



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

Кафедра МКОА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Термодинамические характеристики конвективных
явлений для аэропорта города Воронежа»

Исполнитель Рябенко Ксения Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Канухина Анна Юрьевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

Дробжева Яна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

« 04 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение.....	4
ГЛАВА I. Грозы и их прогнозирование.....	5
1.1 Виды гроз	6
1.2 Термодинамические условия формирования гроз.....	7
ГЛАВА II. Методы прогнозирования гроз	9
2.1 Индексы, характеризующие атмосферную неустойчивость	15
2.2 Kind или K — индекс неустойчивости.....	16
2.3 Li — Lifted index.....	17
2.4 TT — Total Totals индекс.....	19
2.5 CAPE индекс	22
ГЛАВА III . Физико-географическое и климатическое описание города Воронежа.....	24
3.1 Географическое положение города Воронежа.....	24
3.2 Климат города Воронеж	26
3.3 Физико-географическое положения аэропорта г.Воронежа (Чертовицкое)	27
ГЛАВА IV. Исходные данные и анализ данных.....	29
4.1 Грозовая деятельность в районе города Воронеж за летний период 2011- 2024г.	32
4.2 Статистические характеристики индексов неустойчивости.	37
Заключение	45
Список использованной литературы.....	47

Перечень сокращений

ВПП – Взлетно-посадочная полоса

ИВПП – Взлетно-посадочная полоса с искусственным покрытием

АМСГ - Авиационная метеорологическая станция гражданская

ВС – Воздушное судно

ИКАО – Международная организация гражданской авиации

ХФ – Холодный фронт

Zn - Циклон

Azn - Антициклон

Введение

В метеорологии из многочисленных мезометеорологических процессов наиболее заметную роль в атмосфере играет конвекция, которая часто сопровождается образованием кучевых и кучево-дождевых облаков. С помощью конвекции в теплое время года осуществляется часть тепло- и влагообмена между подстилающей поверхностью и свободной атмосферой. В кучево-дождевой облачности возникают осадки, с которыми связаны такие опасные, а зачастую и катастрофические явления, как грозы. Грозой называется атмосферное явление, возникающее при наличии интенсивной конвекции, которое сопровождается электрическими разрядами, молнией и громом.

Гроза возникает при наличии мощных кучево-дождевых облаков, из которых, как правило, выпадают ливневые осадки. При грозе также наблюдаются шквалы. Цель моей выпускной квалификационной работы заключается в анализе и оценке грозовой активности по термодинамическим характеристикам конвективных явлений для аэропорта города Воронеж в летний период с 2011 по 2024 год.

Чтобы достигнуть поставленной цели работы, были выполнены следующие задачи:

1. Подобрать и проанализировать научную литературу по конвективным явлениям, индексам конвекции и физико-климатическому описанию исследуемой территории.
2. Создать базу данных с конвективными явлениями для аэропорта города Воронеж в период с 2011 по 2024 год.
3. Систематизировать и проанализировать полученные данные по синоптическим картам.
4. Провести анализ выбранных индексов конвекции в указанные нами даты.
5. Определить пороговые значения индексов неустойчивости, при которых над Воронежем наблюдается /отсутствует грозовая деятельность.

6. Сравнить полученные для Воронежа значения с международными данными и, в результате, показать и обосновать необходимость расчетов пороговых значений индексов неустойчивости для конкретной локации.

ГЛАВА I. Грозы и их прогнозирование.

Как известно, конвективные процессы возникают из-за действия сил плавучести, механических сил на частицу, которые вызваны динамическими факторами атмосферы. Это создает два основных типа конвекции - свободную (термическую) и вынужденную [1].

В пограничном слое атмосферы в результате неравномерного прогрева подстилающей поверхности и вертикально-неустойчивой стратификации воздуха развивается термическая конвекция. При таких условиях нагретые воздушные массы начинают подниматься вверх: их температура понижается с высотой медленнее, чем температура окружающего воздуха, что делает их более теплыми и легкими относительно окружающей среды на более высоких уровнях. Для возникновения термической конвекции в ненасыщенном воздухе необходимо, чтобы вертикальный градиент температуры превышал сухоадиабатический, а в насыщенном — влажноадиабатический [2]. В процессе интенсивного вертикального движения воздуха внутри облаков и активного перемешивания водяных капель и ледяных кристаллов возникает процесс электризации.

Вынужденная конвекция преимущественно наблюдается вблизи атмосферных фронтов, а также на наветренных склонах возвышенностей и гор. В таких условиях подъем воздушных масс происходит благодаря упорядоченным вертикальными движениями. При достижении уровня конденсации подъем продолжается за счет выделения скрытой теплоты.

Конвективные облака, в которых развиваются сильные восходящие потоки, характеризуются сильной турбулентностью и образованием крупных кристаллов льда. Эти процессы приводят к возникновению интенсивных электрических

полей как внутри облака, так и в окружающем пространстве. При достижении критического уровня напряжения происходит разряд - молния. Эти явления также могут сопровождаться такими атмосферными явлениями, как сильные ливни, шквалы, град [3]. Но в данной работе мной будут рассматриваться исключительно грозовые явления.

1.1 Виды гроз

Грозы принято подразделять на внутримассовые и фронтальные.

Внутримассовые грозы являются локальными и кратковременными атмосферными явлениями, чаще всего возникающими в послеобеденное время – в интервале между 15 и 19 часами. Эти грозы имеют скорость перемещения от 5 до 25 км/час в направлении ведущего потока на высотах порядка 3-5 км. Внутримассовые грозы разделяют на три типа в зависимости от условий их возникновения: конвективные, адвективные и орографические.

К основным синоптическим условиям для развития гроз относят тыловую часть циклона, седловину, восточную периферию антициклона, слабо выраженные барические образования, заполняющиеся циклоны. Характерными признаками приближающейся грозовой деятельности являются наличие высококучевых облаков башенкообразной и хлопьевидной формы, высокой абсолютной влажности 12-15 г/м³, а также повышенной температуры воздуха, достигающей 20-25° в утренние часы.

Фронтальные грозы отличаются большей интенсивностью, значительной горизонтальной протяженностью и высокой активностью. На радиолокаторе они представлены в виде вытянутых засветок вдоль фронтальных границ. Поэтому обойти такие грозы затруднительно. Фронтальные грозы подразделяются на грозы холодного фронта, теплого фронта и фронтов окклюзии [5].

Грозовые явления, связанные с прохождением холодного фронта, формируются над его поверхностью. Такие грозы часто распространяются вдоль фронтальной линии и достигают ширины 50-70 км. Их средняя скорость перемещения может

достигать 30-40 км/ч, но в редких случаях она доходит до 100 км/ч. Максимальная интенсивность наблюдается во второй половине дня с последующим ослаблением в ночные часы.

Грозы, возникающие на теплом фронте, наблюдаются значительно реже. Они формируются при поступлении теплого и влажного воздуха вверх по фронтальной поверхности. Особенность гроз теплого фронта заключается в том, что их активность усиливается в ночное время и снижается в дневные часы. Это объясняется понижением температуры верхней границы облачности из-за прекращения прогрева подстилающей поверхности Солнцем, что, в свою очередь, увеличивает вертикальный температурный градиент и способствует возникновению кучево-дождевой облачности вместо слоисто-дождевой, характерной для грозовых процессов. Ночью верхняя граница облаков перестает «нагреваться» и начинает излучать тепло[5].

Грозы на фронтах окклюзии могут наблюдаться в любое время суток, однако наиболее часто они фиксируются во второй половине дня, преимущественно в зоне холодной окклюзии.

1.2 Термодинамические условия формирования гроз

Грозы формируются в результате сложных взаимодействий атмосферных процессов, и ключевые термодинамические условия для их возникновения включают следующие факторы. Первым назовем неустойчивость атмосферы. Это основное условие для формирования гроз. Когда температура воздуха на разных высотах различна, создаются условия для вертикальных движений. Тёплый, менее плотный воздух в нижних слоях стремится подняться вверх, а холодный воздух на высоте препятствует этому. Если такая неустойчивость достаточно сильная, она может привести к образованию конвективных облаков, включая грозовые [6].

Второй фактор это тёплый и влажный воздух у земной поверхности. Тёплый, влажный воздух обладает большей подъемной силой, потому что тёплый воздух

легче, а высокая влажность вызывает выделение скрытого тепла при конденсации водяного пара. Это тепло способствует развитию облаков.

Следующий фактор – это конденсация влаги. При подъеме влажного воздуха он охлаждается, водяной пар конденсируется, образуя облака. Во время конденсации выделяется скрытое тепло, которое нагревает воздух, увеличивая его подъёмную силу.

Следующий фактор – это линии фронтов или возмущения. Грозы часто возникают вблизи фронтов, например, холодных, где тёплый, влажный воздух встречается с более холодным и сухим. Это приводит к резкому подъёму воздуха и образованию мощных облаков и гроз [7].

Пятый фактор – это изменчивость ветра на разных уровнях. Разница в направлениях и скоростях ветра на различных уровнях атмосферы играет большую роль в развитии гроз. Это приводит к созданию циркуляций, которые могут усилить грозовую активность.

Следующий фактор – это термическая конвекция. Локальные термические различия, такие как нагрев поверхности земли или наличие горных хребтов, могут создавать вертикальные потоки воздуха, которые способствуют развитию конвекции и формированию облаков, что может привести к грозам.

Все эти условия действуют в комплексе, создавая термодинамическую неустойчивость атмосферы, которая необходима для возникновения грозовых явлений.

ГЛАВА II. Методы прогнозирования гроз

Прогноз гроз методом частиц.

Одним из простых и широко применяемым способом прогноза грозовой активности является метод частиц. Он основан на анализе температурно-ветрового зондирования атмосферы и построения аэрологических диаграмм. На диаграмме стоит кривая состояния, которая показывает, как отдельный объем воздуха (по-другому его называют частицей) при его подъеме будет изменять свою температуру. Если полученные расчеты и построения показывают, что уровень конвекции превышает уровень конденсации более чем на 4,5 км, то в данном районе возможно формирование грозовой активности.

Прогноз гроз по методу Н.В. Лебедевой.

Данный метод основан на расчетах параметров конвекции, полученных из данных об утреннем зондировании атмосферы, которые позволяют оценить вероятность возникновения конвективных явлений. К таким параметрам относятся:

1. Суммарный дефицит температуры точки росы на уровнях 850, 700 и 500 гПа ($\Sigma D^{\circ}\text{C}$). Этот параметр косвенно учитывает влияние вовлечения и характеризует возможность образования облачности в слое 850-500 гПа.
2. Дефицит температуры точки росы у земли или на верхней границе приземной инверсии и на момент максимального развития конвекции ($D,^{\circ}\text{C}$).
3. Толщина конвективно-неустойчивого слоя (КНС) – ($\Delta H_{\text{кнс}}, \text{гПа}$). Каждая частица этого слоя будет участвовать в конвекции до больших высот. Чем больше толщина КНС и выше уровень развития, тем выше вероятность возникновения гроз.
4. Уровень конденсации ($H_{\text{конд}}, \text{км}$). Уровень конденсации указывает среднее положение высоты нижней границы кучево-дождевой облачности. Определение уровня конденсации также производится по аэрологической диаграмме.

5. Уровень конвекции ($H_{конв}$, км). Уровень конвекции позволяет определить среднее положение вершин кучево-дождевых облаков. Чем выше этот уровень, тем более мощными должны быть облака.
6. Температура воздуха на уровне конвекции ($T_{конв}$, °C). Установлено, что чем ниже эта температура, тем более вероятны ливни и грозы.
7. Средняя величина отклонения температуры на кривой состояния (T') от температуры на кривой стратификации (T).
8. Средняя вертикальная мощность конвективных облаков ($\Delta H_{к.о}$, км). Эта величина определяется как разность высот уровня конвекции и уровня конденсации. Чем больше эта величина, тем более вероятно возникновение конвективных явлений и тем больше их интенсивность.

Н.В. Лебедева предлагает оценивать возможность возникновения конвективных явлений по результатам расчета указанных выше параметров конвекции. Данный метод позволяет достоверно оценить вероятность возникновения грозы – оправдываемость составляет 80% и их отсутствие – оправдываемость 89%. Основой метода Н.В. Лебедевой является метод частицы [5].

Метод Вайтинга

Данный метод применяется для оценки вероятности грозовой активности на определенной территории. Он основан на расчете параметра K по данным утреннего температурно-ветрового зондирования. Хотелось бы отметить, что такой метод прогнозирования гроз не по пункту, а по некоторой территории дает нам неплохие результаты [5]. Формула для расчета параметра K имеет следующий вид:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - D_{700} \quad (1),$$

где T_{850} – значение температуры на уровне AT_{850} ;

T_{500} – значение температуры на уровне AT_{500} ;

T_{d850} – значение температуры точки росы на уровне AT_{850} ;

D_{700} – значение дефицита температуры точки росы на уровне AT_{700} .

После расчета определяется вероятность гроз по прогнозируемой территории:

Таблица 1- Определение вероятности гроз по методу Вайтинга [5].

Значение параметра К	Прогноз гроз
$K < 20$	Не ожидаются
$20 < K < 25$	Изолированные грозы
$25 < K < 30$	Отдельные грозы
$K > 30$	Грозы повсеместно

Однако иногда в полученные расчеты значения параметра К могут быть внесены поправки на кривизну приземных изобар (Таблица 2), что позволит повысить точность оценки прогноза в сложной барической обстановки:

Таблица 2 - Поправка на кривизну приземных изобар [5].

R, км	<250	250-500	500-1000	>1000
Zn	2	1.4	1	0
Azn	-2	-1.4	-1	0

где Zn – величина поправки на кривизну изобар в циклоне;

Azn – величина поправки на кривизну изобар в антициклоне.

Для усовершенствования данного метода прогноза гроз было предложено использовать параметр А, который учитывает распределение влажности по высотам, для этого используют формулу (2):

$$A = T_{850} - T_{500} - (D_{850} + D_{700} + D_{600} + D_{500}) \quad (2),$$

где T₈₅₀ – значение температуры на уровне АТ₈₅₀;

T₅₀₀ – значение температуры на уровне АТ₅₀₀;

D₈₅₀ – значение дефицита температуры точки росы на уровне АТ₈₅₀;

D₇₀₀ - значение дефицита температуры точки росы на уровне АТ₇₀₀;

D_{600} - значение дефицита температуры точки росы на уровне АТ600;

D_{500} - значение дефицита температуры точки росы на уровне АТ500.

Если по полученным расчетам $A > 0$, то в прогнозе указывается гроза.

Метод Г. Д. Решетова

Перед началом расчетов Решетов предлагает провести предварительную оценку синоптической ситуации. Прогнозирование осуществляется, если пункт находится в зоне влияния активных фронтальных образований: быстро перемещающийся холодный фронт, малоподвижный фронт с волнами, фронт окклюзии, неглубокая барическая ложбина, а так же в пределах теплого сектора циклона или на периферии антициклона. Для оценки вероятности грозовой активности рассчитываются следующие параметры:

- высота вершин кучево-дождевой облачности (H_v);
- температура воздуха на их вершине (T_v);
- толщина облачного слоя, в котором наблюдаются отрицательные температуры (ΔH)[5].

Дальнейший прогноз осуществляется по графику, основанном на дискриминантном анализе. Для этого по вертикали откладывается величина ΔH , а по горизонтали величина T_v :

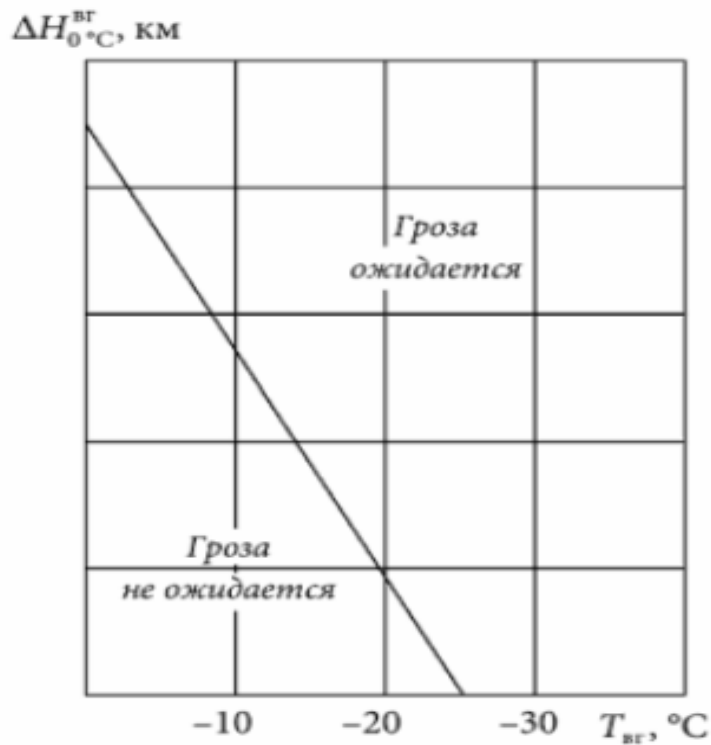


Рисунок 1 - График для прогноза гроз по методу Г.Д. Решетова [5].

Метод Фауста

Такой метод прогнозирования основывается на определении разности между температурой нулевого испарения и температурой на уровне 500 гПа:

$$\Delta T = T_v - T_{500} \quad (2),$$

где T_v – температура нулевого испарения,

T_{500} – температура на уровне 500 гПа.

В полученное значение ΔT вводят поправки на кривизну изобар и на их сходимость ($+1^\circ\text{C}$) или расходимость (-1°C). По графику (рис. 1) определяется величина T_v , в котором оси являются температурой воздуха на уровне 850 гПа и средним дефицитом температуры точки росы на уровнях 850, 700 и 500 гПа

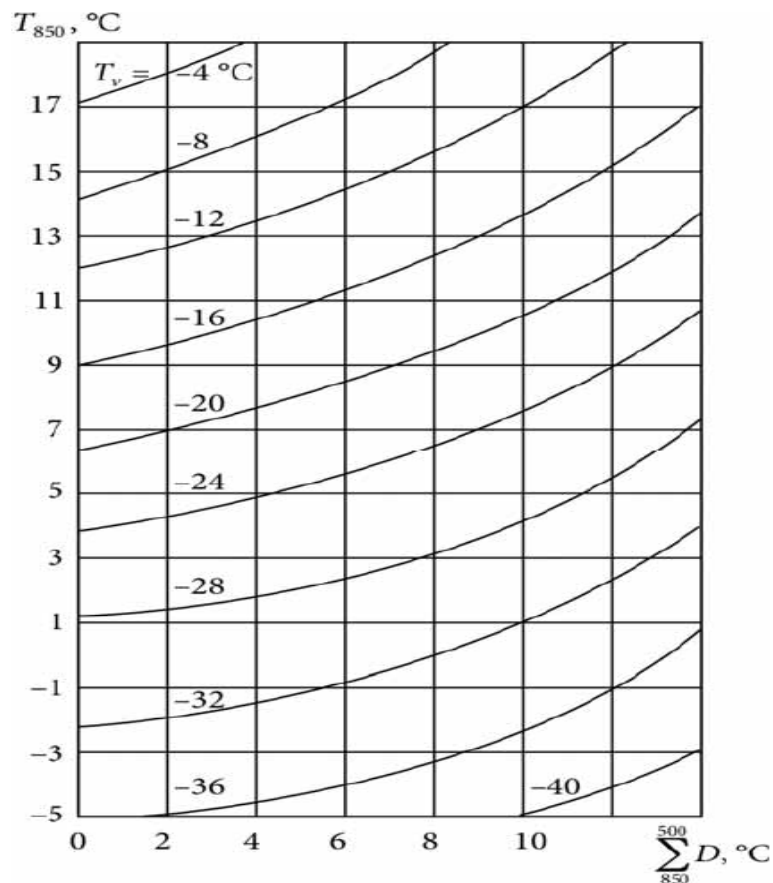


Рисунок 2 - График для определения температуры нулевого испарения[5]. Если $T_v > 0$, то грозы указываются. Оправдываемость гроз в европейской части России по методу Фауста составляет 82 %, а оправдываемость отсутствия – 91 %[5]. Поэтому данный метод достаточно эффективен и демонстрирует высокую достоверность при прогнозировании грозовой активности.

Метод И.А. Славина

Метод представляет собой неадиабатическую модель конвекции с учетом возникновения гроз. В процессе подъема насыщенного воздуха происходит его перемешивание с окружающим воздухом, что изменяет кривую состояния облачного воздуха – она смещается влево от влажной адиабаты и приближается к кривой стратификации.

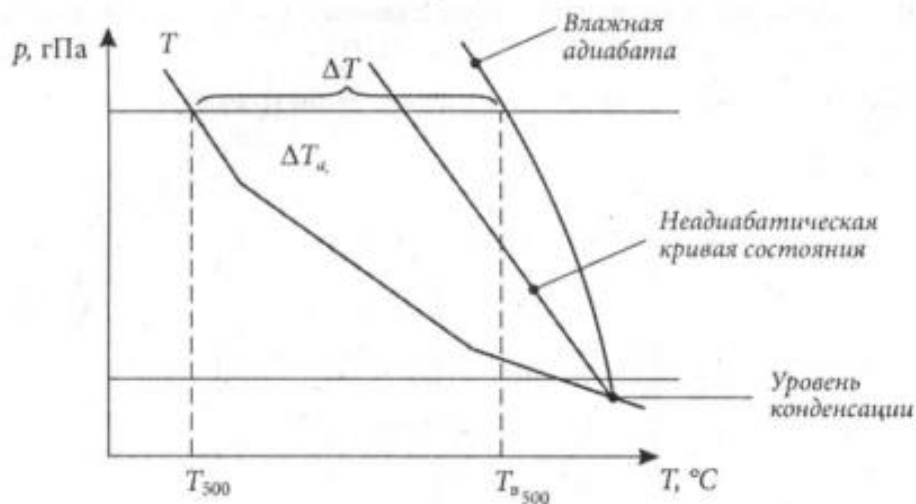


Рисунок 3 - График прогноза по методу И. А. Славина [5].

Согласно расчетам, если на уровне 500 гПа разность температур между облачным и окружающим воздухом превышает 0, то вероятность грозы существенно увеличивается [5].

Существует еще множество методов прогноза гроз, они носят региональный характер. Но АМСГ Воронеж использует метод прогнозирования гроз, разработанную Г.Д. Решетовым, Н.В. Лебедевой и Вайтингом.

2.1 Индексы, характеризующие атмосферную неустойчивость

Прогнозирование грозовой активности напрямую связано с анализом атмосферной неустойчивости. Согласно адиабатическим моделям конвективных процессов, формирование неустойчивости воздушных масс в конвективных облаках определяется разницей температур между облаками и окружающим воздухом, влажности, а также сдвигами ветра в области кучево-дождевой облачности. Для оценки атмосферной неустойчивости применяются различные индексов, рассчитанные в различных слоях тропосферы. Эти индексы неустойчивости широко используются для прогнозирования опасных конвективных явлений, в том числе и грозовой активности. Рассмотрим несколько наиболее широко распространенных индексов неустойчивости.

2.2 Kind или K — индекс неустойчивости

Ki оценивает потенциал к развитию конвекции и гроз. Расчет данного индекса основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере и учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. Для расчетов используется формула (3) :

$$K_i = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - \Delta T_{d700} \quad (3),$$

где Ki — индекс неустойчивости (число Вайтинга),

T850 — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

T500 — температура воздуха на 500 гПа,

Td850 — температура точки росы на 850 гПа,

ΔT_{d700} — дефицит точки росы (T-Td) на поверхности 700 гПа.

Вероятность грозы, рассчитанная по индексу Ki, предлагается определить по Таблице 3:

Таблица 3 - Вероятность грозы по индексу Ki [14].

K	Количественная оценка	Определение терминов покрытия
$K < 20$	Без гроз	-
$20 \leq K \leq 25$	Отдельные изолированные грозы	Не более 10% площади территории
$25 < K \leq 30$	Несколько гроз	Не более 10-20% площади территории
$30 < K \leq 35$	Рассеянные грозы	20-50% площади территории

$35 < K \leq 40$	Многочисленные грозы	50-70% площади территории
$K > 40$	Грозы повсеместно	Грозовые очаги занимают >70% территории

2.3 Li — Lifted index

Lifted index- следующий показатель устойчивости атмосферы. Характеризуется разностью температуры окружающего воздуха и температуры частицы, поднятой адиабатически до заданного уровня по вертикали, часто на практике – до уровня 500 гПа. Рассчитывается по формуле (4):

$$Li = T_p(500) - T_{500} \quad (4),$$

где $T_p(500)$ -температура частиц, поднятых адиабатически от поверхности до уровня 500 гПа, °С,

T_{500} - температура воздуха на уровне 500 гПа, °С

Если значения Li положительны, то атмосфера (в соответствующем слое) стабильна. Если значения Li отрицательные, атмосфера нестабильна согласно данным источника [14].

Таблица 4 - Интерпретация значения индекса Li [14].

Li	Количественная оценка
$Li \geq 6$	Глубокая инверсия. Атмосфера очень устойчива
$1 \leq Li \leq 5$	Устойчивое состояние атмосферы. Кучевая облачность хорошей погоды.
$0 \geq Li \geq -2$	Небольшая неустойчивость. Конвективная облачность с ливнями, при интенсивном дневном прогреве.
$-3 \geq Li \geq -5$	Умеренная неустойчивость. Сильные грозы.
$Li \leq -6$	Высокая неустойчивость. Очень сильные грозы.

2.4 TT — Total Totals индекс

TT используется для оценки мощности развития конвективной неустойчивости и представляет собой комбинацию индексов VT (Vertical Totals), - или разницу температуры воздуха на уровнях 850 гПа и 500 гПа, и CT (Cross Totals), - или разницу температур точки росы на уровне 850 гПа и температуры воздуха на 500 гПа. Рассчитывается по формуле (7):

$$TT = VT + CT (7),$$

где CT — Cross Totals индекс,

VT — Vertical Totals индекс

Количественная оценка индекса возможна с помощью таблицы 6 для зарубежных регионов:

Таблица 5 - Количественная оценка индекса TT [14].

TT	Количественная оценка
< 44	Грозовая деятельность не возможна.
44-45	Отдельная гроза или несколько гроз.
46-47	Рассеянные грозовые очаги.
48-49	Значительные количество гроз, отдельные из которых сильные.
50-51	Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.

52-55	Значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем.
>55	Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.

Так как данный индекс состоит из двух составляющих – Cross Totals и Vertical Totals, которые позволяют нам отдельно рассматривать влияние температуры и влажности на развитие конвективной неустойчивости, а как следствие гроз. Далее мы рассмотрим каждый из этих индексов более подробно.

VT — Vertical Totals индекс

Vertical Totals (VT) – это статическая устойчивость или вертикальный градиент температуры в слое 850-500 гПа

Данный индекс рассчитывается по формуле (5):

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (5),$$

где T_{850} — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, T_{500} — температура воздуха на 500 гПа.

Если $VT > 28$, следовательно тропосфера обладает высоким потенциалом конвективной неустойчивости, достаточным для образования гроз.[14]

СТ - Cross Totals индекс

Индекс рассчитывается по формуле (6):

$$СТ = Td850 - T500 \text{ (6),}$$

где $Td850$ — температура точки росы на 850 гПа,

$T500$ — температура воздуха на 500 гПа.

С помощью таблицы количественная оценка индекса СТ:

Таблица 6 - Количественная оценка индекса СТ [14].

СТ	Количественная оценка
< 18	Тропосфера обладает низким потенциалом конвективной неустойчивости, который недостаточен для грозовой деятельности.
18-19	Умеренная неустойчивость. Слабая грозовая деятельность
20-21	Высокая неустойчивость. Грозы
22-23	Энергия неустойчивости при которой возможны сильные грозы.
24-25	Высокая энергия неустойчивости. Сильные грозы.

> 25	Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
------	--

2.5 CAPE индекс

Convective available potential energy (доступная потенциальная энергия конвективной неустойчивости) - это количество энергии плавучести, доступная для ускорения частицы воздуха по вертикали или количество работы, которую совершает частица воздуха при подъёме. Данный индекс используется для прогнозирования грозовой деятельности и конвективных явлений. CAPE можно рассчитать по формуле (8):

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g * \left(\frac{T_{\text{частица}} * T_{\text{окр.возд}}}{T_{\text{окр.возд}}} \right) dz \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$),

z_f – высота свободной конвекции,

z_n – высота уровня выравнивания температур (нейтральная плавучесть),

$T_{\text{окр.возд.}}$ – виртуальная температура окружающей среды,

$T_{\text{частица}}$ – виртуальная температура определённой частицы воздуха.

Этот индекс можно так же определить по аэрологической диаграмме.

Положительная область между кривой состояния воздуха и линией влажной адиабаты от уровня свободной конвекции до уровня выравнивания температуры и есть доступная конвективная потенциальная энергия CAPE. В Таблице 7 приведены значения индекса CAPE и соответствующие им погодные условия для зарубежных регионов.

Таблица 7 - Значения индекса CAPE [14].

Значение (Дж/кг)	Состояние атмосферы и явления погоды
$CAPE < 0$	Устойчивое состояние, грозы невозможны
$0 < CAPE < 1000$	Слабая неустойчивость, возможны грозы
$1000 < CAPE < 2500$	Умеренная неустойчивость, сильные грозы и ливни
$2500 < CAPE < 3500$	Сильная неустойчивость, очень сильные грозы, шквалы
$CAPE > 3500$	Очень сильная неустойчивость, образуются суперячейки, торнадо

Мы рассмотрели наиболее широко распространенные в мире индексы для оценки конвективной неустойчивости атмосферы. С их помощью можно достаточно точно и быстро определить наличие или отсутствие метеорологического явления, оценить состояние атмосферы для более точного прогнозирования и анализа данных.

Хотелось бы также отметить, что критерии пороговых значений индексов конвективной неустойчивости исследуются для некоторых пунктов в России. В частности, исследования проводились для условий Западной Сибири, где особенности континентального климата требуют уточнения этих индексов [17]. Аналогичные исследования велись для космодрома «Восточный» с целью повышения точности прогнозов при запуске ракет, также расчет и анализ индексов неустойчивости осуществлялся для Обнинска и Пермского края [11,12,13].

Проведенные исследования для различных регионов России позволили разработать индивидуальные пороговые значения индексов конвективной неустойчивости для каждой из территорий. Полученные значения оказались ниже общепринятых, а значит опасные конвективные явления могут развиваться при менее выраженной неустойчивости атмосферы, что вновь подтверждает необходимость в исследовании пороговых значений индексов конвекции для каждого региона, особенно в климатически разнообразной стране, как Россия.

ГЛАВА III . Физико-географическое и климатическое описание города Воронежа.

3.1 Географическое положение города Воронежа

Первоначально следует оценить насколько физико-географические условия района аэропорта Воронеж благоприятны для образования конвективной и грозовой деятельности.

Город Воронеж находится на юге Центральной России, который является административным центром Воронежской области. Географические координаты Воронежа: 51°40'19" с.ш. и 39°11'03" в.д. Расположен на берегах Воронежского водохранилища, в 12 километрах от реки Дон [8].

Город Воронеж расположен на стыке Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности, занимая территорию Восточно-Европейской равнины в зоне умеренных широт, на переходе от степной к лесостепной природной зоне. Ближайшее к региону море – Азовское.

Рельеф территории Воронежа отличается высокой контрастностью, что обусловлено его положением в пределах активной тектонической зоны - Кривоборского прогиба, ширина которого достигает 30 км. Эта структура располагается вдоль границы Окско-Донской равнины и Среднерусской возвышенности. Также на этой территории наблюдается постепенное поднятие Среднерусской возвышенности и одновременное опускание Окско-Донской низменности

со средней скоростью 5,5 мм в год. Такое тектоническое движение провоцирует микросейсмические колебания земной поверхности, амплитуда которых в шесть раз превышает естественный фон. Существенное влияние на уровень микросейсмичности оказывает также антропогенный фактор, в частности, наличие Воронежского водохранилища и развитая городской инфраструктура.

Правобережье Воронежа расположено на холмистом плато с отметками высот от 100 до 160 м над уровнем моря. В отличие от него, левобережная часть характеризуется пониженным плоскоравнинным рельефом, плавно переходящим в речные террасы [8].

Воронеж располагается на правом и левом берегах реки Воронеж. Во время весеннего половодья реку Воронеж подпитывает река Дон. Воронежское водохранилище - самое крупное водохранилище в Центральном Черноземье. Площадь водного зеркала Воронежского водохранилища составляет 70 км². Его длина и ширина равны 35 км и 2 км. Средняя глубина водоема – 2,9 м, а общий объем - 240 млн. м³. Так же на территории Воронежа протекают такие реки, как Дон, Усманка, Песчанка; находятся озера Большое, Круглое, Карьерное и несколько малых озер [10].

Таким образом, физико-географические характеристики города Воронежа -климат, циркуляционные особенности атмосферы, рельеф, близость к водоемам-создают благоприятные условия для развития гроз, особенно в теплое время года.

3.2 Климат города Воронеж

Город Воронеж расположен в пределах умеренного климатического пояса, в умеренно-континентальном секторе. Зима морозная, с устойчивым снежным покровом. Часто бывают оттепели. Лето теплое, часто - дождливое. Воронежское водохранилище покрывается льдом в конце ноября - начале декабря. Весенний ледоход длится с марта по апрель. Осенний период года начинается с первых чисел сентября и заканчивается в первых числах ноября, средняя его продолжительность 61 день. В условиях климата Воронежа ранние заморозки, как правило, наблюдаются во второй половине сентября. Средние температурные значения в январе варьируются от -10 до -15 градусов С, а в июле достигают отметок +20...+25 градусов С. В целом, годовой ход температур отличается стабильностью и отсутствием резких колебаний. Весенний период может сопровождаться кратковременными похолоданиями, связанными с возвратом холодной воздушной массы [10].

Годовое распределение осадков относительно равномерное, однако в водном режиме реки Воронеж прослеживаются ярко выраженные сезонные колебания. Весной наблюдается максимум уровня воды – весеннее половодье, он вызван активным таянием снежного покрова. Летом фиксируется межень, во время которой уровень воды снижается, и некоторые малые притоки временно пересыхают. Осенью может происходить паводок, иногда достигающий критических отметок, но, как правило, без значительного разрушительного воздействия. Его возникновение связано с обильными дождевыми осадками.

Климат региона отличается преобладанием воздушных масс, поступающих преимущественно с западно-восточного направления. Также здесь преобладает западный перенос, при котором с Атлантики поступают циклоны, несущие большое количество влаги. Такие циркуляции смягчают зимы, делая их более теплыми. Периодически над территорией Воронежа фиксируются вторжения арктического воздуха зимой и тропических воздушных масс летом [8].

Альбедо (отражающая способность) поверхности значительно изменяется по сезонам года в связи с наличием в зимнее время снежного покрова и составляет зимой – 60 %, а летом – 20%.

3.3 Физико-географическое положения аэропорта г.Воронежа (Чертовицкое)

Международный аэропорт Воронеж имени Петра I – активно развивающийся авиационный комплекс, лидер по объему авиаперевозок в Центрально-Черноземном регионе. Он расположен в 18 км к северо-западу от центра города, в левобережной части района. Воронеж располагается на левом берегу Воронежского водохранилища, в зоне лесостепей Восточно-Европейской равнины.

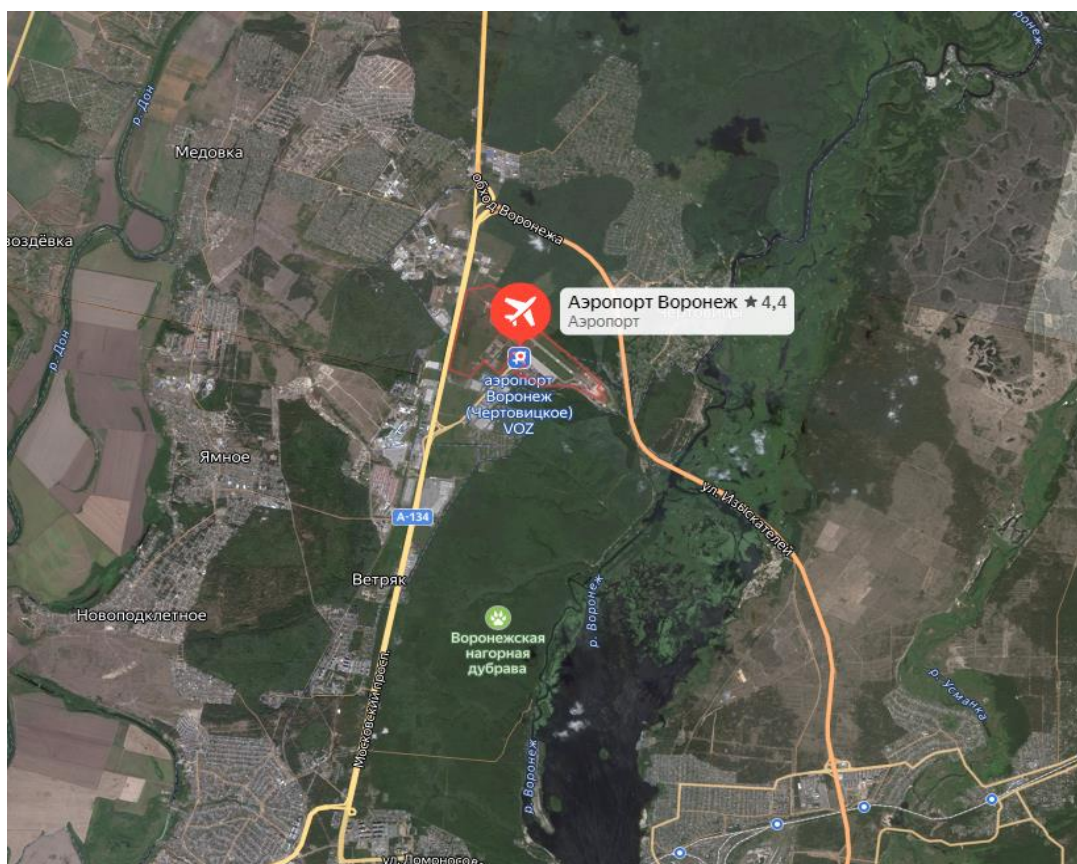


Рисунок 4 - Аэропорт г.Воронежа (Чертовицкое)

Аэропорт сертифицирован по всем видам аэропортовой деятельности и служит запасным для Московского авиаузла. Код аэропорта Воронеж— VOZ. Расположенный на пересечении основных воздушных магистралей, аэропортовый комплекс способен обеспечить обслуживание российских и зарубежных воздушных судов, в том числе технических посадок и посадок на запасной аэродром при выполнении регулярных и чартерных рейсов [9].

Относится к классу В

Географические координаты: 51°48'54" с. ш., 39°13'48" в. д.

Аэропорт располагается на территории равнинного ландшафта с небольшими пологими склонами, что обеспечивает хорошую видимость и минимизирует влияние природных препятствий, таких как горы или сильные леса. Кроме того, аэропорт Воронежа расположен вблизи Воронежского водохранилища, которое оказывает влияние на микроклимат (повышенная влажность, туманы). В районе аэропорта преобладает умеренно-континентальный климат с холодной зимой и тёплым летом.

Допущен к круглосуточной эксплуатации по установленным минимумам и предназначен для выполнения рейсовых и контрольно -испытательных полетов, тренировочных работ. Используется, как запасной для воздушных судов (ВС) Гражданской авиации (ГА) и ВС других ведомств. Имеет одну взлетно-посадочную полосу ИВПП 12/30 с искусственным покрытием (цементобетон, усиленный асфальтобетоном). Размеры ИВПП 2300×45м.

Истинные азимуты ВПП 37°24' / 217°25'

Размер летной полосы 2600х300 м

Классификация воздушного пространства: класс С

Возможность аэропорта по приемке (выпуску) ВС: 100 пассажиров в час

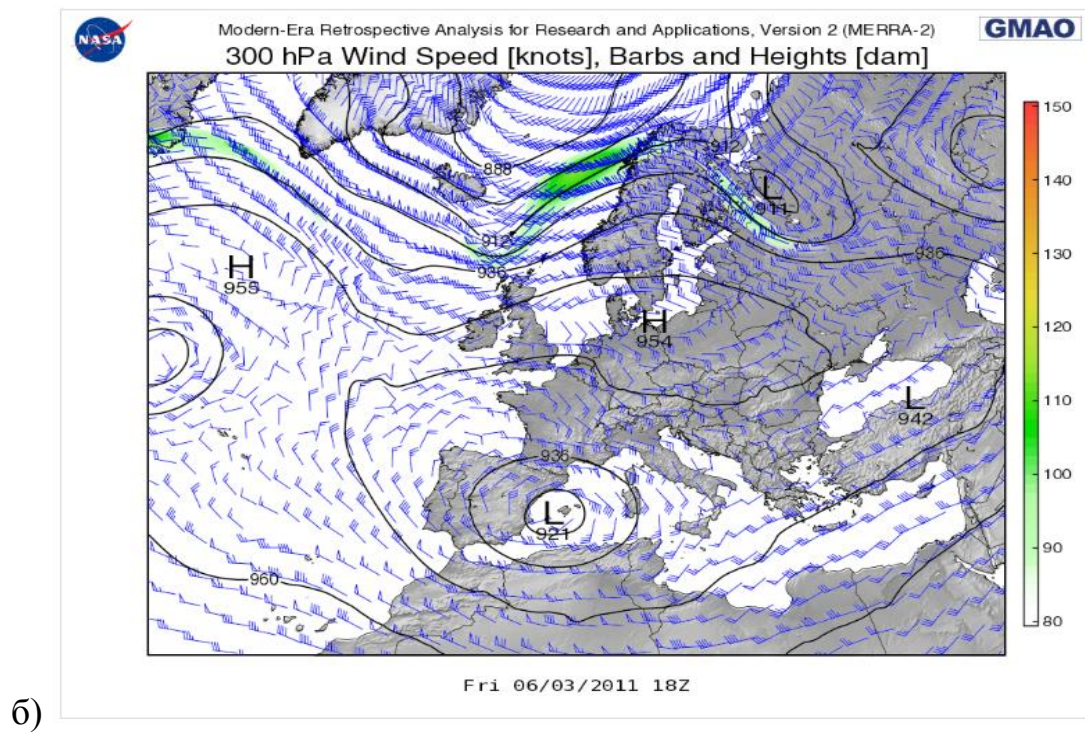
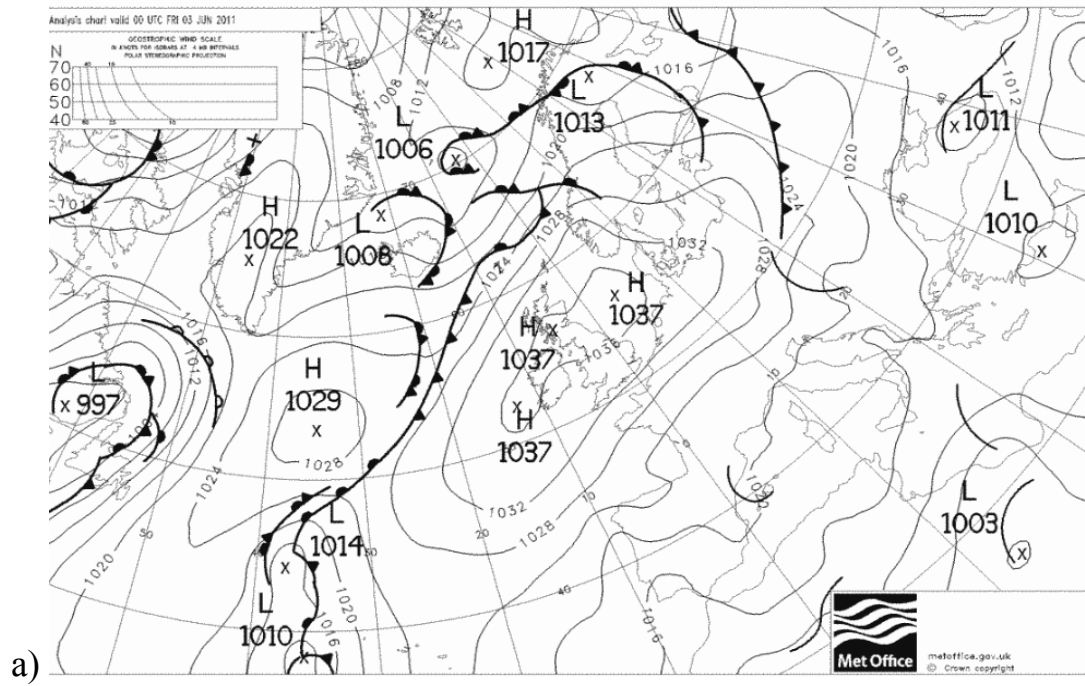
Во всех видах метеорологической информации указывается всемирное скоординированное время (BCB), местное время – московское (BCB+3 часа). Метеорологическое обеспечение полетов на аэродроме «Чертовицкое» (Индекс ИКАО UUOO) осуществляет АМСГ Воронеж.

АМСГ Воронеж назначен Росгидрометом в качестве аэродромного метеорологического органа по метеорологическому обеспечению международной авиации, а также в качестве органа метеорологического слежения. Режим работы аэропорта круглосуточный [9].

ГЛАВА IV. Исходные данные и анализ данных

В ходе моей работы использовались данные из архива погоды с сайта рп5 для аэропорта «Чертовицкое» города Воронеж. Данные представляют собой отдельную базу синоптических и аэрологических данных, по которой я в дальнейшем проводила все расчеты и анализы.

Все грозы были классифицированы как внутримассовые или фронтальные, включая грозы, связанные с теплыми, холодными фронтами и фронтами окклюзии. В случаях, когда не удавалось сразу определить тип грозы, для уточнения мной использовались карты барической топографии. Пример таких карт приведен на Рисунке 5. Данные карты с грозовой деятельностью представлены за 14.06.2011 года. На приземной карте (рис. 5 а) наблюдаем грозу внутримассового происхождения. Рядом с исследуемой территорией не было зафиксировано прохождение фронтов, что подтверждает, что гроза в этот день обусловлена особенностями местных воздушных масс. Карта скорости ветра на уровне 300 гПа (рис. 5 б) позволяет говорить о наличии слабых сдвигов ветра. Еще одним признаком грозы является повышенная влажность, которая отчетлива видна на карте относительной влажности воздуха на уровне 300 гПа (рис. 5 в).



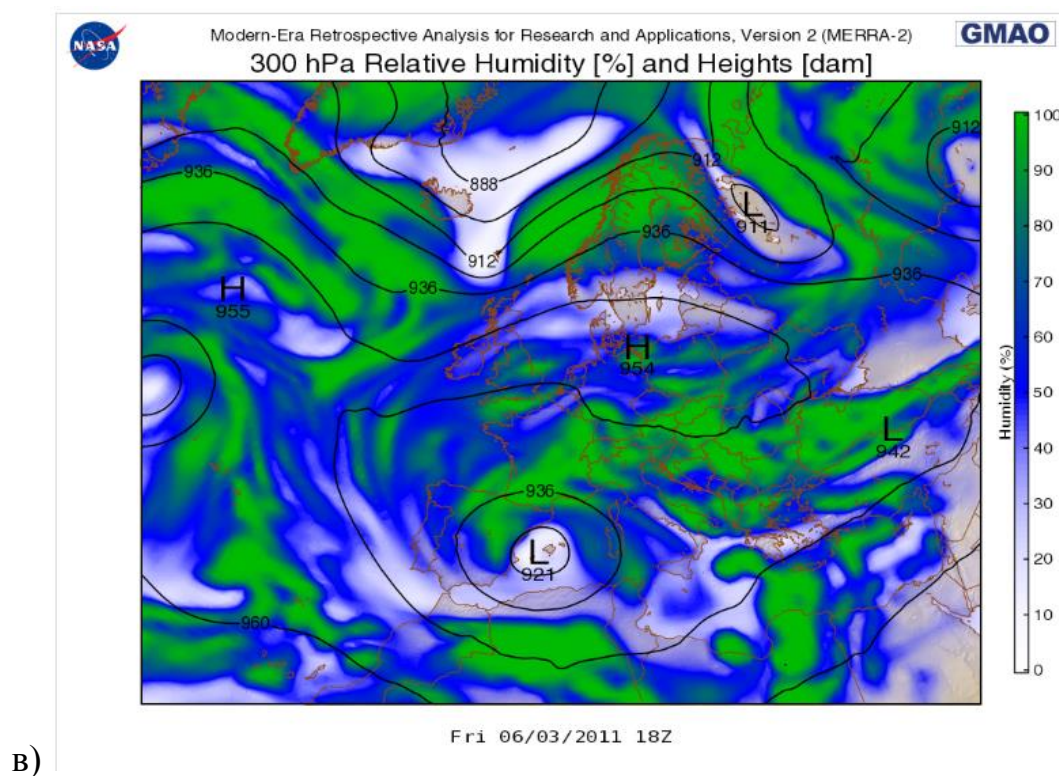


Рисунок 5 - (а)- Приземная карта за 03.06.2011, 00UTC [15]; (б)-Карта скорости ветра на уровне 300 гПа за 03.06.2011, 18UTC [16]; (в)- Барическая карта относительной влажности воздуха на уровне 300 гПа за 03.06.2011, 18 UTC [16].

Суммарное количество дней с грозовой активностью в городе Воронеже в летнее время года составило 100 дней за период с 03.06.2011 г. по 23.07.2024г.

После чего мной были составлены таблицы, отражающие разделение по годам случаев различных типов гроз. Для повышения наглядности и упрощения анализа повторяемости гроз, были построены две диаграммы - распределение гроз по годам и по месяцам (рисунок 6, рисунок 7) ниже представлен анализ этих диаграмм. Это позволило определить наиболее часто встречающийся тип гроз за исследуемый период.

После выявления доминирующего тип гроз – внутримассовых (61 %)- мной был проведен анализ конвективных характеристик, соответствующих именно этому типу. Для каждой даты с грозовой активностью были выделены параметры

атмосферной неустойчивости. На основе собранных данных была сформирована статистическая выборка, включающая показатели максимума, минимума, медианы, дисперсии, среднеквадратичного отклонения и среднего значения.

Источник данных о параметрах атмосферной неустойчивости - архивные материалы с сайта Университета Вайоминга, охватывающие летний период с 2011 по 2024 годы. В результате статистической обработки были определены доверительные интервалы значений индексов неустойчивости атмосферы. Далее проведено сопоставление полученных результатов с международными табличными значениями соответствующих индексов с целью проведения сравнительного анализа с установленными пороговыми значениями, характерными для территории города Воронежа (аэропорт Чертовицкое).

4.1 Грозовая деятельность в районе города Воронеж за летний период 2011-2024г.

В данной главе представлен анализ данных о грозовой деятельности разных типов в Воронеже. Данные за летний период с 03.06.2011 по 23.07.2024г. распределены по годам.

Таблица 5.1 из Приложения 5 свидетельствует нам о преобладающем количестве внутримассовых гроз – 10 случаев. Грозы, связанные с прохождением атмосферных фронтов встречались значительно реже: по одному случаю на холодном и теплом фронтах. Фронт окклюзии не зафиксирован.

В 2012 году сохраняется доминирование внутримассовых гроз – 11 случаев. При этом число фронтальных гроз увеличилось: два случая гроз на холодных фронтах и один на теплом, о чем свидетельствует Таблица 5.2.

Таблица 5.3 несет в себе информацию о грозовой активности в 2013 году. В этот год внутримассовые грозы составили всего 4 случая. На холодном фронте зарегистрирована одна гроза, и один случай с грозой фронта окклюзии.

В 2014 году количество внутримассовых гроз составило 2 случая, о чем говорит нам Таблица 5.4 Гроз на холодном и теплом фронтах зафиксировано по одному случаю.

Проанализировав Таблицу 5.5, мы видим, что в 2015 году было зарегистрировано 2 случая с внутримассовой грозовой активностью, а также по одному случаю гроз на теплом фронте и фронте окклюзии.

В 2016 году внутримассовые грозы составили 5 случаев, а фронтальные – 4 случая: 3 на холодном фронте и 1 на теплом. Такой анализ мы провели с помощью Таблицы 5.6.

В свою очередь Таблица 5.7 несет в себе информацию о том, что в 2017 году наблюдалось 3 внутримассовых грозы и 1 случай, связанный с прохождением холодного фронта.

В Таблице 5.8 наблюдаем 3 случая с грозовой внутримассового типа, зарегистрированных в 2018 году, также наблюдалась 1 гроза на холодном фронте и 2 на фронтах окклюзии.

Анализ таблицы из Таблицы 5.9, дал нам следующую информацию: в 2019 наблюдались 3 внутримассовые грозовые деятельности и 2, связанные с прохождением холодного фронта.

В 2020 году зафиксирована 1 внутримассовая гроза, 3 случая гроз на холодных фронтах, о чем свидетельствует нам Таблица 5.10.

Таблица 5.11 свидетельствует нам, что в 2022 зарегистрировано 6 случаев гроз, из которых 1 – внутримассовая, 3 – холодного фронта и 1 – фронта окклюзии.

Проведя анализ таблицы из Таблицы 5.12 видим, что в 2023 году наблюдалось 15 случаев с грозовой активностью. Причем одинаковое случаев приходится на внутримассовые и на грозы холодного фронта – по 6 случаев. Также наблюдалось 3 грозы, связанные с фронтом окклюзии.

В 2024 году зафиксировано 11 случаев с внутримассовой грозой. Грозы на холодном фронте составили 2 случая, других типов зафиксировано не было.

Таким образом, при анализе базы данных всего было выявлено 100 гроз, преобладают внутримассовые грозы, их количество составило 61, количество случаев

с фронтальной грозой практически в два раза меньше, всего их найдено 39, из них 25 – грозы, связанные с прохождением холодного фронта, 6 – возникшие при прохождении теплого фронта, 8 – фронта окклюзии.

Далее представлены диаграммы и таблицы, которые показывают распределение количества случаев разных типов гроз по годам и месяцам.

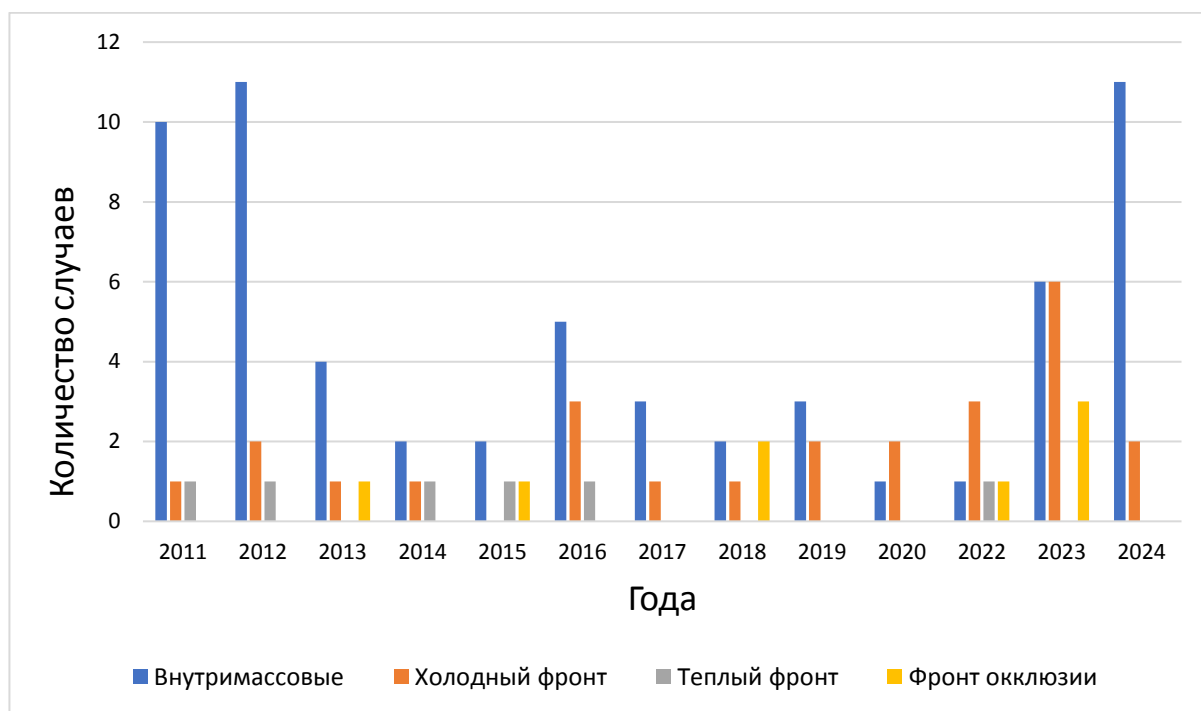


Рисунок 6 - Распределение количества разных типов гроз в летний период 2011-2024 г.

Из рис.6 видно, что максимальное количество гроз за исследуемый период пришлось на 2012 год – тогда было зарегистрировано 14 случаев грозовой активности. Из них 11 внутримассового происхождения, 2 были связанные с холодным фронтом, и 1 с теплым фронтом. Наименьшее количество гроз отмечено в 2020 году, всего выявлено 3 случая, из которых 1 имел внутримассовое происхождение, а оставшиеся две образовались под влиянием прохождения холодного фронта. Для удобства восприятия ниже приведена таблица с распределением гроз по годам.

Таблица 8 - Распределение количества разных типов гроз в летний период 2011-2024г.

Год	Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт ок- клюзии
2011	10	1	1	0
2012	11	2	1	0
2013	4	1	0	1
2014	2	1	1	0
2015	2	0	1	1
2016	5	3	1	0
2017	3	1	0	0
2018	2	1	0	2
2019	3	2	0	0
2020	1	2	0	0
2022	1	3	1	1
2023	6	6	0	3
2024	11	2	0	0
Всего:	61	25	6	8

Теперь рассмотрим диаграмму, которая несет в себе информацию о распределении количества видов грозовой деятельности по месяцам в летний период 2011-2024г.

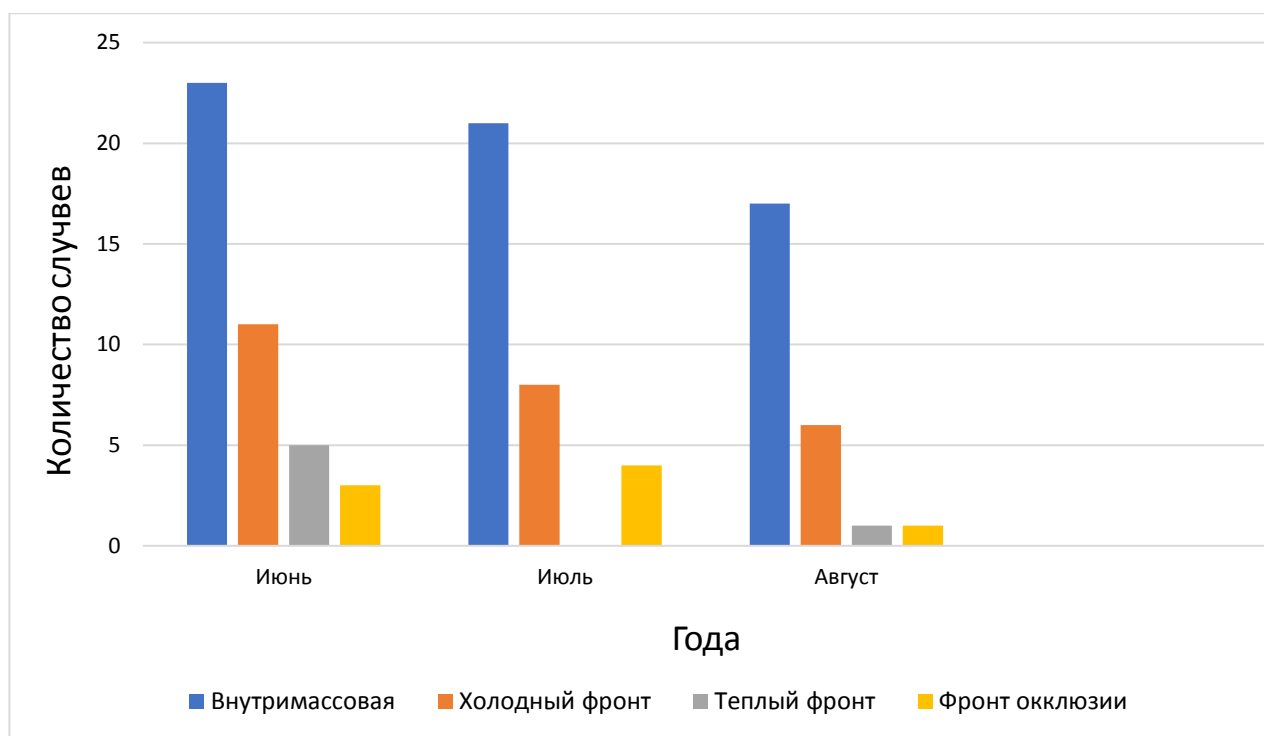


Рисунок 7 - Распределение количества разных типов гроз по месяцам в летний период 2011-2024г.

Проведя анализ полученной диаграммы, можем сказать, что в июне наблюдается наибольшее количество грозовой деятельности, а в августе - наименьшее количество.

Для этой диаграммы так же представлена таблица 9 с распределением грох по месяцам.

Таблица 9 - Распределение количества разных типов гроз по месяцам в летний период 2011-2024г.

Месяц	Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
Июнь	23	11	5	3
Июль	21	8	0	4
Август	17	6	1	1

Всего:	61	25	6	8
Количество гроз в процентах (%)	61 %	25%	6%	8%

В итоге по полученным диаграммам видим следующее: чаще всего грозы наблюдались в июне, а меньше всего гроз образовывалось в августе. При этом чаще всего наблюдались грозовые явления внутримассового происхождения, они составили 61% от общего количества. Так же могу отметить, что грозы в зоне холодного фронта преобладают над грозами остальных, составили 25% от общего количества.

4.2 Статистические характеристики индексов неустойчивости.

Одной из ключевых задач в данной работе является исследование показателей конвективной неустойчивости атмосферы на территории Воронежа в летнее время за период с 2011 по 2024 г. После проведения классификации грозовых явлений по типам и выявления преобладающего типа – внутримассовых гроз, мной было принято решение сосредоточить внимание на анализе конвективных характеристик именно для этого типа явлений. Для последующего анализа мной были отобраны следующие индексы неустойчивости, как наиболее широко распространённые: Lifted (Li), Kind (K) и Totals Totals (TT) и CAPE. В Таблице 10 представлен статистический анализ полученных индексов неустойчивости для территории Воронежа.

Таблица 10 - Статистические характеристики индексов неустойчивости для внутримассовых гроз в Воронеже за летний период 2011-2024 г.

	Lifted	Kind	Totals Totals	CAPE
Максимум	6,33	37,90	54,00	2040,52
Минимум	-5,04	0,70	36,60	0,00
Медиана	-1,03	29,90	46,60	332,43
Дисперсия	5,331387	36,15482	16,65645	211555,4
Среднеквадратичное отклонение	1,728111	4,271465	3,270008	355,3876
Среднее значение	-0,67	28,58	46,88	479,60

В ходе исследования были установлены пороговые значения индексов атмосферной неустойчивости при грозовой активности над городом Воронеж.

Был рассчитан доверительный интервал значений индексов Lifted (Li), Kind (K) и Totals Totals (TT) и CAPE для внутримассовых гроз. В своей работе я использовала трехкратный анализ доверительного анализа. Это делается с целью повышения надежности оценки полученных значений. При сравнительном анализе были получены следующие значения для наличия внутримассовых гроз:

Li – от -1,15 до -0,19; $\sigma = 0,5$

K – от 27,39 до 29,76; $\sigma = 1,2$

TT – от 45,97 до 47,79; $\sigma = 0,9$

CAPE – от 380,86 до 578,35; $\sigma = 98,7$,

где σ – стандартное отклонение

Полученные доверительные интервалы можно сравнить с зарубежными значениями. Для этого ниже эти значения представлены в виде таблиц:

Таблица 11 - Пороговые значения индекса Li [14]

Li	Количественная оценка
$Li \geq 6$	Глубокая инверсия. Атмосфера очень устойчива
$1 \leq Li \leq 5$	Устойчивое состояние атмосферы. Кучевая облачность хорошей погоды.
$0 \geq Li \geq -2$	Небольшая неустойчивость. Конвективная облачность с ливнями, при интенсивном дневном прогреве.
$-3 \geq Li \geq -5$	Умеренная неустойчивость. Сильные грозы.
$Li \leq -6$	Высокая неустойчивость. Очень сильные грозы.

В ходе сравнения мы видим, что полученный нами доверительный интервал для Воронежа соответствует небольшому промежутку количественной оценки Lifted – от умеренной неустойчивости до небольшой неустойчивости атмосферы [14].

Таблица 12 - Пороговые значения индекса К [14]

К	Количественная оценка	Определение терминов покрытия
$K < 20$	Без гроз	-
$20 \leq K \leq 25$	Отдельные изолированные грозы	Не более 10% площади территории
$25 < K \leq 30$	Несколько гроз	Не более 10-20% площади территории
$30 < K \leq 35$	Рассеянные грозы	20-50% площади территории
$35 < K \leq 40$	Многочисленные грозы	50-70% площади территории
$K > 40$	Грозы повсеместно	Грозовые очаги занимают >70% территории

Сравнительный анализ индекса К показал, что полученный доверительный интервал имеет наименьший разброс сравнительной оценки, который соответствует некоторому числу гроз.

Таблица 13 - Пороговые значения индекса ТТ [14]

ТТ	Количественная оценка
< 44	Грозовая деятельность невозможна.
44-45	Отдельная гроза или несколько гроз.
46-47	Рассеянные грозовые очаги.
48-49	Значительное количество гроз, отдельные из которых сильные.
50-51	Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
52-55	Значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем.
>55	Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.

Полученные данные свидетельствуют о том, что рассчитанный нами доверительный интервал охватывает лишь часть количественной оценки индекса ТТ, включая в себя отдельные грозы и рассеянными грозовыми очагами. Так же могут встречаться и сильные грозы с значительным количеством очагов.

Таблица 14 - Пороговые значения индекса CAPE [14]

CAPE	Количественная оценка
CAPE < 0	Устойчивое состояние, грозы невозможны
0 < CAPE < 1000	Слабая неустойчивость, возможны грозы
1000 < CAPE < 2500	Умеренная неустойчивость, сильные грозы и ливни

2500 < CAPE < 3500	Сильная неустойчивость, очень сильные грозы, шквалы
CAPE > 3500	Очень сильная неустойчивость, образуются суперячейки, торнадо

В ходе сравнения видим, что доверительные интервалы индекса CAPE, полученные для аэропорта Чертовицкое соответствуют количественной оценки индекса CAPE от невозможности возникновения грозовой активности до слабой неустойчивости и возможному возникновению гроз.

Проведенное сравнение пороговых значений, характерных для зарубежных регионов и полученными значениями для Воронежа (Чертовицкое) продемонстрировало, что индексы Li, K, TT и CAPE для Воронежа имеют более низкие значения, поэтому использовать зарубежные критерии нецелесообразно, а следует рассчитывать для каждой локации собственные критерии. Это можно объяснить тем, что пороговые значения индексов неустойчивости, установленных за рубежом, отражают климатические и метеорологические условия зарубежных регионов, в которых преобладают иные вертикальные профили температуры и влажности, которые напрямую связаны с возникновением конвективной неустойчивости, иные климатические и физико-географические условия.

Для территории аэропорта Воронежа, находящегося под влиянием умеренно-континентального климата, характерны выраженные сезонные колебания температуры и влажности, а значит вертикальные градиенты и процессы конвекции имеют свои особенности. Мы выяснили, что пороговые значения индексов для

Воронежа значительно ниже зарубежных, что обусловлено менее выраженной конвекцией в данной климатической зоне.

Таким образом, использование зарубежных пороговых значений может привести к занижению реальной вероятности возникновения конвективной деятельности, что, в свою очередь, может негативно сказаться на безопасности полетов.

Так же в ходе моей работы был проведен анализ дней без грозовой деятельности. Ниже в таблицах содержится статистическая информация об этих датах. Всего для данного анализа было взято 30 случаев в период с 06.06.2011 по 25.08.2024 гг. Такие дни отбирались по следующим критериям: высокая температура воздуха у поверхности, отсутствие облачности, неустойчивая атмосфера.

Таблица 15 - Статистические характеристики индексов неустойчивости в дни без гроз в Воронеже за летний период 2011-2024г.

	Lifted	Kind	Totals Totals	CAPE
Максимум	10,86	35,50	50,60	1100,07
Минимум	-4,28	-18,30	29,60	0,00
Медиана	2,96	18,90	41,45	0,00
Дисперсия	13,66085	113,2908	23,91151	58323,07
Среднеквадратичное отклонение	2,834756	7,894667	3,941778	151,4227

Среднее значение	3,20	17,28	41,78	101,55
------------------	------	-------	-------	--------

Дальше были произведены расчеты доверительных интервалов значений тех же индексов. Получили следующие значения:

L_i – от 2,08 до 4,32; $\sigma = 1,1$

K – от 14,15 до 20,40; $\sigma = 3,1$

TT – от 40,21 до 43,34; $\sigma = 1,6$

$CAPE$ – от 41,55 до 161,54; $\sigma = 59,9$,

где σ – стандартное отклонение.

Таким образом, мы видим, что в дни без грозовой деятельности индекс L_i , рассчитанный для Воронежа, соответствует устойчивому состоянию атмосферы, наличию кучевой облачности хорошей погоды по международным критериям (Таблица 11). Индекс K для Воронежа в свою очередь находится в диапазоне значений без гроз по Таблица 12, но возможно возникновение отдельных изолированных гроз. Значение индекса TT соответствует невозможности возникновения грозовой деятельности (Таблица 13). В свою очередь индекс $CAPE$ соответствует слабой неустойчивости и возможному возникновению грозовой активности (Таблица 14). Подобные разногласия доказывают невозможность прямого применения зарубежных пороговых значений к любому региону без проверки.

Заключение

Термодинамические характеристики конвективных явлений играют ключевую роль в обеспечении авиационной безопасности, особенно при прогнозировании опасных погодных условий. Аэропорт города Воронежа, расположенный в зоне активной летней конвективной деятельности, регулярно подвергается воздействию таких явлений.

Одним из основных инструментов для оценки неустойчивости атмосферы являются различные индексы неустойчивости. Однако существующие пороговые значения этих индексов разработаны для зарубежных регионов с отличающимися климатическими условиями и для некоторых территорий России, что снижает точность оценки конвективной активности на локальном уровне, в частности, в районе аэропорта Чертовицкое.

При выполнении выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи.

- Была создана база с конвективными явлениями для аэропорта города Воронежа в летний период с 2011 по 2024 гг;
- Систематизированы и проанализированы полученные данные о грозовой активности по синоптическим картам;
- Проведен анализ пороговых значений индексов неустойчивости Lifted, Kind, Totals Totals и CAPE, при которых над Воронежем наблюдается и отсутствует грозовая деятельность;
- Проведен сравнительный анализ полученных пороговых значений характеристик неустойчивости для Воронежа с международными данными, который показал, что использование зарубежных критериев нецелесообразно, поэтому следует рассчитывать для каждой локации собственные критерии.

В процессе работы было выявлено 100 случаев с грозовой активностью в летний период с 2011 по 2024 год, 61% из которых связан с внутримассовыми грозами. На основе проведенного анализа конвективной активности, связанной

с грозовыми явлениями на территории аэропорта Чертовицкое в городе Воронеже в летний период за 2011-2024 гг., установлено, что наибольшее количество случаев с грозовой активностью зафиксировано в июне – 42% от общего количества исследуемых гроз, наименьшее - в августе и составило 25%. Основную долю наблюдаемых гроз составляют внутримассовые. Среди фронтальных гроз наибольшее число связано с прохождением холодного фронта, которые преобладают по сравнению с другими типами фронтов. Наибольшее количество гроз за исследуемый период зафиксировано в 2012 году 14 случаев, из них 11 – внутримассовые, минимальное количество гроз за исследуемый период в 2020 году - 3 случая, из них 2 грозы холодного фронта.

В рамках работы были определены пороговые значения индексов, характерных для климатических условий аэропорта города Воронежа. Установлено, что данные значений существенно ниже аналогичных показателей, характерных для зарубежных территорий, что обусловлено региональными климатическими особенностями.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы как вспомогательные данные для прогнозов грозовой активности и улучшения мер по обеспечению безопасности полетов в районе аэропорта Чертовицкое.

Список использованной литературы

1. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика Атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 1965.
2. Назаренко А. В. Опасные явления погоды конвективного происхождения / А.В. Назаренко Учебно-методическое пособие для ВУЗов. Часть 3. – г. Воронеж.-2000
3. Шметер С. М. Термодинамика и физика конвективных облаков [Текст] Л.: Гидрометеиздат, 1987.
4. Пономаренко С. И. Оценка способов прогноза гроз и рекомендации по их использованию (метод. указания) [Текст] / Пономаренко С. И., Лебедева Н. В., Чистяков А. Д. Л.: Гидрометеиздат, 1971.
5. Богаткин О. Г. Авиационные прогнозы погоды. – СПб.: изд. «БХВ-Петербург». – 2010.
6. Прогноз гроз, шквалов. Методическое пособие. Минск, «Республиканский гидрометцентр», 1984 г.
7. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1977.
8. Краеведенье Воронежской области [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://край36.pdf>
9. Сайт аэропорта города Воронеж [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vozavia.ru>
10. Воронежская энциклопедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vrnency.ru/>
11. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терев 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.
12. Сивков Б.А., Калинин Н.А. Определение значений критериев индексов неустойчивости при шквалах для территории Пермского края.

Географический вестник. № 1(44), 2018. с.105-113.doi 10.17072/2079-7877-2018-1-105-113.

13. 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. doi: 10.17223/15617793/400/53.

14. Индексы неустойчивости атмосферы, [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://flymeteo.org/stat/indexneust.php>

15. Синоптические карты, [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.wetterzentrale.de>

16. Карты барической топографии, [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fluid.nccs.nasa.gov>

17. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири / Д. А. Константинова, В. П. Горбатенко. Вестник Томского государственного университета. 2010. С. 189-193

Приложение №1. Данные в Excel из архива погоды rп5 для метеостанции Чертовицкое города Воронежа.

Местное время в Воронеже / им. Петра Первого (аэропорт)	T	P0	P	U	DD	Ff	#10	WW	WW*	c	VV	Td
31.08.2024 23:30	22.0	753.5	767.3	50	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	11.0
31.08.2024 23:00	22.0	753.5	767.3	50	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	11.0
31.08.2024 22:30	22.0	753.5	767.3	53	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 22:00	23.0	753.5	767.3	50	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 21:30	24.0	753.6	767.3	47	Ветер, дующий с востока	4				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 21:00	24.0	753.6	767.3	47	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 20:30	24.0	753.6	767.3	47	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 20:00	24.0	753.6	767.3	47	Ветер, дующий с востока-северо-востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 19:30	25.0	753.6	767.3	42	Ветер, дующий с востока	2				Нет осадков	10.0 и бол	11.0
31.08.2024 19:00	26.0	753.0	766.6	39	Ветер, дующий с востока	2				Нет осадков	10.0 и бол	11.0
31.08.2024 18:30	28.0	753.1	766.6	32	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 18:00	29.0	753.1	766.6	31	Ветер, дующий с востока-юго-востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 17:30	30.0	753.2	766.6	29	Ветер, дующий с востока-юго-востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 17:00	31.0	753.2	766.6	27	Ветер, дующий с юго-востока	4				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 16:30	30.0	753.2	766.6	29	Ветер, дующий с востока-юго-востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 16:00	31.0	753.2	766.6	27	Ветер, дующий с востока-юго-востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	10.0
31.08.2024 15:30	31.0	753.9	767.3	25	Ветер, дующий с востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	9.0
31.08.2024 15:00	32.0	753.9	767.3	24	Ветер, дующий с востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	9.0
31.08.2024 14:30	32.0	753.9	767.3	24	Ветер, дующий с востока-юго-востока	4				Нет осадков	10.0 и бол	9.0
31.08.2024 14:00	32.0	753.9	767.3	22	Ветер, дующий с юго-востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	8.0
31.08.2024 13:30	31.0	753.9	767.3	24	Ветер, дующий с юго-востока	6				Нет осадков	10.0 и бол	8.0
31.08.2024 13:00	32.0	753.9	767.3	24	Ветер, дующий с востока-юго-востока	5	10			Нет осадков	10.0 и бол	9.0
31.08.2024 12:30	31.0	753.9	767.3	31	Ветер, дующий с юго-востока	5				Нет осадков	10.0 и бол	12.0
31.08.2024 12:00	30.0	753.8	767.3	31	Ветер, дующий с востока	4				Нет осадков	10.0 и бол	11.0
31.08.2024 11:30	29.0	753.8	767.3	37	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 11:00	28.0	754.5	768.1	40	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 10:30	27.0	754.5	768.1	42	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 10:00	26.0	754.5	768.1	45	Ветер, дующий с востока-северо-востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 09:30	24.0	754.4	768.1	50	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 09:00	23.0	754.3	768.1	53	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 08:30	22.0	754.3	768.1	57	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 08:00	21.0	754.2	768.1	60	Ветер, дующий с востока-юго-востока	2				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 07:30	21.0	753.4	767.3	60	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0
31.08.2024 07:00	20.0	753.4	767.3	64	Ветер, дующий с востока	3				Нет осадков	10.0 и бол	13.0

Приложение №2. Анализируемые грозы с датой и временем

грозы			
дата	время начала	время окончания	тип грозы
03.06.2011	21:00	23:00	внутримассовая
14.06.2011	15:00	19:00	внутримассовая
22.06.2011	15:00	17:00	внутримассовая
25.06.2011	14:00	15:00	внутримассовая
28.06.2011	21:00	23:00	фронтальная(теплый)
29.06.2011	9:00	11:00	внутримассовая
01.07.2011	15:00	21:00	внутримассовая
19.07.2011	18:00	21:00	внутримассовая
31.07.2011	12:00	18:00	внутримассовая
01.08.2011	14:00	15:00	внутримассовая
02.08.2011	21:00	23:00	внутримассовая
19.08.2011	18:00	23:00	фронтальная(холодный)
05.06.2012	21:00	23:00	внутримассовая
10.06.2012	18:00	23:00	внутримассовая
14.06.2012	21:00	23:00	внутримассовая
16.06.2012	0:00	7:00	фронтальная(холодный)
26.06.2012	18:00	20:00	фронтальная(холодный)
23.07.2012	11:00	12:00	внутримассовая
28.07.2012	9:00	13:00	внутримассовая
03.08.2012	15:00	22:00	внутримассовая
11.08.2012	15:00	21:00	внутримассовая
12.08.2012	18:00	21:00	внутримассовая
17.08.2012	20:00	21:00	внутримассовая
19.08.2012	15:00	22:00	внутримассовая
28.08.2012	21:00	23:00	внутримассовая
29.08.2012	0:00	18:00	фронтальная(теплый)
09.06.2013	18:00	22:00	внутримассовая

Приложение №3. Значение индексов для внутримассовых гроз в выбранный период.

Ц	К	ТТ	CAPE	1,95	29,90	41,40	137,63
-1,27	22,50	45,40	503,80	-1,12	29,90	45,60	298,42
-1,23	34,90	51,20	225,19	3,45	22,50	39,20	9,85
-2,08	29,70	54,00	332,43	5,52	26,10	38,60	1,70
-0,71	28,70	43,60	250,38	6,33	0,70	38,60	0,00
1,10	32,90	47,80	504,88	2,90	23,30	39,20	0,07
1,03	33,30	45,60	30,87	-2,72	30,10	48,00	508,55
-1,43	31,10	49,60	433,84	0,78	24,10	46,60	235,28
0,15	31,90	45,00	86,46	4,85	18,10	36,60	97,09
0,77	31,00	43,10	65,88	0,34	22,10	42,80	120,95
-1,25	31,40	46,60	373,39	-1,61	28,70	48,80	382,52
-0,40	30,20	49,10	104,84	-2,85	37,90	52,80	521,77
-1,21	30,30	45,40	477,78	-0,39	27,50	47,80	100,18
-1,82	25,90	45,00	590,03	0,76	32,70	46,60	102,79
-1,03	30,00	48,50	145,03	1,14	22,70	44,80	2,11
-0,65	33,70	50,80	328,03	0,47	34,80	49,40	998,54
-0,90	30,10	49,20	702,33	-3,65	37,40	53,00	912,68
-1,61	26,90	45,40	759,26	2,07	23,50	42,00	70,40
-2,56	30,70	48,60	256,93	-4,43	33,00	51,40	1966,36
-0,21	28,40	46,00	850,77	-3,12	33,12	51,85	918,20
-2,77	27,00	47,30	0,00	-3,55	34,90	54,00	1139,37
1,68	28,60	42,80	109,17	-5,04	32,70	50,20	2040,52
0,65	20,60	44,66	325,38	-3,68	37,30	50,80	1318,17
-0,88	27,30	48,60	1008,41	-3,52	31,80	50,30	863,13
-1,21	25,50	46,60	660,98	-3,28	29,50	49,80	834,43
0,24	24,50	48,80	581,94	0,44	35,20	53,10	949,02
-2,93	29,30	52,80	46,07	-2,01	32,80	45,00	1280,21
-0,65	30,50	46,20	297,56	-1,39	15,50	44,40	790,07
-1,39	25,90	47,60	1100,07	0,83	20,10	41,40	212,66

Приложение №4. Значение индексов для дней без грозовой деятельности в выбранный срок.

дата	Ц	К	ТТ	CAPE
06.06.11	5,51	5,30	40,60	0,00
02.07.11	2,99	19,70	41,80	0,00
04.07.11	0,80	20,50	43,80	19,50
11.07.11	2,65	13,80	41,50	26,94
29.08.11	10,86	-18,30	29,60	0,00
06.08.11	9,45	6,70	37,60	0,00
07.06.12	-4,02	33,10	50,60	398,23
18.06.12	4,88	15,50	41,40	0,00
01.08.12	2,50	25,70	40,60	0,00
15.06.13	-1,04	22,70	45,80	163,57
17.06.13	-1,73	22,10	44,60	405,42
25.06.13	1,33	21,50	45,40	13,27
12.07.14	2,65	23,10	47,60	0,00
28.07.14	4,85	14,70	38,80	0,00
01.08.14	2,08	22,10	43,20	0,00
09.07.15	2,92	27,10	43,40	0,00
11.08.15	-4,28	30,30	50,00	1100,07
12.08.15	4,33	18,10	38,60	0,00
26.06.16	6,16	10,10	39,00	0,00
26.07.17	7,53	10,90	37,80	0,00
04.06.18	2,00	22,10	46,60	1,75
09.08.18	6,41	6,30	35,40	0,00
13.07.19	3,68	19,70	44,20	0,00
03.07.20	5,03	8,70	38,00	0,00
11.06.22	0,05	35,50	48,40	113,97
25.06.23	9,67	7,90	35,60	0,00
07.07.23	0,97	7,30	38,20	170,40
14.08.23	5,53	18,10	36,40	2,78

Приложение №5.

Таблица 5.1 Количество гроз за летний период 2011года.

Внутримассо- вые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт ок- клюзии
03.06.2011	19.08.2011	28.06.2011	
14.06.2011			
22.06.2011			
25.06.2011			
29.06.2011			
01.07.2011			
19.07.2011			
31.07.2011			
01.08.2011			
02.08.2011			
Всего : 10	1	1	0

Таблица 5.2 Количество гроз в летний период 2012 года.

Внутримассо- вые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт ок- клюзии
05.06.2012	16.06.2012	29.08.2012	
10.06.2012	26.06.2012		
14.06.2012			
23.07.2012			
28.07.2012			
03.08.2012			
11.08.2012			
12.08.2012			
17.08.2012			
19.08.2012			

28.08.2012			
Всего: 11	2	1	0

Таблица 5.3 Количество гроз в летний период 2013 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
09.06.2013	30.06.2013		19.06.2013
12.06.2013			
26.06.2013			
28.06.2013			
Всего: 4	1	0	1

Таблица 5.4 Количество гроз в летний период 2014 года

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
08.06.2014	21.07.2014	25.06.2014	
11.08.2014			
Всего: 2	1	1	0

Таблица 5.5 Количество гроз в летний период 2015 года

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
17.06.2015		27.06.2015	29.06.2015
11.08.2015			
Всего: 2	0	1	1

Таблица 5.6 Количество гроз в летний период 2016 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
19.07.2016	19.06.2016	04.06.2016	
28.07.2016	28.06.2016		
02.08.2016	04.07.2016		
13.08.2016			
19.08.2016			
Всего: 5	3	1	0

Приложение 5.7 Количество гроз в летний период 2017 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
13.07.2017	30.06.2017		
22.07.2017			
08.08.2017			
Всего: 3	1	0	0

Приложение 5.8 Количество гроз в летний период 2018 года.

Внутри-массовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
01.07.2018	17.08.2018		18.07.2018
25.07.2018			20.07.2018
Всего: 2	1	0	2

Приложение 5.9 Количество гроз в летний период 2019 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
08.06.2019	02.06.2019		
07.07.2019	09.07.2019		
25.07.2019			
Всего: 3	2	0	0

Приложение 5.10 Количество гроз в летний период 2020 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
21.06.2020	02.06.2020		
	09.07.202		
Всего: 1	2	0	

Приложение 5.11 Количество гроз в летний период за 2022 год.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
02.06.2022	13.06.2022	22.06.2022	19.08.2022
	02.08.2022		
	29.08.2022		

Всего: 1	3	1	1
----------	---	---	---

Приложение 5.12 Количество гроз в летний период 2023 года

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
03.07.2023	03.06.2023		30.06.2023
06.07.2023	18.07.2023		15.07.2023
26.07.2023	21.07.2023		29.07.2023
02.08.2023	28.07.2023		
20.08.2023	12.08.2023		
23.08.2023	21.08.2023		
Всего: 6	6	0	3

Приложение 5.13 Количество гроз в летний период 2024 года.

Внутримассовые	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
02.06.2024	24.06.2024		
05.06.2024	06.07.2024		
06.06.2024			
12.06.2024			
17.06.2024			
18.06.2024			
01.07.2024			
08.07.2024			

15.07.2024			
18.07.2024			
23.07.2024			
Всего: 11	2	0	0