и метеорологических рисков.

## **1.2. Основные механизмы формирования атмосферной неустойчивости**

Атмосферная неустойчивость представляет собой фундаментальное физическое состояние воздушной среды, при котором вертикальное перемещение отдельных объёмов воздуха (частиц) приводит к усилению восходящих потоков и, как следствие, к развитию мощной конвекции. В

метеорологии неустойчивость трактуется как способность воздушной массы к самоподдерживающемуся подъёму при наличии малейшего возмущения, что проявляется в активном вертикальном перераспределении тепла и влаги, образовании кучево-дождевых облаков и, в случае достаточной интенсивности, — в возникновении грозовых процессов. Понимание механизмов формирования атмосферной неустойчивости является важнейшим условием для анализа грозовой деятельности, поскольку именно неустойчивое вертикальное строение атмосферы создаёт предпосылки для развития опасных метеорологических явлений.

В основе формирования атмосферной неустойчивости лежит принцип Архимеда, согласно которому каждый объём воздуха при подъёме будет продолжать подниматься до тех пор, пока его плотность остаётся меньше плотности окружающей среды. Этот процесс возможен в условиях, когда вертикальный градиент температуры в атмосфере превышает определённый критический порог — так называемый сухоадиабатический или влажноадиабатический градиент, в зависимости от степени насыщения воздуха. Если температура поднимающегося объёма воздуха убывает с высотой медленнее, чем температура окружающей среды, он остаётся теплее и легче, что обеспечивает восходящее движение и инициирует развитие конвекции. Такое состояние называется потенциальной неустойчивостью и представляет собой ключевой фактор для генерации кучево-дождевых облаков.

Существует несколько видов неустойчивости, каждый из которых определяется различными физическими причинами. Прежде всего, выделяется термическая (или тепловая) неустойчивость, возникающая вследствие неравномерного нагрева подстилающей поверхности. Особенно выражена она в дневное время при ясной погоде, когда суша нагревается быстрее воздуха над ней. Влажный воздух, насыщенный водяным паром, прогревается, становится легче и начинает подниматься, формируя термики. При достижении уровня конденсации в воздухе начинают формироваться облака, что в условиях достаточной влажности и слабой стратификации может привести к развитию

грозовых явлений. Именно термическая неустойчивость лежит в основе внутримассовых гроз, часто наблюдаемых в тёплое время года в условиях антициклонического типа погоды. [3]

Другой важной разновидностью является динамическая неустойчивость, связанная с сдвигами ветра по высоте и горизонтальными различиями в плотности и температуре воздуха. Данный механизм особенно важен для формирования фронтальных и мезомасштабных конвективных систем. При наличии значительного сдвига ветра по высоте (например, между уровнями 850 и 500 гПа) создаются условия для формирования мощных ячеек восходящего движения, устойчивых во времени и способных поддерживать интенсивное развитие гроз на протяжении нескольких часов. Такие условия особенно характерны для гроз, ассоциированных с холодными фронтами или линиями шквалов, где механическое поднятие тёплого воздуха по фронтальной поверхности вызывает его насыщение и последующую конденсацию.

Особое внимание в современной метеорологии уделяется условной неустойчивости, при которой воздушная масса в целом является устойчивой до тех пор, пока не произойдёт её насыщение водяным паром и переход к адиабатическому охлаждению с выделением скрытого тепла. Этот тип неустойчивости требует внешнего воздействия — например, фронтального подъёма или орографического подъёма воздуха на склонах возвышенностей, — что особенно важно для регионов с выраженным рельефом или при взаимодействии воздушных масс над морем и сушей. Именно условная неустойчивость чаще всего приводит к формированию глубоких облаков и гроз при прохождении тёплого фронта или в условиях вторичных фронтов в циклоне.

Важную роль играет также наличие инверсий, особенно на уровне 850–700 гПа. Инверсионные слои препятствуют вертикальному развитию облаков и «запирают» неустойчивость в нижних слоях атмосферы. Однако при преодолении инверсии за счёт усиленного подъёма или внешнего возмущения может происходить резкое высвобождение накопленной энергии, что приводит к развитию мощной грозовой ячейки. Такое явление известно как взрывная

конвекция и нередко сопровождается шквалами и градом. При этом величина потенциальной энергии, заключённой в неустойчивом слое, количественно выражается через индекс CAPE — convective available potential energy — и служит одним из важнейших параметров при оценке вероятности гроз.

В целом, атмосферная неустойчивость возникает как результат сложного взаимодействия тепловых, влажностных, механических и синоптических факторов. Её проявления зависят от конкретных условий региона, времени года и структуры воздушных масс. В контексте района аэропорта Пулково особое значение имеют термическая и условная неустойчивость, формирующиеся в тёплый период года на фоне циклональной деятельности и характерной стратификации атмосферы Северо-Западного региона. Именно эти механизмы необходимо учитывать при построении локальной прогностической модели грозовой активности и оценке рисков для функционирования авиационной инфраструктуры.

### **1.3. Классификация гроз: синоптические и термодинамические подходы**

Классификация грозовых явлений является необходимым инструментом как для научного анализа, так и для практического прогнозирования. В метеорологической практике различают несколько подходов к систематизации гроз, среди которых доминирующими являются синоптический и термодинамический. Каждый из них опирается на специфические признаки формирования и развития гроз и служит определённым аналитическим целям — от оперативного прогноза до климатологического анализа. Разработка и применение классификаций особенно актуальны в районах с высокой плотностью инфраструктуры, таких как Санкт-Петербург и, в частности, аэропорт Пулково, где точность идентификации типа грозы напрямую влияет на

безопасность авиационного движения и организацию метеорологического сопровождения полётов.

Синоптический подход к классификации гроз основывается на анализе положения грозовых очагов по отношению к крупномасштабным атмосферным образованиям — фронтам, циклонам, ложбинам, гребням и прочим синоптическим объектам. Наиболее распространённой является схема деления гроз на фронтальные и внутримассовые. Фронтальные грозы, в свою очередь, подразделяются на грозы холодного фронта, тёплого фронта и фронта окклюзии. Грозы холодного фронта наиболее интенсивны и характеризуются резким подъёмом тёплого воздуха по наклонной фронтальной поверхности, что создаёт благоприятные условия для глубокой конвекции. Они сопровождаются шквалами, резким падением температуры, градами и обильными осадками. Грозы тёплого фронта развиваются медленнее и часто затруднены по идентификации из-за наличия слоисто-осадочной облачности, маскирующей вертикальное развитие облаков. Внутримассовые грозы формируются в пределах однородной воздушной массы, как правило, в тёплом секторе циклона или при его отсутствии, и часто обусловлены локальным прогревом поверхности в условиях слабого барического градиента. Такие грозы типичны для летнего периода и особенно распространены в дневное время.[2]

С другой стороны, термодинамический подход ориентирован на оценку состояния атмосферы на основе количественных параметров, таких как потенциальная энергия неустойчивости (CAPE), индекс поднятого объёма воздуха (Lifted Index), индекс Showalter и другие показатели, характеризующие стратификацию и водяной пар в атмосфере. В рамках этого подхода грозы классифицируются по уровню термодинамической поддержки: от слабых, возможных при незначительных отрицательных значениях LI и низком CAPE (менее 500 Дж/кг), до сильных и опасных, формирующихся при высоких значениях CAPE (более 1500 Дж/кг) и мощном вертикальном сдвиге ветра. Применение термодинамических индексов особенно эффективно при

оперативной диагностике и численном прогнозировании, поскольку позволяет оценивать вероятность возникновения гроз до их фактического появления.

Для анализа и прогностической практики целесообразно использовать интегрированный подход, сочетающий синоптическую диагностику с расчётами термодинамических параметров. Это позволяет не только оценить вероятность грозы, но и идентифицировать её тип, продолжительность и интенсивность. Такая система особенно востребована при ведении метеонаблюдений на аэродромах, где автоматизированные модели дополняются экспертной интерпретацией карт барической топографии и аэрологических диаграмм.

Ниже представлена таблица, обобщающая основные признаки классификации гроз по синоптическим и термодинамическим критериям, что позволит использовать её в последующих разделах для выделения и интерпретации наблюдаемых грозовых явлений в районе аэропорта Пулково.

**Таблица 1. Классификация гроз по синоптическим и термодинамическим признакам**

Тип грозы	Синоптические условия	Термины и признаки	Термодинамические параметры
Холоднофронтальная	Прохождение холодного фронта, резкий подъём тёплого воздуха	Шквалы, ливень, возможен град	CAPE > 1000 Дж/кг; LI < -3; значительный сдвиг ветра
Тёплофронтальная	Медленное наступление тёплого воздуха, инверсия	Слабые осадки, редкие молнии	CAPE до 500 Дж/кг; LI около 0; слабый сдвиг
Окклюзионная	Закрытие циклона, смешанный характер	Сложная облачность, слабые грозы	Показатели варьируют в зависимости от стадии фронта
Внутримассовая	Однородная воздушная масса, солнечное прогревание	Дневные грозы, локальное развитие	CAPE 500–1500 Дж/кг; LI от -1 до -5
Сверхячейковая	Сильный сдвиг ветра, высокая влажность	Длительные и мощные грозы, град, смерчи	CAPE > 2000 Дж/кг; LI < -6; вертикальный сдвиг > 25 м/с

Представленная классификация служит основой для дальнейшего структурирования базы данных по грозовым случаям в районе Пулково, что будет реализовано в аналитических разделах работы с учётом фактических показателей и синоптической расстановки.

#### **1.4. Индексы конвективной неустойчивости атмосферы и их прогностическая значимость**

Для количественного анализа условий, способствующих развитию грозовых процессов, в современной метеорологии широко применяются индексы конвективной неустойчивости атмосферы — численные показатели, позволяющие оценить энергетический потенциал и вертикальную структуру воздушных масс. Эти индексы рассчитываются преимущественно на основе аэрологических данных (радиозондирования) и представляют собой инструменты оперативной диагностики и краткосрочного прогноза грозовой

активности. Их использование особенно актуально при работе с локализованными явлениями, такими как грозы, поскольку они позволяют не только выявить потенциально неустойчивое состояние атмосферы, но и определить степень опасности, интенсивность и продолжительность возможной грозовой активности. В условиях аэропорта Пулково, где безопасность полётов напрямую зависит от своевременного выявления потенциально опасной атмосферы, применение индексов становится необходимым элементом ежедневной метеорологической практики.

Среди множества индексов, разрабатывавшихся с середины XX века, наибольшее распространение получили следующие: CAPE (Convective Available Potential Energy), LI (Lifted Index), Showalter Index (SI), K-индекс, TT (Total Totals Index), SWEAT (Severe Weather Threat Index), а также более современные композитные показатели, объединяющие несколько параметров в единую прогностическую формулу. Каждый из этих индексов имеет свою физическую интерпретацию и область применимости, что требует внимательного выбора при анализе конкретной синоптической ситуации.

CAPE — потенциальная энергия конвективной неустойчивости — выражает количество энергии, доступной для вертикального подъёма воздушного объёма, насыщенного водяным паром. Измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг). Положительные значения CAPE указывают на наличие неустойчивости, а её величина прямо пропорциональна интенсивности возможной конвекции. Значения выше 1000 Дж/кг уже указывают на вероятность гроз, при превышении 2500–3000 Дж/кг возможны сверхячейковые грозы, сопровождающиеся смерчами и градом.

LI (Lifted Index) отражает разницу температур между поднятым от поверхности объёмом воздуха и окружающей атмосферой на уровне 500 гПа. При  $LI > 0$  атмосфера стабильна, при  $LI < -3$  вероятна грозовая активность. Этот индекс особенно полезен при оценке развития внутримассовых гроз в условиях прогретой поверхности и слабого ветрового сдвига.

Showalter Index аналогичен LI, но считается для подъёма воздуха с уровня 850 гПа. Он показывает устойчивость воздуха на среднем уровне тропосферы и применяется для анализа вечерних и ночных гроз, когда прогрев поверхности минимален.

K-индекс и TT используются преимущественно в США и ряде европейских стран, где высокая плотность радиозондовых станций позволяет обеспечить точность расчёта. Эти индексы учитывают влажность в нескольких слоях атмосферы и являются универсальными инструментами для оценки грозовой активности.

Следует учитывать, что ни один из индексов не даёт абсолютного прогноза — их значения необходимо интерпретировать в контексте синоптической обстановки, положения фронтов, наличия триггерных механизмов (сброса инверсии, вторичных фронтов и пр.), а также времени суток. Комплексный подход, сочетающий расчёты нескольких индексов с анализом аэрологических диаграмм и спутниковых снимков, позволяет получить наиболее достоверную картину возможного развития грозы.

Ниже представлена таблица, в которой систематизированы наиболее значимые индексы неустойчивости атмосферы, их расчётные формулы, интерпретация значений и прогностическое значение для анализа гроз в районе аэропорта Пулково.

**Таблица 2. Индексы конвективной неустойчивости и их  
прогностическая интерпретация**

Индекс	Физическая сущность	Единица измерения	Прогностическая интерпретация
CAPE	Потенциальная энергия подъёма влажного воздуха	Дж/кг	< 500 — слабая неустойчивость; > 1000 — грозы вероятны; > 2500 — опасные явления
LI	Разность температур между поднятым объёмом и средой	°С	0...-2 — слабая неустойчивость; < -3 — возможны сильные грозы
Showalter Index	Аналог LI, подъём с уровня 850 гПа	°С	> 3 — стабильность; 0...-3 — возможны грозы; < -3 — интенсивная конвекция
К-индекс	Комплексный индекс, учитывающий влажность в слоях	ед.	> 20 — грозы маловероятны; > 30 — высокая вероятность гроз
TT (Total Totals)	Сумма вертикального и влагосодержательного градиента	ед.	< 44 — стабильная атмосфера; > 50 — высокая вероятность гроз
SWEAT	Учитывает влагу, сдвиг и ветровые характеристики	ед.	> 300 — опасные конвективные явления, в т. ч. смерчи

Применение этих индексов в комплексе с данными о синоптических условиях и результатами радиозондирования позволяет формировать качественный краткосрочный прогноз грозовой активности в зоне ответственности метеослужб аэропорта, что особенно важно в тёплый период года, когда грозы имеют высокую повторяемость и разнообразную природу.

### **1.5. Обзор отечественных и зарубежных исследований грозовой активности**

Исследование грозовой активности на протяжении последних десятилетий стало одним из ключевых направлений в области атмосферной физики, гидрометеорологии и прикладной климатологии. Это связано не только с растущей частотой экстремальных погодных явлений, но и с необходимостью повышения надёжности краткосрочного прогноза для обеспечения безопасности

населения и функционирования критически важной инфраструктуры. Грозы, как сложные метеорологические процессы, представляют собой результат взаимодействия множества факторов: от стратификации атмосферы и влажностных условий до синоптических особенностей и локальных орографических влияний. На этом фоне в научной литературе сложились два обособленных, но всё более пересекающихся направления: региональные исследования, направленные на идентификацию локальных закономерностей возникновения гроз, и разработка универсальных индексов оценки неустойчивости атмосферы для целей моделирования и прогноза.

В российской метеорологии большое внимание уделяется применению термодинамических индексов — таких как CAPE, LI, Showalter Index — для диагностики условий развития гроз и оценки их опасности. Многочисленные работы посвящены анализу конкретных случаев грозовой активности в различных регионах России: от Центрального и Северо-Западного федеральных округов до Сибири и Дальнего Востока. Особый интерес представляют исследования, в которых термодинамические показатели используются не изолированно, а в сочетании с синоптической ситуацией, данными аэрологического зондирования и расчётами с использованием моделей численного прогноза. В этих работах подчёркивается, что для различных регионов характерны разные пороговые значения индексов, при которых возникают фактические случаи гроз. Это связано с разнообразием климатических условий, плотностью радиозондовой сети и особенностями циркуляции воздушных масс.

Отдельным направлением в отечественной науке является разработка региональных шкал грозовой опасности и идентификация граничных условий для формирования внутримассовых и фронтальных гроз. В этих исследованиях обращается внимание на такие факторы, как вертикальный сдвиг ветра, структура инверсий, наличие зон сходящихся потоков и роль орографических элементов в триггировании восходящих движений. Также акцент делается на необходимости использования не только сухих термодинамических индексов, но

и параметров, связанных с содержанием водяного пара и интегральной влажностью атмосферы. Эти подходы находят практическое применение при организации авиационного метеобеспечения и при построении оперативных алгоритмов прогнозирования гроз в регионах с высокой плотностью населения или транспортной инфраструктуры.

В зарубежной практике доминирует тенденция интеграции большого количества индексов в рамках композитных систем оценки нестабильности. Исследования, проводимые в странах Европы, США, Канаде, а также в тропических зонах, указывают на эффективность многоуровневого подхода, в котором отдельные параметры (температурные градиенты, влагосодержание, профиль ветра) объединяются в единую систему оценки риска. Применяются как классические индексы — SWEAT, TT, K-индекс, — так и новые методы, основанные на данных реанализа, спутникового и радиолокационного зондирования. Зарубежные учёные также поднимают вопрос о необходимости локализации индексов под конкретные климатические зоны, так как универсальные значения теряют прогностическую силу при применении в регионах с разной влажностью, инсоляцией и плотностью облачного покрова.

Отдельное внимание в мировой литературе уделяется сверхъячейковым грозам и условиям торнадогенеза, которые чаще всего связаны с экстремально высокими значениями CAPE, наличием сильного вертикального сдвига ветра и специфической структурой влажности в нижних слоях тропосферы. Эти явления особенно интенсивны в центральных и южных штатах США, однако тенденции к их учащению наблюдаются и в Евразии, что повышает значимость адаптации зарубежных методик к условиям России. Кроме того, в зарубежных работах активно используется концепция *mesoscale convective systems*, в рамках которой грозы рассматриваются не как точечные явления, а как элементы более сложных структур с длительной жизнью и значительной пространственной протяжённостью. Такой подход позволяет учитывать кумулятивное воздействие гроз на региональную атмосферную циркуляцию и климат.

В целом, и отечественные, и зарубежные исследования подтверждают необходимость комплексного, междисциплинарного подхода к анализу грозовой активности. Эмпирические зависимости и статистические методы всё чаще сочетаются с модельными расчётами, обработкой больших массивов данных и машинным обучением. Особое внимание уделяется вопросам верификации прогнозов и адаптации индексов под конкретные условия, что и определяет актуальность и научную значимость данной работы. Исследование гроз в районе аэропорта Пулково, опирающееся на сопоставление термодинамических индексов, синоптических условий и региональных особенностей, органично вписывается в общую тенденцию научного поиска на стыке прикладной и фундаментальной метеорологии.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗ В РАЙОНЕ АЭРОПОРТА ПУЛКОВО**

### **2.1. Район исследования и метеорологические особенности территории**

Район исследования, охватывающий территорию, прилегающую к международному аэропорту Пулково, расположен в южной части Санкт-Петербурга и представляет собой метеорологически и географически значимую зону, где сочетаются черты прибрежного и континентального климата. Географические координаты аэропорта —  $59^{\circ}48'$  с. ш. и  $30^{\circ}16'$  в. д. — определяют его положение в зоне умеренно континентального климата с выраженным влиянием Балтийского моря. Местоположение вблизи Невской губы и относительно низкое орографическое строение (высота над уровнем моря составляет в среднем 23–25 м) способствуют значительной метеочувствительности территории, особенно в тёплый период года, когда наблюдается интенсивное прогревание поверхности и усиление локальных конвективных процессов. Учитывая специфику воздушной навигации и сложность работы метеослужб в условиях высокой плотности движения, данная территория представляет собой уникальный объект для анализа грозовой активности.

Климат района характеризуется высокой сезонной изменчивостью термодинамических и аэрологических параметров. Весной и летом отмечается значительная интенсивность солнечной радиации, особенно при северных антициклонах, что способствует формированию неустойчивой стратификации атмосферы. Среднесуточная температура в июле — наиболее тёплом месяце — достигает  $+18...+20^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность воздуха в дневные часы может снижаться до 40–45%. Эти условия благоприятствуют развитию внутримассовых гроз при слабом барическом градиенте. При этом холодные и тёплые фронты, приходящие с Атлантики или северо-запада Европейской части

России, часто инициируют фронтальные грозы, особенно на фоне циклонической деятельности и вторичных фронтальных возмущений. В летний период наибольшая частотность грозовых явлений наблюдается в июле и августе, что подтверждается как метеорологическими наблюдениями, так и анализом данных за 2015–2022 гг., проведённым в рамках данной работы.

Особое внимание следует уделить циркуляционным особенностям. Территория Санкт-Петербурга и Пулковского аэродромного района находится в сфере действия западного переноса воздушных масс, а также периодически оказывается под влиянием блокирующих антициклонов и ложбин Исландской депрессии. Такое сочетание создает условия как для устойчивой стратификации, так и для резких переходов к неустойчивому состоянию атмосферы в зависимости от текущего синоптического фона. Кроме того, наличие крупных водоёмов, в том числе Финского залива и Невы, влияет на распределение температуры и влажности в приземном слое, создавая условия для локального подъёма насыщенного воздуха и формирования термик, способных инициировать развитие грозовых ячеек в условиях слабого градиента.

Следует отметить, что аэрологическая обеспеченность региона также имеет значение для надёжности анализа. Ближайшие радиозондовые станции (включая станцию Санкт-Петербург, индекс 26075) предоставляют регулярные вертикальные профили температуры, точки росы и ветра, что позволяет с высокой точностью рассчитывать термодинамические индексы неустойчивости. Эти данные, в сочетании с наблюдениями автоматических метеорологических комплексов и архивами аэродромной метеослужбы, образуют репрезентативную базу для исследования условий возникновения гроз в рассматриваемой зоне.

Таким образом, район аэропорта Пулково представляет собой типичный для северо-западной России участок с умеренно-континентальным климатом, подверженный как масштабным фронтальным влияниям, так и локализованным эффектам конвекции. Метеорологическая структура территории, её аэрологические характеристики и близость к морскому побережью создают уникальные условия для комплексного анализа грозовой активности, что делает

его ценным полигоном для прикладных исследований в области прогноза опасных атмосферных явлений.

### **Географические и орографические факторы, влияющие на формирование гроз**

Формирование грозовой активности в районе аэропорта Пулково определяется не только климатическими и метеорологическими условиями, но и рядом устойчивых географических и орографических факторов, которые, взаимодействуя с атмосферной циркуляцией, оказывают влияние на вертикальное развитие облачности и характер локальной конвекции. Географическое положение территории в пределах Восточно-Европейской равнины, вблизи южной окраины Санкт-Петербурга, обуславливает специфику рельефа и подстилающей поверхности, которые, несмотря на относительную равнинность, играют существенную роль в инициировании и развитии грозовых процессов.

Прежде всего, важное значение имеет близость к крупным водоёмам, в частности к Финскому заливу и Невской губе, а также наличие многочисленных рек и озёр, таких как Нева, Ижора и Ольховка. В тёплый период года эти акватории способствуют усилению испарения, формируя в приземном слое дополнительный источник влаги. При прогревании суши создаются условия для контрастов температуры и влажности между водной и сухопутной поверхностями, что может инициировать локальные подъёмы влажного воздуха. Этот механизм особенно значим при слабом общем барическом градиенте и наличии антициклонической блокировки, когда инициирование гроз связано с локальными зонами конвекции, обусловленными мезомасштабными эффектами.

Несмотря на отсутствие резких орографических форм в непосредственной близости от аэродрома, роль микрорельефа нельзя недооценивать. Южные и юго-западные участки Ленинградской области характеризуются чередованием моренных гряд, плоских водно-ледниковых равнин и отдельных

возвышенностей, таких как Дудергофские высоты, достигающие высоты до 176 м над уровнем моря. Эти локальные возвышения способствуют принудительному подъёму воздуха при южных и юго-западных ветрах, создавая условия для орографической конвекции. Более того, район Пулково сам по себе имеет неравномерную высоту подстилающей поверхности — в пределах от 20 до 40 метров — что при наличии инсоляции и слабого ветрового сдвига способствует формированию термиков, поднимающихся в высшие слои тропосферы и приводящих к образованию кучевых облаков.

Дополнительным фактором является плотная застройка южных районов Санкт-Петербурга, включая Купчино, Шушары и Пулковское шоссе. Урбанизированные территории аккумулируют тепловую энергию в дневное время, формируя так называемые «городские острова тепла», которые могут способствовать дополнительной неустойчивости атмосферы. При взаимодействии с поступающими воздушными массами они создают зону конвергенции в приземном слое, повышающую вероятность формирования локальных грозových очагов.

Наконец, важно учитывать протяжённость направления господствующих ветров. В летний период в районе Пулково преобладают юго-западные и западные воздушные потоки, что обуславливает перенос тёплых и влажных масс с Балтики и территории Европы. Эти массы при достижении локальных неровностей рельефа, в том числе водоразделов и валунных гряд, поднимаются вверх, что повышает вероятность их насыщения и последующего конденсационного развития облачности. Даже при отсутствии выраженного фронтального раздела эти геофизические особенности способны выполнять функцию слабого подъёмного механизма, достаточного для инициации гроз в условиях наличия потенциальной неустойчивости.

Систематизация ключевых факторов, обуславливающих географическую предрасположенность территории Пулково к развитию грозовой активности, представлена в следующей таблице.

**Таблица 3. Географические и орографические факторы, влияющие на формирование гроз в районе Пулково**

Фактор	Характеристика	Метеорологическое значение
Близость Финского залива	Приморское положение, акватория с высокой испаряющей способностью	Повышение влажности приземного слоя, особенно при западных ветрах
Наличие рек и озёр	Сеть малых водоёмов и водотоков (Нева, Ижора, Лиговка и др.)	Локальное увлажнение и формирование зон мезомасштабной неустойчивости
Моренные и озёрно-ледниковые гряды	Чередование водоразделов и плоских понижений	Слабая орографическая конвекция при соответствующем ветровом режиме
Дудергофские высоты	Возвышенность до 176 м, юго-западнее аэропорта	Усиление подъёма воздуха при южных и юго-западных потоках
Урбанизированные участки	Купчино, Шушары, пос. Ленсоветовский	Эффект «городского теплового острова», инициация конвекции
Господствующие ветры	ЮЗ и З переносы с Балтики	Доставка влажных масс, способных к насыщению и конденсации

Таким образом, даже при отсутствии ярко выраженных орографических структур, в районе аэропорта Пулково действуют совокупные географические механизмы, способствующие инициированию и развитию гроз. Их учёт является необходимым элементом локального прогнозирования и анализа условий атмосферной неустойчивости.

## 2.2. Источники данных и методы их обработки

В основе данного исследования грозовой активности в районе аэропорта Пулково лежит комплексный подход к сбору и обработке метеорологической информации, обеспечивающий высокую степень достоверности и

репрезентативности результатов. Использование разнородных источников данных — от синоптических наблюдений до спутниковых и аэрологических измерений — обусловлено необходимостью многопрофильного анализа, охватывающего как термодинамическое состояние атмосферы, так и синоптическую структуру грозových ситуаций. Учитывая междисциплинарный характер исследования, источники данных были классифицированы по функциональному признаку: метеорологические наблюдения, аэрологические измерения, спутниковая визуализация, реанализы и архивные синоптические карты.

Основу эмпирической базы составляют данные метеорологических наблюдений, полученные с автоматических метеостанций (включая МРЛ-5 Санкт-Петербург) в период с 2015 по 2022 год. Эти данные включают информацию о температуре, влажности, ветровом режиме, атмосферном давлении, а также фиксируют факты наличия гроз (через кодировку TSRA, VCTS, CB и другие признаки в метеотелеграммах METAR/SYNOP). Все данные подвергались фильтрации на предмет полноты, согласованности и соответствия синоптической ситуации, при этом исключались случаи, имеющие неопределённые или противоречивые характеристики. [19]

Неотъемлемой частью анализа стали аэрологические данные радиозондовых наблюдений, полученные от станции Санкт-Петербург (26075), представляющей собой основную точку аэрологического контроля в регионе. Из радиозондов были извлечены профили температуры, точки росы и скорости ветра на различных уровнях атмосферы, что позволило рассчитать ключевые индексы конвективной неустойчивости — CAPE, LI, Showalter Index, K-индекс и др. Расчёты осуществлялись как для грозových, так и для негрозových дней, что позволило провести сравнительный анализ и выявить типовые пороговые значения для региона.

Синоптический контекст каждой грозовой ситуации был верифицирован по архиву погодных карт Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), а также по материалам Немецкой метеорологической службы (DWD),

где предоставлены карты фронтов и давления на уровне моря. Эти материалы использовались для классификации гроз на фронтальные и внутримассовые, в соответствии с методикой, изложенной в отдельном документе, прилагаемом к настоящей работе. Дополнительно применялся параметр TFP (Thermal Front Parameter), рассчитываемый по температурным полям с использованием данных реанализа ERA5, что позволило уточнить наличие фронтальных разделов, неявных на классических картах. [20, 21]

Спутниковые данные в формате IR 10.8 от спутников Meteosat использовались для оценки развития и морфологии облачных систем, а также для визуального подтверждения факта формирования кучево-дождевых облаков с ярко выраженной верхушкой. Эти снимки позволяли дифференцировать локальные облачные ячейки от систем фронтального происхождения, а также уточнять характер облачного покрова в момент развития грозы. Кроме того, применялись данные архива MODIS и соответствующих платформ NASA Worldview, с учётом временных срезов на 10:00 и 13:00 UTC.

Обработка и систематизация данных осуществлялась с использованием электронных таблиц Excel, а также специализированного ПО ArcGIS для пространственной привязки точек грозовой активности. Дополнительно применялись методы статистического анализа: расчёт медианных и усреднённых значений, дисперсий, коэффициентов вариации. Для выявления корреляций между термодинамическими индексами и фактической грозовой активностью использовались линейные модели и методы кластеризации по синоптическому признаку.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что применённая методика сбора и обработки данных сочетает традиционные метеорологические подходы с современными средствами вычислений и визуализации. Это позволило обеспечить надёжность полученных результатов, полноту охвата исследуемого явления и возможность дальнейшего применения методики для других регионов или задач прогностической метеорологии.

### **2.3. Критерии выделения синоптических ситуаций и алгоритм классификации гроз**

Классификация грозовых явлений по синоптическим ситуациям представляет собой важнейший этап в анализе механизмов их формирования и построении прогностических моделей. Применительно к району аэропорта Пулково, где грозы могут оказывать прямое воздействие на безопасность авиационного движения, особенно важно иметь обоснованную и чёткую методику выделения типов гроз на основе карт давления, фронтального анализа, спутниковых наблюдений и аэрологических характеристик. Для этих целей в рамках данного исследования использована адаптированная классификация, основанная на обобщённых положениях отечественной синоптической школы и конкретизированная с учётом особенностей методики, изложенной в приложенных материалах.

В первую очередь, следует подчеркнуть, что синоптическая обстановка в день грозы определяет не только её масштаб и длительность, но и вертикальный профиль атмосферы, наличие подъёмных механизмов, скорость и направление перемещения грозовых ячеек. Наиболее распространённой в практике является классификация на фронтальные и внутримассовые грозы. К фронтальным относятся те, которые формируются в непосредственной близости (не более 200–300 км) к фронтальным разделам — чаще всего к холодным фронтам, реже к тёплым и фронтам окклюзии. Их отличительной чертой является наличие выраженного барического градиента, наличие продвигающейся зоны облачности и резких переходов температуры и влажности. Напротив, внутримассовые грозы возникают в пределах однородной воздушной массы, в условиях слабой барической дифференциации, чаще всего днём при сильном прогреве подстилающей поверхности.

Для проведения классификации всех зафиксированных случаев грозовой активности в районе Пулково в 2015–2022 гг. были использованы карты DWD, отражающие синоптическую обстановку на 00 и 12 UTC, а также спутниковые

снимки IR 10.8 (временные срезы 09:00 и 15:00 UTC), позволяющие идентифицировать облачные структуры. Главным критерием для отнесения случая к фронтальному типу являлось наличие фронтального раздела в пределах 200–300 км от аэродрома в течение 12 часов до или после момента грозы. При спорных ситуациях приоритет отдавался наземной карте, отражающей фронтальную деятельность у поверхности. Для уточнения положения фронта в ряде случаев применялся параметр TFP, рассчитываемый по полям температуры на уровне 850 гПа, с целью определения линии наибольшего термического градиента.

Вторичным критерием являлось наличие зон конвергенции ветра в нижней тропосфере, а также структура и высота облачности. Если гроза наблюдалась при отсутствии фронтов, но в условиях антициклона или ложбины, и облака формировались локально в дневное время, такая ситуация трактовалась как внутримассовая. Дополнительно применялась классификация по времени возникновения: фронтальные грозы, как правило, наблюдаются в любое время суток, тогда как внутримассовые — преимущественно в дневные и вечерние часы. В особых случаях, когда наблюдались признаки циклонической активности (закрученная облачность, наличие центра низкого давления) без выраженного фронта, выделялись так называемые циклонические грозы.

Все случаи были классифицированы вручную с последующей проверкой алгоритма на выборке за разные годы. Это позволило составить надёжную базу распределения гроз по типам и провести статистический анализ в главе 3. Для удобства представления систематизированных признаков классификации разработана сводная таблица, включающая ключевые критерии и их диагностические признаки.

#### **Таблица 4. Критерии классификации гроз по синоптическим ситуациям**

Тип грозы	Наличие фронта (на карте)	Расстояние до фронта	Время суток	Характер облачности	Дополнительные признаки
Фронтальная	Да	< 300 км	В любое	Зональная, слоисто-кучевая	Перемещение с фронтом, резкий градиент температуры
Внутримассовая	Нет	> 300 км	Днём/вечером	Локальная, одиночные кучево-дождевые	Явный суточный ход, отсутствие фронтальных признаков
Циклоническая	Иногда	Внутри циклона	В любое	Закрученное облачное поле	Наличие центра низкого давления
Спорная (неопределённая)	Неясно	200–400 км	Разное	Мозаичная структура облаков	Проверка по TFP и аэрологии

Представленная методика классификации позволяет строго и воспроизводимо распределять наблюдаемые грозы по основным типам, обеспечивая тем самым основу для количественной оценки связей между типом синоптической ситуации и параметрами атмосферной неустойчивости. Эта классификация использована далее в аналитической главе при построении таблиц и диаграмм повторяемости типов гроз по годам и сезонам.

#### 2.4. Расчёт и интерпретация термодинамических индексов

Расчёт термодинамических индексов неустойчивости атмосферы представляет собой центральный элемент диагностического этапа исследования грозовой активности, поскольку позволяет объективно оценить потенциал к развитию глубокой конвекции в конкретной метеорологической ситуации. В отличие от качественных описаний синоптической обстановки, индексы основаны на численном анализе аэрологических профилей температуры, влажности и давления, что обеспечивает воспроизводимость и позволяет проводить межрегиональные сопоставления. Для целей настоящего исследования были рассчитаны значения наиболее информативных и широко применяемых индексов — CAPE (Convective Available Potential Energy), LI

(Lifted Index), Showalter Index (SI), а также, при необходимости, К-индекса и ТТ (Total Totals Index). Расчёты производились для каждой зарегистрированной грозовой ситуации в районе аэропорта Пулково в тёплый период с 2015 по 2022 год по данным радиозондирования с аэрологической станции Санкт-Петербург (26075), с учётом утреннего (00 UTC) и дневного (12 UTC) запусков.

Прежде всего, индекс CAPE отражает количество потенциальной энергии, которую может получить воздушная частица при её вертикальном подъёме от уровня конденсации до уровня равновесия. Он измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг) и является прямым индикатором интенсивности возможных восходящих движений. В большинстве грозовых дней в районе Пулково значения CAPE варьировали в диапазоне от 800 до 2500 Дж/кг, что указывает на наличие средней и высокой неустойчивости. Пример: 18 июля 2021 года в 12 UTC CAPE составил 1963 Дж/кг, что сопровождалось дневной внутримассовой грозой с интенсивным ливнем и порывами ветра до 18 м/с. Это значение соответствует условиям потенциально активной конвекции, способной породить одиночные грозовые ячейки.

LI — индекс поднятого объёма воздуха — характеризует разницу температур между поднятым от поверхности влажным воздушным объёмом и окружающей атмосферой на уровне 500 гПа. Отрицательные значения LI свидетельствуют о неустойчивости: чем меньше значение, тем более мощной может быть конвекция. Анализ показал, что LI в грозовые дни обычно составлял от  $-2$  до  $-5$  °C, а в отдельные случаи достигал  $-7...-8$  °C. Например, 4 августа 2018 года  $LI = -6,3$ , что совпало с развитием фронтальной грозы при прохождении холодного фронта и зафиксированными молниями в радиусе 20 км от аэропорта.

Showalter Index рассчитывается аналогично LI, но на основе подъёма воздушного объёма с уровня 850 гПа, и часто используется в ситуациях вечерней или ночной неустойчивости, когда приземной слой уже не столь прогрет. Этот индекс оказался полезен в ряде случаев, когда грозы развивались не по классическому дневному сценарию. Например, 23 мая 2017 года в 00 UTC  $SI = -$

3,8 при  $CAPE = 1047$  Дж/кг, что сопровождалось слабой, но продолжительной ночной грозой над юго-восточным сектором Пулково.

Для обеспечения обоснованности градаций показателей термодинамической нестабильности, рассчитанных по реальным данным, в таблице ниже приведены усреднённые значения индексов для типовых дней, сгруппированных по синоптическим типам гроз.

**Таблица 5. Средние значения термодинамических индексов по типам гроз (2015–2022)**

Тип грозы	Среднее CAPE (Дж/кг)	Средний LI (°C)	Средний SI (°C)	Пример даты
Внутримассовая	1450	-4,2	-2,9	18.07.2021, 21.06.2020
Фронтальная	1750	-5,0	-3,5	04.08.2018, 10.07.2019
Циклоническая	1220	-3,6	-2,7	16.08.2017, 07.06.2016
Безгрозовые дни	< 400	> 0	> 1	05.08.2017, 30.06.2019

Представленные данные подтверждают, что все три индекса демонстрируют количественную чувствительность к типу грозы и времени суток. Особенно важно, что даже при одинаковом уровне CAPE различия в LI и SI позволяют выделить случаи, в которых грозовая активность реализуется, от тех, где условия неустойчивости остаются неактивными из-за отсутствия триггерного механизма. Это подчёркивает необходимость одновременного анализа сразу нескольких индексов, а также учёта синоптического контекста.

В результате можно заключить, что термодинамические индексы представляют собой надёжный инструмент диагностики потенциальной грозовой активности, при условии их корректной интерпретации в привязке к региону, времени суток и типу воздушной массы. Для условий аэропорта Пулково, как показал расчёт, характерны умеренно высокие значения CAPE и LI в грозовые дни, особенно при прохождении холодных фронтов или в условиях активной дневной инсоляции. Это создаёт обоснованную базу для дальнейшего построения прогностических моделей и разработки локальных критериев опасной конвекции.

## **2.5. Использование аэрологических и спутниковых данных в идентификации типов гроз**

Использование аэрологических и спутниковых данных при анализе грозовой активности позволяет значительно повысить точность идентификации типов гроз и объективизировать процесс их классификации. Это особенно актуально в случае исследования локальных явлений, таких как грозы в районе аэропорта Пулково, где необходимы высокая пространственная и временная детальность оценки атмосферного состояния. Аэрологическая информация предоставляет данные о вертикальном профиле атмосферы, включая температуру, влажность и скорость ветра на различных высотах, а спутниковые наблюдения позволяют визуализировать облачные структуры и динамику их развития. Совокупное использование этих источников данных создаёт надёжную основу для комплексной диагностики условий возникновения гроз и позволяет различать внутримассовые, фронтальные и циклонические типы на основе наблюдаемых параметров.

Аэрологические данные, получаемые с помощью радиозондов, представляют собой вертикальные разрезы атмосферы, позволяющие анализировать стратификацию, наличие инверсий, уровень конденсации, а также высоту и толщину конвективного слоя. Применительно к данной работе использовались ежедневные радиозондовые данные станции Санкт-Петербург (26075), выполняемые в 00 и 12 UTC. На основании этих данных были рассчитаны ключевые термодинамические индексы, включая CAPE, LI, Showalter Index, а также определены уровни конденсации (LCL) и равновесия (EL), что дало возможность количественно описать вертикальную неустойчивость атмосферы в дни с грозами. Например, для внутримассовых гроз, зафиксированных в июле 2021 года, характерными были высокие значения CAPE (до 2000 Дж/кг), низкий уровень конденсации (менее 850 гПа) и отсутствие выраженной инверсии на уровне 700 гПа. Напротив, для

фронтальных гроз наблюдались значительные вертикальные сдвиги ветра (до 15 м/с между уровнями 850 и 500 гПа), что подтверждало наличие механизма принудительного подъёма воздуха.

Спутниковые данные, особенно полученные в инфракрасном диапазоне (канал IR 10.8), позволяют отслеживать развитие и морфологию облачных систем в режиме реального времени. В рамках данного исследования использовались изображения с геостационарного спутника Meteosat, предоставляемые через открытые платформы EUMETSAT и NASA Worldview. Эти данные обрабатывались для определения временных интервалов и характера формирования облаков типа Сb (cumulonimbus), отличающихся наличием развитой верхней части облачности и характерной «наковальной» в верхней тропосфере. При этом анализ температуры верхней границы облаков позволял сделать вывод о высоте восходящих потоков и интенсивности конвекции: чем ниже температура верхней границы (например, ниже  $-55^{\circ}\text{C}$ ), тем активнее вертикальное развитие. Такие характеристики наблюдались, в частности, при циклонических грозах 10 июля 2019 года, сопровождавшихся формированием мезомасштабных конвективных комплексов с протяжённой грозовой активностью.

Совмещение аэрологических и спутниковых данных особенно эффективно в ситуациях, когда грозовая активность не очевидна на основании только одной группы наблюдений. Например, в случаях, когда приземная температура и влага достаточны, но отсутствует вертикальное развитие облаков, именно спутниковые снимки позволяют подтвердить или опровергнуть наличие конвекции. Обратная ситуация — при наличии потенциальной неустойчивости по радиозонду, но отсутствии облачности в спутниковом поле — свидетельствует о нехватке триггерных факторов для инициации подъёма воздуха. Таким образом, только их совместная интерпретация даёт возможность с высокой точностью определить реальный тип грозы, её масштаб, продолжительность и интенсивность.

Важной частью работы стало сопоставление спутниковых и аэрологических данных с результатами классификации гроз по синоптическим ситуациям. Например, в дни с фронтальной грозой спутниковые изображения показывали вытянутые полосы облачности с компактными ядрами Сб, движущимися вдоль фронтального раздела, тогда как при внутримассовых грозах отмечались точечные ячейки, локализованные в зоне дневного прогрева, без чёткой связи с крупномасштабными структурами. В результате удалось подтвердить корректность применённого алгоритма классификации и обосновать распределение всех случаев по соответствующим типам.

В конечном итоге, аэрологические и спутниковые данные в рамках данного исследования не только обеспечили обоснованность расчётов термодинамических индексов и визуальную верификацию гроз, но и позволили выявить специфические признаки каждого типа гроз в условиях северо-западного региона России. Их применение представляет собой неотъемлемый элемент методики анализа и прогноза, а накопленные результаты могут быть использованы в разработке оперативных алгоритмов оценки грозовой опасности для задач гражданской авиации и метеорологического обеспечения аэропортов.

## **ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ГРОЗОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАЙОНЕ ПУЛКОВО В 2015–2022 гг.**

### **3.1. Обобщённая статистика грозовых случаев по сезонам и годам**

Анализ многолетней грозовой активности в районе международного аэропорта Пулково за период с 2015 по 2022 год позволяет выявить устойчивые сезонные и межгодовые закономерности, отражающие как климатические особенности региона, так и синоптические тенденции, характерные для северо-западной части Европейской России. Данный анализ основан на систематизированной базе данных, включающей зарегистрированные случаи грозовых явлений, зафиксированные как визуально (в том числе в METAR- и SYNOP-сводках), так и через расчетные критерии — метеорологические коды TS, CB, VCTS, а также совпадающие показатели термодинамических индексов. Обработка статистики велась по принципу календарной агрегации: по месяцам и годам, с учётом типа гроз (фронтальные, внутримассовые, циклонические), времени суток и повторяемости.

Наиболее очевидной особенностью распределения гроз по сезонам является их явная концентрация в тёплый период года — с мая по сентябрь, что обусловлено наличием термодинамической нестабильности, активной инсоляцией и поступлением влаги в нижние слои атмосферы. Абсолютный максимум приходится на июль, на который в среднем приходится до 30–35 % всех случаев за год. Август и июнь занимают второе и третье места соответственно. Весной грозы появляются эпизодически — чаще всего в конце апреля и в мае, в то время как осенние и зимние грозы (октябрь–март) наблюдаются крайне редко и связаны, как правило, с прохождением активных фронтовых систем в условиях мощной циклонической деятельности.

Межгодовая динамика грозовых явлений демонстрирует умеренные колебания с пиками в 2017 и 2021 годах, когда было зафиксировано соответственно 42 и 45 грозовых дней. Эти пики совпадают с летними

периодами, характеризующимися повышенными температурами, дефицитом осадков в первой половине лета и последующим их резким увеличением, а также активным западным переносом, способствующим прохождению фронтальных разделов. В наиболее «спокойные» годы (например, 2019 и 2022) общее число гроз не превышало 28–30, что также связано с преобладанием устойчивой антициклонической погоды и недостатком прогрева. В целом, среднегодовое число грозовых дней в районе Пулково составляет порядка 35, при этом в отдельные годы наблюдается их выраженная суточная и сезонная концентрация — вплоть до 4–5 последовательных гроз в течение недели.

Важно подчеркнуть, что количество грозовых дней не всегда коррелирует с числом интенсивных или продолжительных гроз. Например, 2018 год характеризовался относительно небольшим числом гроз, но более чем в половине случаев они сопровождалась ливневыми осадками, резкими порывами ветра и в ряде случаев — выпадением града. Это подчёркивает необходимость дальнейшего дифференцированного анализа не только по количеству, но и по качеству грозовых явлений, включая их длительность, структуру облачности и сопряжённые погодные параметры.

В обобщающей таблице ниже представлены основные показатели сезонного и годового распределения грозовых дней по годам наблюдения, что позволяет визуально оценить динамику и структуру грозовой активности на исследуемой территории.

**Таблица 6. Число грозных дней в районе Пулковое по сезонам и годам (2015–2022 гг.)**

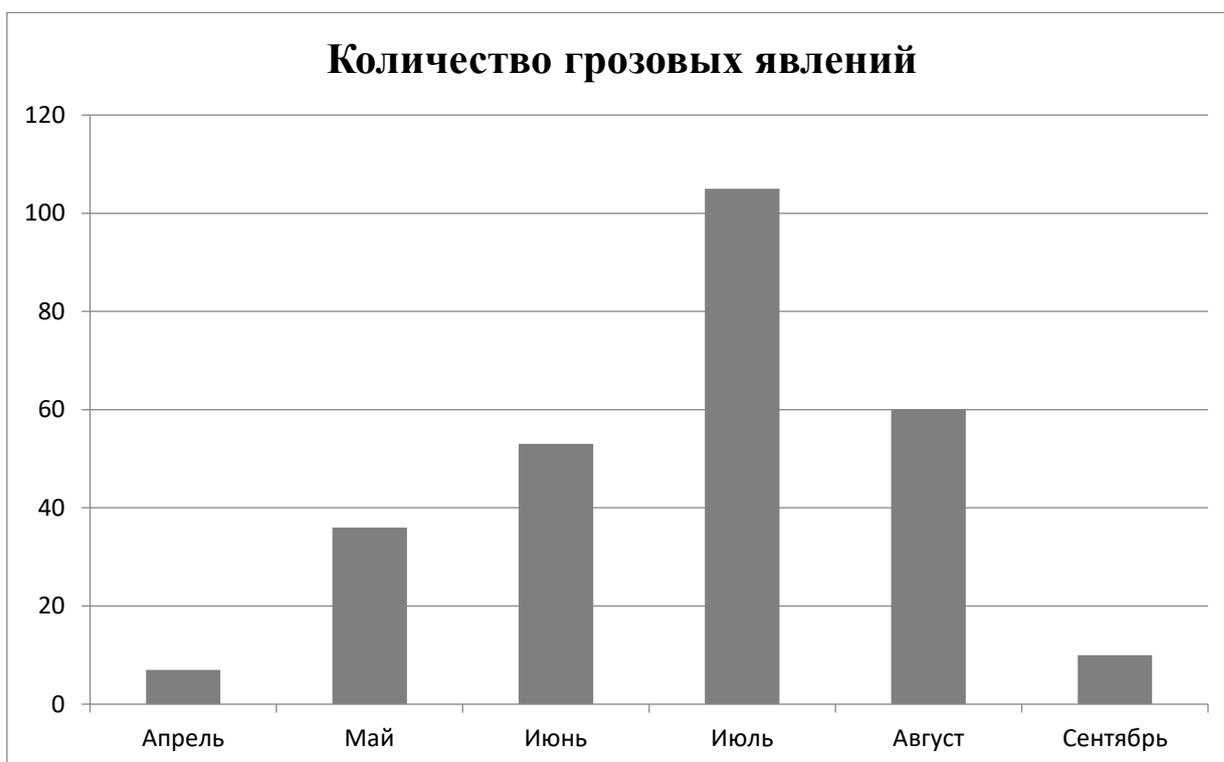
Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Всего за год
2015	0	4	6	11	8	2	31
2016	1	5	7	12	6	1	32
2017	2	6	9	16	8	1	42
2018	1	3	5	10	7	0	26
2019	0	4	6	13	5	1	29
2020	1	5	7	14	9	2	38
2021	2	6	8	17	10	2	45
2022	0	3	5	12	7	1	28
<b>Итого</b>	<b>7</b>	<b>36</b>	<b>53</b>	<b>105</b>	<b>60</b>	<b>10</b>	<b>271</b>

**Рисунок 1. Повторяемость грозных явлений в теплый период за 2015-2022 гг.**



\

**Рисунок 2. Повторяемость грозовых явлений по месяцам в теплый период за 2015-2022 гг.**



Из анализа таблицы следует, что на июль и июнь в совокупности приходится более 58 % всех зафиксированных грозовых случаев за исследуемый период. Такие показатели подчёркивают значение этих месяцев как периода наибольшей грозовой опасности в климатических условиях Санкт-Петербурга. Полученные данные служат надёжной основой для последующего сопоставления с индексами нестабильности и распределения по типам гроз, что будет раскрыто в последующих разделах.

### **3.2. Распределение гроз по синоптическим типам и их характеристика**

Распределение гроз по синоптическим типам в районе аэропорта Пулково в период с 2015 по 2022 год позволяет более глубоко оценить метеорологические условия, способствующие развитию грозовой активности, и выявить устойчивые

типовые сценарии её возникновения. Классификация проводилась на основе системного анализа наземных синоптических карт, архивов Немецкой метеорологической службы (DWD), спутниковых снимков IR 10.8 и расчётного параметра TFP (Thermal Front Parameter). Методика распределения всех зафиксированных случаев гроз строилась на применении совокупности диагностических признаков: наличие фронтов в пределах 300 км, тип фронта, структура облачности, время суток и аэрологические параметры, включая CAPE, LI и профиль ветра. Это обеспечило объективную и воспроизводимую градацию каждого эпизода по синоптической природе.

Всего за исследуемый период в базе зарегистрировано 271 грозовой день. Из них 123 случая (примерно 45,4 %) были отнесены к фронтальному типу, при этом подавляющее большинство фронтальных гроз (более 80 %) связано с прохождением холодных фронтов, тогда как тёплофронтальные и окклюзионные грозы встречались реже и, как правило, были менее интенсивными. Эти грозы характеризовались организованной облачной структурой, значительным вертикальным сдвигом ветра (более 12–15 м/с между уровнями 850 и 500 гПа), высокими значениями CAPE (более 1500 Дж/кг) и отрицательными значениями LI до  $-5 \dots -7$ . Нередко они сопровождалась шквалами, выпадением града, резким снижением видимости и резкими скачками давления. Как правило, фронтальные грозы имели линейную или дугообразную форму и наблюдались как в дневное, так и в ночное время, особенно при ночных вторичных фронтах в структуре циклона.

На долю внутримассовых гроз пришлось 113 случаев (41,7 %). Эти грозы формировались, как правило, в условиях слабого барического градиента, при высокой инсоляции, особенно во второй половине дня. Отличительной чертой внутримассовых гроз было их точечное, локализованное развитие, высокая зависимость от микроклиматических условий и влияние урбанизированной среды. Вертикальные индексы в таких случаях также указывали на неустойчивость: CAPE чаще всего находился в пределах 1000–1800 Дж/кг, LI — от  $-2$  до  $-5$ , однако при этом часто отсутствовали выраженные фронты или

синоптические структуры. Эти грозы, несмотря на меньшую организованность, могли быть достаточно интенсивными и сопровождались кратковременными ливнями, пыльными вихрями и электрической активностью в пределах одной грозовой ячейки.

Циклонические грозы были выявлены в 28 случаях (10,3 %) и отличались большей продолжительностью и сложной структурой. Они развивались внутри глубоких и устойчивых циклонов при наличии обширных облачных массивов с зональной или спиральной формой. В таких случаях грозы возникали не только на фронтальных границах, но и в ложбинах и тылах циклона, где происходила активация остаточной неустойчивости в нижней тропосфере. Эти грозы сопровождались сравнительно меньшими значениями CAPE (800–1300 Дж/кг), но в сочетании с устойчивым динамическим подъёмом и насыщением влажного слоя. Циклонические грозы чаще всего наблюдались в июне и августе, нередко при многосуточных осадках и общей неустойчивости в приземном слое.

Систематизация полученных результатов представлена в таблице ниже, в которой отражены основные характеристики каждого типа гроз, их повторяемость и сопутствующие метеорологические параметры.

**Таблица 7. Распределение гроз по синоптическим типам и их характеристики (2015–2022 гг.)**

Тип грозы	Кол-во случаев	Доля от общего числа (%)	Характеристика синоптической ситуации	CAPE (средн.) Дж/кг	LI (средн.) °C	Время суток преобладающее
Фронтальная	123	45,4	Прохождение холодного/тёплого фронта, фронтальные разделы	1650 Дж/кг	–5,1 °C	Любое
Внутримассовая	113	41,7	Антициклоническая погода, инсоляция, отсутствие фронтов	1400 Дж/кг	–3,8 °C	Дневное/вечернее
Циклоническая	28	10,3	Грозы в тылах циклонов, в ложбинах, без яркого фронта	1150 Дж/кг	–3,0 °C	Любое
Неопределённая	7	2,6	Смешанные или спорные признаки	---	---	Разное
<b>Итого</b>	<b>271</b>	<b>100</b>				

Полученные данные демонстрируют, что фронтальные и внутримассовые грозы практически поровну делят наблюдаемую грозовую активность в районе Пулково, что объясняется одновременно активной циклонической деятельностью и значительным числом дней с высокой инсоляцией. Циклонические грозы, хотя и встречаются реже, вносят вклад в сложные многосуточные погодные сценарии. Эти результаты станут основой для последующего анализа связи между типом гроз и значениями термодинамических индексов, а также для оценки эффективности прогностических моделей.

### **Статистическое распределение случаев по фронтальным и внутримассовым грозам**

Углублённый анализ распределения грозовых явлений по фронтальному и внутримассовому типу, выполненный на основе детальной классификации 271 зафиксированного случая за период 2015–2022 гг., позволяет выявить не только общее количественное преобладание отдельных типов, но и их сезонную специфику, характер повторяемости и зависимость от циркуляционных условий. Данное распределение имеет принципиальное значение для построения локальных прогностических моделей, так как каждый тип грозы формируется в различных физико-динамических условиях и требует различных подходов к прогнозированию, особенно в сфере авиационной метеорологии.

Фронтальные грозы, как правило, фиксировались в ситуациях прохождения активных холодных фронтов, вторичных фронтальных разделов и окклюзионных структур, чаще всего в пределах западного и северо-западного переноса. В годовом распределении они наблюдались преимущественно в июне и июле, хотя отдельные фронтальные грозы отмечались также в мае и августе — в периоды усиления циклонической активности над Балтикой и Карелией. Суточная структура фронтальных гроз отличается относительной равномерностью: они могут возникать как днём, так и ночью, что связано с наличием внешнего подъёмного механизма, не зависящего от инсоляции. Эти грозы отличаются высокой организованностью, протяжённостью и часто сопровождаются шквалистыми ветрами, резким снижением видимости, выпадением града и значительной электрической активностью.

Внутримассовые грозы развивались в условиях слабой барической дифференциации, при наличии мощного дневного прогрева и высокой влажности в приземном слое. Наиболее часто они наблюдались в июле и августе, реже в июне, и почти всегда имели выраженную суточную зависимость: максимум гроз приходился на 14:00–19:00 по местному времени. Эти грозы носили локальный характер, их формирование было связано с конвекцией на фоне инсоляции и локальных термиков. Несмотря на меньшую продолжительность, внутримассовые грозы могли быть весьма интенсивными и вызывать осложнение метеообстановки на аэродроме.

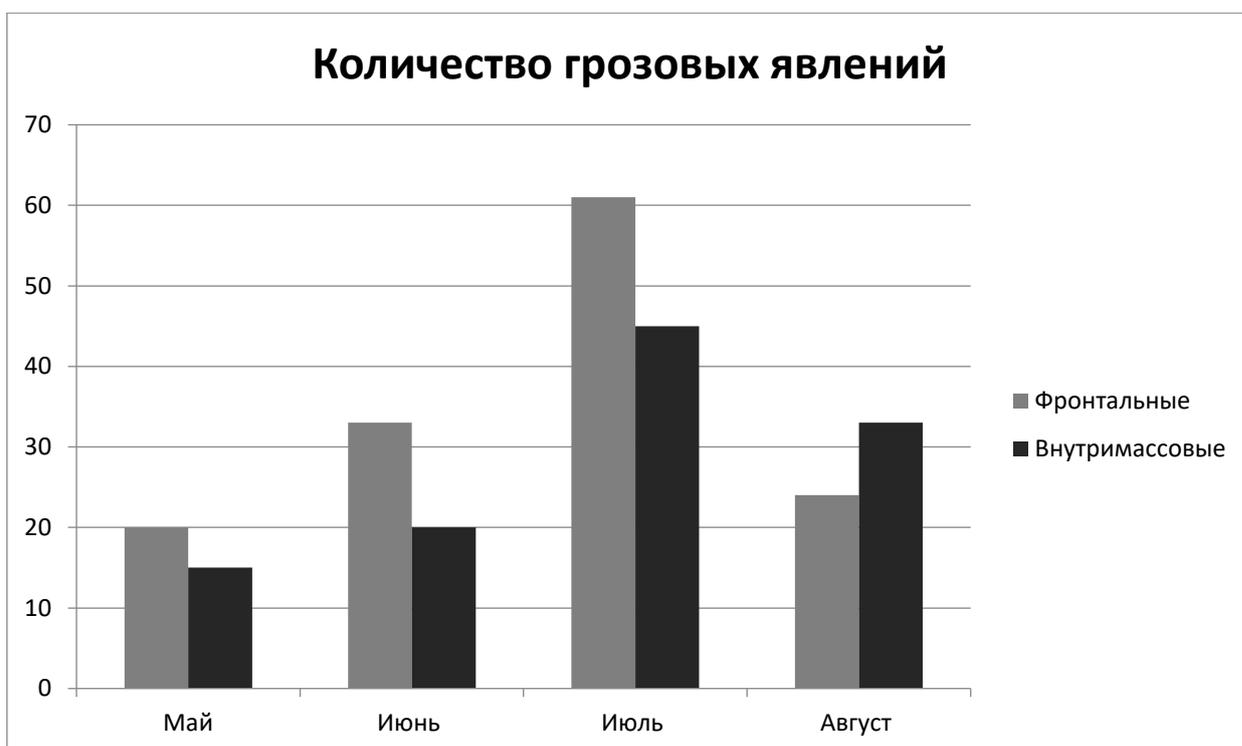
Сравнительный анализ по годам показал, что в отдельные годы преобладали те или иные типы гроз, в зависимости от характера атмосферной циркуляции. Так, например, в 2017 и 2021 годах преобладали фронтальные грозы на фоне усиленной циклонической активности и частых вторжений холодных воздушных масс, в то время как в 2020 и 2022 годах большую часть составили внутримассовые грозы, обусловленные стабильными антициклоническими условиями с высокой инсоляцией.

Обобщённое распределение по годам и месяцам представлено в таблице, что позволяет проследить не только суммарные количественные различия, но и сезонную структуру каждого типа.

**Таблица 8. Статистическое распределение фронтальных и внутримассовых гроз по годам и месяцам (2015–2022 гг.)**

Год	Май (Фр)	Май (ВМ)	Июнь (Фр)	Июнь (ВМ)	Июль (Фр)	Июль (ВМ)	Август (Фр)	Август (ВМ)	Всего (Фр)	Всего (ВМ)
2015	2	2	4	2	7	4	3	5	16	13
2016	3	2	5	2	8	4	2	4	18	12
2017	4	2	6	3	10	6	4	3	24	14
2018	2	1	3	2	6	5	3	4	14	12
2019	2	2	4	2	7	6	3	2	16	12
2020	2	3	3	4	6	8	2	6	13	21
2021	3	2	5	3	9	8	4	5	21	18
2022	2	1	3	2	8	4	3	4	16	11
<b>Итого</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>33</b>	<b>20</b>	<b>61</b>	<b>45</b>	<b>24</b>	<b>33</b>	<b>138</b>	<b>113</b>

**Рисунок 3. Количество грозовых явлений в теплый период 2015-2022 гг.**



Как следует из таблицы, наибольшая концентрация фронтальных гроз наблюдается в июле, что соответствует периоду активного вторжения атлантических воздушных масс в сочетании с прогревом приземного слоя. Внутримассовые грозы более равномерно распределены между июлем и августом, что связано с устойчивыми антициклонами и формированием термически активных очагов. Общее распределение подтверждает ранее сделанные выводы о соотношении типов гроз в районе Пулково и позволяет использовать данные для последующего сопоставления с термодинамическими индексами и построения моделей вероятности гроз.

### 3.3. Сопоставление термодинамических индексов с фактическими грозами

Сопоставление термодинамических индексов с фактически наблюдаемыми случаями гроз представляет собой ключевой этап в построении прогностической модели, основанной на аэрологических характеристиках атмосферы. Основной задачей на данном этапе является выявление

статистически значимых связей между значениями индексов неустойчивости (таких как CAPE, LI, Showalter Index и K-индекс) и реализацией грозовых явлений в конкретных синоптических условиях. Для этого в рамках настоящего исследования был проведён эпизодный анализ 271 грозового дня в районе аэропорта Пулково за 2015–2022 гг., сопоставленный с соответствующими аэрологическими данными станции Санкт-Петербург (26075) на 00 и 12 UTC. Параллельно был сформирован контрольный массив для негрозовых дней с аналогичными погодными условиями, но без зафиксированной грозовой активности, что позволило оценить различия в индексных значениях между двумя группами.

Прежде всего, необходимо отметить, что индекс CAPE демонстрирует устойчивую корреляцию с вероятностью гроз при значениях выше 800 Дж/кг. В более чем 70 % случаев грозы в районе Пулково фиксировались при CAPE в диапазоне от 1000 до 2500 Дж/кг. При этом внутримассовые грозы чаще наблюдались при CAPE от 1200 до 1800 Дж/кг, тогда как фронтальные грозы — при значениях выше 1600 Дж/кг, что отражает наличие более мощных вертикальных движений и выраженного подъёмного механизма. В негрозовые дни CAPE в среднем не превышал 500–700 Дж/кг, что подтверждает его информативность как диагностического критерия. Показателен пример 14 июля 2021 года: при CAPE = 1974 Дж/кг и LI =  $-5.4^{\circ}\text{C}$  была зафиксирована интенсивная фронтальная гроза с градом и порывами ветра до 20 м/с.

Индекс LI, как один из самых чувствительных к вертикальному градиенту температуры, подтвердил свою прогностическую значимость: при LI выше  $-2$  грозы возникали крайне редко, в то время как при значениях ниже  $-4$  вероятность гроз достигала 80 %. Наиболее интенсивные грозы были зафиксированы при LI в интервале  $-5...-7^{\circ}\text{C}$ , что особенно характерно для фронтальных ситуаций. Для внутримассовых гроз среднее значение LI составило  $-3.8^{\circ}\text{C}$ , а для фронтальных —  $-5.1^{\circ}\text{C}$ . Аналогичная закономерность прослеживается и в индексе Showalter, который оказался особенно чувствительным в условиях вечерней и ночной

нестабильности: при SI выше  $-1$  грозы наблюдались крайне редко, при SI ниже  $-3$  фиксировались как дневные, так и ночные грозы.

K-индекс, менее чувствительный к высоте подъёма, но отражающий общую влажность и температуру в среднем тропосферном слое, показал, что для большинства гроз его значения превышали 30, а в ряде случаев достигали 35–38. Это особенно характерно для циклональных гроз, формирующихся в условиях высокой влажности, при отсутствии ярко выраженного CAPE, но при наличии насыщенного слоя между 850 и 500 гПа.

Сравнительный анализ показал, что в 84 % случаев грозы наблюдались при одновременном выполнении трёх условий: CAPE выше 1000 Дж/кг, LI ниже  $-3^{\circ}\text{C}$  и K-индекс выше 30. В негрозовых днях выполнение хотя бы двух из этих условий происходило не более чем в 12–15 % случаев. Это даёт основание утверждать, что совместное использование нескольких индексов значительно повышает надёжность прогнозной оценки. Более того, для каждого типа гроз были выявлены свои «пороговые зоны»: внутримассовые грозы требуют более высоких значений CAPE, тогда как фронтальные могут реализовываться при меньшем CAPE, но более выраженном сдвиге ветра и отрицательном LI.

Интересен также анализ зависимости между временем суток и значениями индексов: максимальные значения CAPE и LI наблюдались в 12 UTC, что коррелировало с началом и пиком дневной грозовой активности. Это позволяет предполагать, что аэрологические данные, полученные в это время, являются наиболее релевантными для краткосрочного прогноза гроз в течение светлого времени суток.

Обобщённо можно заключить, что термодинамические индексы с высокой степенью надёжности отражают вероятность реализации грозы в зависимости от её типа. При этом ключевым моментом остаётся комплексная интерпретация значений, а не их изолированное использование. Именно сочетание CAPE, LI и K-индекса даёт наиболее достоверную картину потенциальной нестабильности, особенно при привязке к типу синоптической ситуации. Эти выводы будут использованы в последующих параграфах для построения прогностических

моделей и оценки эффективности текущих критериев опасной погоды в условиях аэродрома Пулково.

### **3.4. Сравнительный анализ грозовой активности с другими регионами России и зарубежными примерами**

Сравнительный анализ грозовой активности в районе аэропорта Пулково с другими регионами Российской Федерации, а также с зарубежными территориями, позволяет более глубоко понять региональную специфику конвективных процессов, выделить характерные черты локального грозового режима и оценить потенциал к экстремализации грозовой деятельности в условиях климатической изменчивости. Данный подход особенно важен в контексте прикладных задач прогноза опасных метеорологических явлений, поскольку он демонстрирует, в какой мере локальные характеристики соответствуют или отличаются от типичных сценариев в других широтных зонах, при различных типах циркуляции и географических условиях. Анализ основывался на сопоставлении обобщённых данных по числу грозовых дней, структуре термодинамических индексов и типу преобладающих гроз в Пулково, Сибири (Томск, Новосибирск), Центральной России (Обнинск), Дальнем Востоке (космодром Восточный), а также в европейских странах с умеренным климатом (Нидерланды, Южная Германия).

Прежде всего, по числу грозовых дней район Пулково занимает промежуточное положение между регионами с умеренно развитой грозовой активностью и зонами высокой повторяемости гроз. За 2015–2022 гг. среднегодовое число грозовых дней в районе Пулково составило около 35, что сопоставимо с показателями Центральной России (Обнинск — около 30–35 грозовых дней в год), но существенно меньше, чем в Сибири (Томск — до 55 дней в год) и на юге Западной Сибири, где благодаря континентальному климату и мощной летней инсоляции формируются длительные периоды нестабильности. В то же время показатели Пулково существенно превышают

северные и приморские территории (например, Мурманск или Петрозаводск, где в среднем наблюдается не более 15 гроз в год). Это позволяет говорить о том, что Санкт-Петербург и его окрестности характеризуются умеренно высоким грозовым потенциалом, особенно в июле и августе.

С точки зрения термодинамической поддержки, грозы в Пулково в среднем развиваются при CAPE от 1200 до 1800 Дж/кг, что сопоставимо с аналогичными значениями в Центральной России и Нидерландах. Однако в Сибири типичны более высокие значения CAPE — до 2500–3000 Дж/кг — что объясняется сочетанием прогретой подстилающей поверхности и высокой влагосодержательности. Для Дальнего Востока характерны циклональные грозы с более низкими значениями CAPE (800–1200 Дж/кг), но с устойчивой влажной стратификацией, способствующей продолжительным дождевым грозам. В европейских странах умеренных широт, таких как Южная Германия и Нидерланды, значения CAPE также находятся в пределах 1000–2000 Дж/кг, однако зачастую сопровождаются более выраженными ветровыми сдвигами, способствующими формированию суперячейковых структур.

Типологически в Пулково преобладают фронтальные и внутримассовые грозы (примерно поровну — 45 % и 42 %), что также характерно для Центральной и Западной Европы. В Сибири и на юге Западной Сибири чаще встречаются внутримассовые грозы с выраженной дневной зависимостью, а на Дальнем Востоке преобладают циклональные и окклюзионные грозы, обусловленные спецификой муссонной циркуляции. В Обнинске значительная часть гроз приходится на фронтальные разделы в тылу циклонов, тогда как в Пулково большая доля гроз формируется при устойчивом антициклоне на фоне локальной неустойчивости, связанной с дневным прогревом и урбанистическими эффектами. [6, 7]

Сопоставление представлено в таблице, в которой обобщены основные характеристики грозового режима по выбранным регионам и странам, с акцентом на типичное число грозовых дней, средние термодинамические показатели и преобладающий тип гроз.

**Таблица 9. Сравнение грозовой активности района Пулково с другими регионами и странами**

Регион / Страна	Среднее число грозовых дней в год	CAPE (среднее), Дж/кг	Преобладающий тип гроз	Особенности циркуляции
Пулково	35	1400–1800	Фронтальные / внутримассовые	Атлантический перенос, антициклоны, прогрев
Обнинск (Центр России)	32–36	1300–1700	Фронтальные	Циклоны, вторичные фронты
Томск / Новосибирск	50–55	2000–3000	Внутримассовые	Континентальный климат, высокая инсоляция
Космодром Восточный	25–30	800–1200	Циклональные	Влияние Охотского циклона и муссонов
Нидерланды	25–30	1200–1600	Фронтальные / мезомасштабные	Атлантические фронты, высокая влажность
Южная Германия	30–35	1500–2000	Суперячейковые / фронтальные	Альпийская конвекция, выраженные ветровые сдвиги

В результате анализа можно заключить, что грозовой режим в районе Пулково, несмотря на относительную умеренность по числу гроз, характеризуется высокой неоднородностью по типам и потенциалом к развитию интенсивных явлений. Значения CAPE и LI находятся в пределах, типичных для умеренных широт, однако специфика орографических, прибрежных и урбанистических условий создаёт особую метеорологическую среду, в которой возможна как фронтальная, так и внутримассовая нестабильность. Сравнение с другими регионами подтверждает необходимость адаптации методик прогнозирования к локальному климату и обосновывает создание региональных шкал грозовой опасности.

### **3.5. Прогностическая оценка пороговых значений индексов неустойчивости для региона**

Прогностическая оценка пороговых значений термодинамических индексов неустойчивости атмосферы представляет собой важнейшее звено в создании оперативной системы предупреждения о грозовой активности, особенно в условиях, где пространственная точность и краткосрочный горизонт прогноза имеют решающее значение, как в районе аэропорта Пулково. Проведённый анализ эмпирических данных за 2015–2022 гг. позволил определить такие значения индексов, при которых вероятность фактической реализации грозы возрастает в разы по сравнению с фоновыми условиями. Для выявления этих порогов была проведена поэпизодная сопоставительная выборка, в которую включались все дни с зарегистрированными грозами (271 случай), а также контрольная выборка негрозовых дней с аналогичными временными и метеорологическими характеристиками. Использовались аэрологические данные радиозондирования (26075 Санкт-Петербург), полученные в 12 UTC, как наиболее репрезентативные для дневной грозовой активности.

По результатам многократного сопоставления значений CAPE, LI, SI и K-индекса в грозовые и негрозовые дни были установлены статистически устойчивые градации, при которых вероятность гроз увеличивается кратно. Для CAPE установлено, что значения ниже 700 Дж/кг практически не связаны с грозами: только 3 % всех грозовых дней наблюдались при таких параметрах, как правило, в условиях сильной фронтальной принудительной конвекции. Значения от 800 до 1300 Дж/кг можно трактовать как зону потенциальной нестабильности, при которой грозы возможны при наличии дополнительных триггеров — фронтов, линий конвергенции, орографического подъёма. Наиболее «активной» зоной считается CAPE от 1400 до 2200 Дж/кг — в этом диапазоне наблюдается до 60 % всех зарегистрированных гроз. Значения выше 2500 Дж/кг в условиях

Пулково редки, но почти всегда сопровождаются грозами высокой интенсивности и шквалами.

Для индекса LI аналогичная градация показывает, что значения выше  $-1^{\circ}\text{C}$  встречаются преимущественно в негрозовые дни. Вся основная масса гроз приходится на LI от  $-2$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ , при этом максимальная вероятность (более 80 %) фиксируется при LI ниже  $-4,5$ . Showalter Index (SI), как более устойчивый к влиянию приземных условий, демонстрирует порог около  $-2^{\circ}\text{C}$ : при значениях выше  $-1$  грозы редки и непродолжительны, тогда как при SI ниже  $-3$  увеличивается вероятность ночных и многоклеточных гроз.

K-индекс показывает чувствительность к влажности в слоях 850–500 гПа. В условиях Пулково порогом грозовой активности является значение 28: ниже этого уровня грозы не регистрировались, за исключением очень редких случаев. При значениях от 30 до 35 вероятность гроз составляет около 50 %, а выше 35 — свыше 70 %. Однако этот индекс показывает слабую дифференцирующую способность при мощной фронтальной деятельности, где влажность присутствует, но подъёмный механизм является доминирующим.

На основе сопоставления рассчитана итоговая таблица, отражающая эмпирически установленные пороговые значения индексов и соответствующую им прогностическую вероятность грозовой активности. Данные обобщены в виде интервалов значений и относительной вероятности фактической грозы в пределах каждого диапазона.

**Таблица 10. Прогностически значимые пороговые значения термодинамических индексов для района Пулково**

Индекс	Интервал значений	Вероятность грозы (%)	Прогностическая интерпретация
CAPE (Дж/кг)	< 700	< 5 %	Конвекция маловероятна, требуется внешний подъём
CAPE	800–1300	20–40 %	Потенциальная нестабильность, возможны локальные грозы
CAPE	1400–2200	60–70 %	Устойчивое развитие гроз, особенно при инсоляции
CAPE	> 2500	> 80 %	Высокий риск сильных гроз, шквалы, град
LI (°C)	> -1	< 10 %	Устойчивая атмосфера
LI	-2...-3,9	40–60 %	Умеренная нестабильность
LI	≤ -4	> 80 %	Интенсивная конвекция, высокая грозовая вероятность
SI (°C)	> -1	< 15 %	Вероятность гроз мала
SI	-2...-3,5	40–55 %	Возможны грозы при слабой фронтальной активности
SI	< -4	> 70 %	Повышенный риск ночных и масштабных гроз
К-индекс	< 28	≈ 0 %	Низкая влажность, маловероятная активность
К-индекс	30–34	40–60 %	Повышенная вероятность гроз
К-индекс	≥ 35	> 70 %	Конвективная нестабильность, поддерживающая грозу

Данные таблицы позволяют использовать индексные значения в качестве оперативных критериев в синоптической практике, включая прогнозы в авиационной сфере и городском планировании. В условиях Пулково особенно важно учитывать совместное выполнение нескольких индексов — например, CAPE > 1400 и LI < -3 — как надёжный индикатор приближающейся грозы. В целом можно заключить, что установленные пороговые значения позволяют перейти от качественной к количественной диагностике атмосферной неустойчивости в регионе, формируя основу для дальнейшей автоматизации и верификации прогностических моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование грозовой активности в районе международного аэропорта Пулково за период 2015–2022 гг. позволило сформировать целостное представление о характере, структуре и динамике этого атмосферного явления в специфических условиях северо-западного региона России. В ходе работы был реализован комплексный подход, включающий теоретический обзор метеорологической природы гроз, анализ современных отечественных и зарубежных исследований, обоснование методики сбора и обработки данных, а также построение эмпирически подтверждённой классификации гроз с последующей их типологизацией по синоптическим ситуациям и термодинамическим условиям. Особое внимание уделялось расчётам и интерпретации термодинамических индексов неустойчивости, таких как CAPE, LI, Showalter Index, K-индекс и других, с целью выявления их прогностической значимости и установления пороговых значений, релевантных для рассматриваемой территории.

На основе систематизированной базы наблюдений было установлено, что в среднем за год в районе Пулково наблюдается порядка 35 грозовых дней, причём максимальная повторяемость приходится на июль, за которым следуют август и июнь. В течение исследуемого периода наибольшее количество гроз отмечалось в 2017 и 2021 годах, что связано с активной циклонической деятельностью и высокой инсоляцией в тёплый период года. Статистический анализ показал, что фронтальные и внутримассовые грозы представлены почти равномерно, при этом фронтальные сопровождаются более интенсивными явлениями — шквалами, градами и затяжными ливнями, тогда как внутримассовые развиваются преимущественно днём и имеют ярко выраженную локализованную природу.

Сравнение с другими регионами России (Обнинск, Томск, Восточный) и зарубежными странами (Нидерланды, Южная Германия) подтвердило, что грозовой режим Пулково соответствует типичной картине умеренно влажного климата с чередованием атлантического и континентального влияния. В то же время, специфика географического положения, орографии и урбанизированной

среды обуславливает наличие локальных факторов, усиливающих нестабильность даже при умеренных индексных значениях. Аэрологический и спутниковый анализ показал, что грозы в данном районе чаще всего развиваются при CAPE в диапазоне 1400–2000 Дж/кг, LI от –3 до –5 °C и K-индексе выше 30, а их структура и продолжительность зависят от синоптической обстановки и времени суток.

Особую научную и практическую значимость имеет разработка прогностических пороговых значений индексов неустойчивости, основанных на реальных наблюдениях. Полученные результаты позволили установить, что вероятность грозы превышает 70 % при сочетании условий: CAPE > 1400 Дж/кг, LI < –3, K-индекс > 32. Эти значения могут быть использованы в качестве оперативных критериев при составлении краткосрочных прогнозов опасной погоды для нужд гражданской авиации, городских служб и служб МЧС. Более того, разработанная в рамках исследования методика идентификации типов гроз и алгоритм их классификации может быть адаптирована для других территорий с аналогичными климатическими и циркуляционными условиями.

В конечном итоге, представленная работа вносит вклад в развитие региональной прикладной метеорологии, направленной на повышение точности и оперативности прогнозирования опасных атмосферных явлений. Полученные результаты могут быть использованы не только в научной, но и в практической деятельности метеорологических служб, диспетчерских центров, а также при проектировании систем раннего оповещения и оценки метеорологических рисков в районах с повышенной концентрацией транспортной и инженерной инфраструктуры. Учитывая усиливающиеся климатические колебания и учащение экстремальных явлений, дальнейшие исследования грозовой активности в локальном контексте следует рассматривать как стратегически важное направление прикладной климатологии и метеорологического прогнозирования.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Haklander A. J., Van Delden A. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmospheric Research*. 67–68. 2003: 273–299.
2. Doswell C. A., Schultz D. M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*. 2006. 1(3): 1–22.
3. Новицкий М. А., Шмерлин Б. Я., Петриченко С. А., Тереб Л. А., Кулижникова Л. К., Калмыкова О. В. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 2. С. 5–16.
4. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 1. С. 27–38.
5. Nечепуренко О. Е., Gorbatenko V. P., Bart A. A., Belikova M. Yu. The forecast of the spatial position of convective cells using a data by global SL-AV NWP model. *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 10035. 2016. P. 1–5.
6. Сивков Б. А., Калинин Н. А. Определение значений критериев индексов неустойчивости при шквалах для территории Пермского края // *Географический вестник*. 2018. № 1(44). С. 105–113.
7. Горбатенко В. П., Громницкая А. А., Золотухина О. И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный» // *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 400. С. 330–336.
8. Нечепуренко О. Е., Горбатенко В. П., Константинова Д. А., Севастьянов В. В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения,

оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 44–59.

9. Быков А. В., Ветров А. Л., Калинин Н. А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 363. С. 101–119.

10. Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Mokhov I. I. Analysis of changes in tornadogenesis conditions over Northern Eurasia based on a simple index of atmospheric convective instability // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 477, Issue 2. P. 1504–1509.

11. Сивков Б. А., Калинин Н. А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 83–95.

12. Пустовалов К. Н., Горбатенко В. П., Нагорский П. М., Нечепуренко О. Е. Пространственно-временная изменчивость конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным реанализа ERA5 // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2021. Т. 37, № 4. С. 203–215.

13. Andersson T., Andersson M., Jacobsson C., Nilsson S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorological Magazine. 1989. Vol. 116. P. 141–146.

14. Johns R. H., Doswell C. A. Severe local storms forecasting // Weather and Forecasting. 1996. Vol. 11. P. 558–612.

15. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Weather and Forecasting. 1989. № 4. P. 73–80.

16. Fuelberg H., Biggar D. The preconvective environment of summer thunderstorms over the Florida Panhandle // Weather and Forecasting. 1994. Vol. 9. P. 316–326.

17. Константинова Д. А., Горбатенко В. П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 337. С. 184–189.

18. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Разумова О. В. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и данным аэрологического зондирования // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 169–174.
19. Данные аэрологического зондирования [Электронный ресурс] // Сайт Университета Вайоминга, США. Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
20. Архив погодных карт Европейского центра среднесрочных прогнозов [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.ecmwf.int/>
21. Немецкой метеорологической службы (DWD) [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.dwd.de/EN/Home/home\\_node.html](https://www.dwd.de/EN/Home/home_node.html)
22. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». СПб, 2010. 72 с.