



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

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Условия образования и прогнозирования зимних гроз на  
примере аэродрома г. Минск»

Исполнитель Лелихова Екатерина Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доцент кафедры метеорологических прогнозов  
(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«22 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург  
2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения и определения.....	2
Введение.....	3
1 Классификация и условия образования конвективных облаков и гроз .....	6
1.1 Классификация гроз.....	6
1.2 Метеорологические условия образования гроз.....	7
1.3 Синоптические условия возникновения гроз.....	10
1.4. Условия возникновения зимних гроз.....	12
2 Статистические данные о зимних грозах за период 1989-2020 г.г по аэродрому Минск.....	14
2.1 Физико-географические положение и климатические особенности рельефа, способствующие образованию гроз в Минске.....	14
2.2 Материалы и методы исследования .....	15
2.3 Статистические данные о грозах .....	17
3 Анализ синоптических и аэросиноптических условий при зимних грозах по аэродрому Минск.....	20
3.1 Анализ синоптических условий.....	20
3.2 Анализ аэросиноптических условий.....	25
4 Методы прогнозирования гроз.....	33
4.1 Индексы неустойчивости.....	33
4.2 Расчет индексов неустойчивости для прогноза гроз на примере аэродрома Минск.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	40

## СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. АМСГ – авиационная метеорологическая станция гражданская
2. АВ-6 – авиационный дневник погоды
3. АТ – карты барической топографии
4. ОТ – карты относительной барической топографии
5. ОЯ – опасное явление
6. UTC – Всемирное скоординированное время
7. ЛЭП – линии электропередач

## ВВЕДЕНИЕ

Гроза - это атмосферное явление, при котором между облаками и поверхностью Земли возникают мощные электрические разряды, сопровождающиеся вспышками молнии и громом. Во время грозы часто усиливается ветер, бывают сильные ливни, а иногда и град. Грозы считаются опасным погодным явлением, поскольку они могут повредить линии электропередач и связи. Грозы представляют серьезную угрозу для авиации. Согласно мировой статистике, причинами большинства летных происшествий являются сложные метеорологические условия, такие как низкая облачность, вертикальное развитие облаков, сильные осадки, грозы и штормы.

За последнее время отмечается повышение средней температуры воздуха на  $1,2^{\circ}\text{C}$ , особенно заметное зимой и в начале весны из-за периода потепления с 1989 года. Это может обусловить более частое возникновение гроз в холодное время года, несмотря на то, что они обычно наблюдаются в теплые месяцы (апрель-сентябрь). Изменения в климате могут создавать более неустойчивую атмосферу, что способствует образованию гроз. Также изменения направления и скорости движения воздушных масс могут вызывать появление более сильных и длительных гроз. Такие изменения могут иметь серьезные последствия, такие как сильные ветры, ливни, град и молнии, повышая риск наводнений, разрушений зданий и лесных пожаров. Поэтому важно предпринимать меры для адаптации к климатическим изменениям и улучшения мониторинга погоды с целью уменьшения рисков и защиты населения от возможных негативных последствий этого явления.

Прогнозирование гроз и связанных с ними опасных конвективных явлений является ключевой и сложной задачей в метеорологии. Основные трудности в решении этой проблемы связаны с дискретным распределением гроз и сложностью взаимосвязей между грозами и множеством факторов, влияющих на их образование. Развитие гроз связано с конвективными процессами, которые очень переменчивы во времени и пространстве.

Осенью и зимой, при наличии теплых и влажных воздушных масс, которые приносятся с океанов и морей воздушными потоками и циклонами, часто возможны грозы.

Российский ученый Ю. Юсупов провел исследования в области прогнозирования штормов и сильных осадков, включая холодные периоды. Он использовал функцию фронтального генетического вектора и изоэнтропийного потенциального вихря Эртеля в насыщенном состоянии на основе расчетов с применением негидростатической модели WRF-ARW. Также ученые Ю. М. Михайлов, С. Е. Смирнов, Г. А. Михайлов и О. Капустин провели исследования, изучающие особенности зимних гроз на Камчатке с учетом влияния солнечной, сейсмической и циклонической активности, что вносит значительный вклад в данное научное направление.

Исследования ученых из различных стран помогают лучше понять и прогнозировать зимние грозы, которые представляют опасность для различных видов деятельности. В США проводились активные исследования зимних гроз. Ученые, такие как Д. М. Шульц и Р. Дж. Вавреком, определили основные критерии для прогнозирования зимних гроз, такие как влажность, высота над уровнем моря, атмосферная неустойчивость, а также температура ниже 0°C в облаках и на уровне земли. Ученый из США, С. Шварц, выделил ряд критериев для прогнозирования зимних гроз, связанных с положением циклонов, температурными аномалиями и другими факторами. В Беларуси ученые В. Ф. Логинов, А. А. Волчек и И. Н. Шпока изучали пространственное и временное распределение зимних гроз на фоне изменения климата. Например, анализируя количество грозовых дней в холодный период с 1975 по 2008 год, они выявили определенные тенденции. Среднее количество дней с грозами за этот период составило 24 дня в году, наблюдается увеличение количества дней с грозами с севера на юг страны, что связано с аномалиями электропроводности. Указаны районы страны с активной грозовой активностью в необычный сезон.

Изучение изменений климата, увеличение осадков и амплитуды их колебаний, а также повышенное количество жидких осадков зимой - все это

важные аспекты для прогнозирования погоды и управления рисками, связанными с экстремальными погодными условиями. Понимание этих процессов поможет ученым развить более точные модели климатических изменений и сделать более точные предсказания для защиты населения и экономики от негативных последствий.

Отсутствие разработанных методов прогнозирования зимних гроз на Минском аэродроме и широкий интерес к этой проблеме свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований в этой области. Разработка эффективных алгоритмов и методов прогнозирования зимних гроз имеет большое значение для обеспечения безопасности авиации и других отраслей экономики, подверженных рискам от экстремальных погодных явлений.

Изучение условий формирования зимних гроз и совершенствование методов их прогнозирования поможет улучшить качество метеорологического обеспечения и повысить эффективность мер по предотвращению возможных негативных последствий. Поэтому необходимо активно развивать научные исследования в этой области и совершенствовать методики прогнозирования зимних гроз для повышения уровня безопасности и ресурсов экономики.

# 1 КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И ГРОЗ

## 1.1 Классификация гроз.

Детальное исследование различных типов гроз в зависимости от метеорологических условий. Различия между массовыми и фронтальными грозами, а также их влияние на окружающую среду и взаимосвязь с географическими особенностями, позволяют глубже понять процессы, происходящие в атмосфере во время грозовой активности.

Интересно отметить, что интенсивность гроз может быть разной в зависимости от типа и места их возникновения. Например, грозы в горных районах, как вы отметили, обычно более интенсивны из-за особенностей ландшафта и атмосферного давления. Также важно отметить, что грозы над морями и океанами могут быть активны в любое время суток, в отличие от суши, где наблюдаются более заметные дневные и ночные колебания температуры воздуха.

Благодаря такому углубленному анализу различных типов гроз и их характеристик, можно более точно прогнозировать возможные последствия и принимать меры по обеспечению безопасности и предотвращению ущерба от негативных погодных явлений.

Фронтальные грозы возникают при столкновении воздушных масс с разными температурами и влажностями. Грозовые облака, как правило, образуются на границе между теплым и холодным воздухом, где происходит интенсивное вертикальное движение воздуха. Этот процесс создает необходимые условия для формирования грозовых ячеек и последующего развития грозовой активности.

Верно, для возникновения фронтальных гроз необходимо, чтобы в атмосфере было достаточное количество влаги, которое позволяет облакам развиваться и подниматься на большую высоту. Также важна атмосферная

нестабильность, которая способствует интенсивному вертикальному движению воздуха, что, в свою очередь, обеспечивает развитие грозовых облаков. Эти условия совместно создают благоприятную среду для формирования и развития фронтальных гроз.

Наличие сильных ветров и термических градиентов воздуха может также сыграть важную роль в образовании и усилении фронтальных гроз. Ветер способствует перемещению воздушных масс и созданию дополнительных условий для формирования и развития грозовых облаков. Сильные термические градиенты могут усилить вертикальное движение воздуха и способствовать интенсивности грозовой активности. Поэтому эти факторы являются важными при анализе и прогнозировании фронтальных гроз.

Таким образом, метеорологические условия для образования фронтальных гроз включают столкновение воздушных масс, наличие влаги и неустойчивости в атмосфере, а также дополнительные факторы, такие как ветер и термические градиенты.

## 1.2 Метеорологические условия для образования гроз.

Тепловая конвекция возникает из-за неравномерного нагревания поверхности Земли солнечным излучением. При этом воздух над нагретой поверхностью становится менее плотным и поднимается, образуя кучево-дождевые облака. Принудительная конвекция происходит, например, при взаимодействии воздушных масс различной температуры.

Высокое содержание влаги в воздухе также необходимо для образования грозового облака, так как влага конденсируется при подъеме воздуха и образует облака.

Положительная энергия неустойчивости в тропосфере говорит о наличии неустойчивого воздуха, который легко поднимается при конвекции и образует грозовые облака.



Вертикальный градиент температуры также важен, так как при его наличии воздух поднимается быстрее и энергичнее, способствуя развитию грозовых облаков.

Таким образом, грозы и грозовые облака формируются при определенных условиях, которые способствуют интенсивному вертикальному движению воздуха и образованию облаков с дождем и грозами.

Грозовые облака содержат смешанный состав из капель воды, кристаллов льда и снежинок из-за различий в температуре на разных уровнях облака. Температура на верхней границе облака может быть очень низкой, что приводит к образованию кристаллов льда и снежинок. На нижних уровнях облака, температура обычно составляет  $+5...+10$  °С, что способствует образованию капель воды.

Также, при развитии конвективного облака можно выделить три основных уровня:

1. Уровень конденсации - это первый уровень, который практически совпадает с нижним краем облака. Он отмечает начало конденсации пара воды в виде облака.

2. Нулевой уровень изотермы - это второй уровень, который разделяет переохлажденную верхнюю часть облака от неохлажденной нижней части. Этот уровень играет важную роль в формировании структуры облака.

3. Уровень свободной конвекции - это третий уровень, который практически совпадает с верхней границей облака. На этом уровне вертикальные движения воздуха остаются свободными, что создает энергию неустойчивости и способствует дальнейшему развитию облака и, возможно, грозовой активности. Эти уровни помогают лучше понять структуру и развитие грозовых облаков.

Этапы образования грозового облака, описанные, объясняют процесс развития кучево-дождевого облака от начала до конца. Разделение на этапы помогает понять, как формируются грозовые облака и как происходит процесс грозы. Важно знать характеристики каждого этапа, чтобы лучше понять

механизмы и факторы, влияющие на формирование и разрушение грозовых облаков.

Продолжительность поиска грозовой тучи от 3 до 5 часов также интересный факт, который показывает, что процесс формирования грозы это длительный и сложный процесс, который требует времени для развития на рисунке 1.1 показана схема циркуляции в кучевом дождевом облаке (вторая стадия)

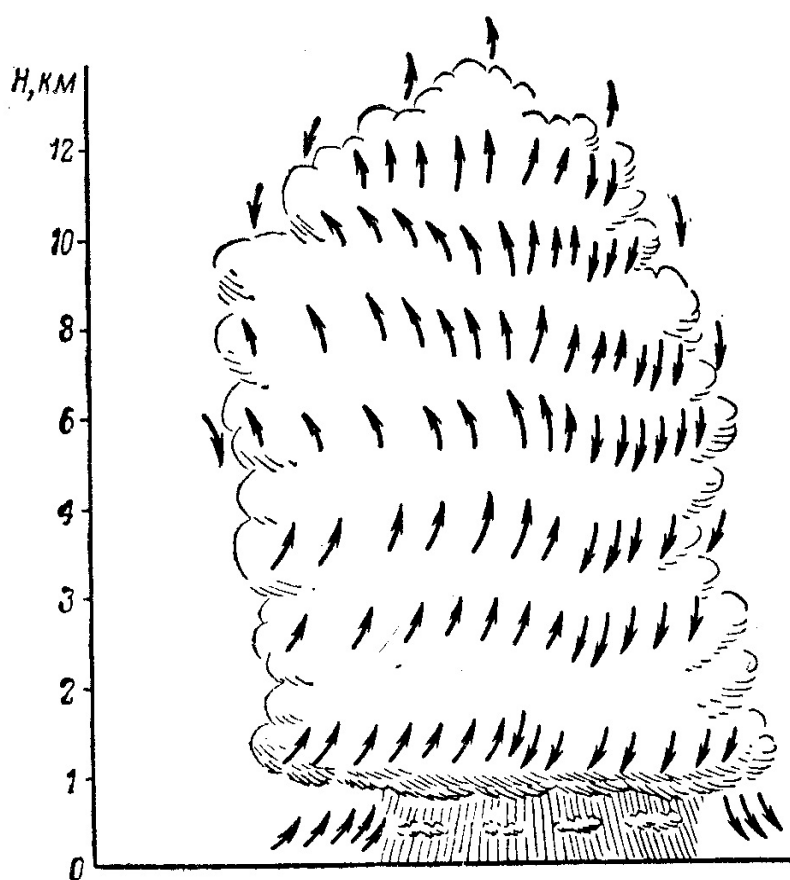


Рисунок 1.1 - Схема циркуляции в кучево-дождевом облаке(вторая стадия)

Представление о циркуляции в разрушающемся кучево-дождевом облаке (третья стадия) дает рисунок 1.2.

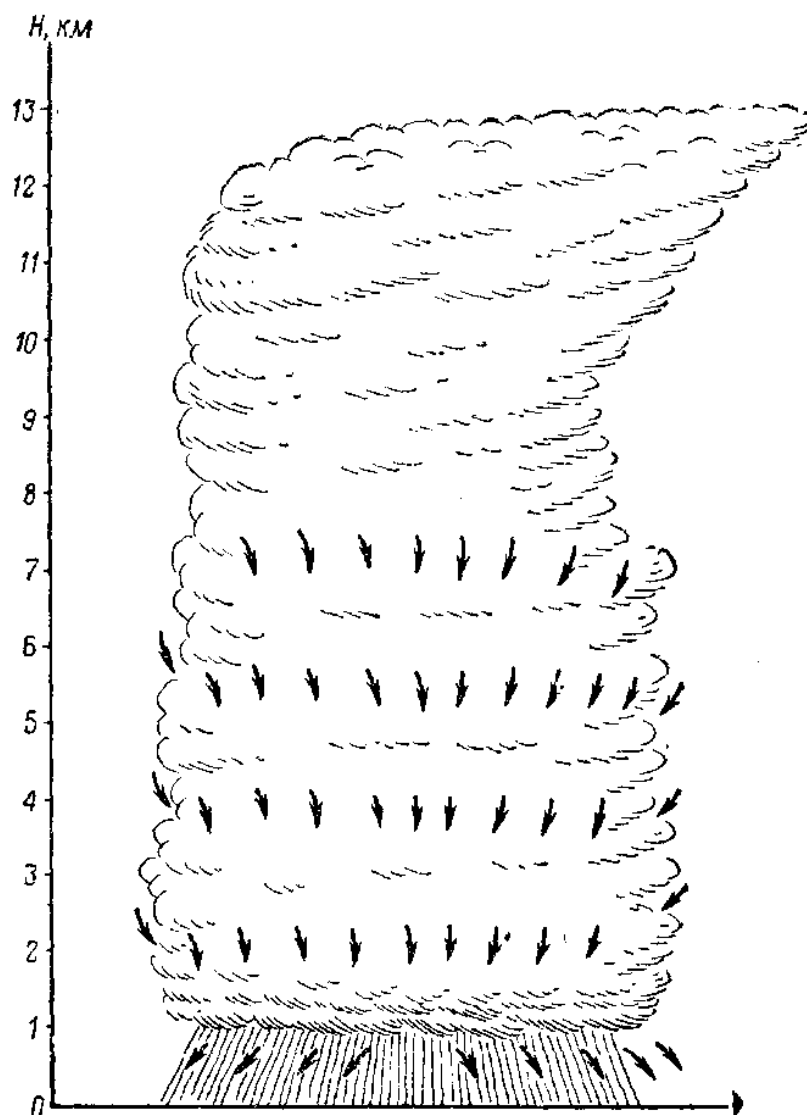


Рисунок 1.2 - Схема циркуляции в разрушающемся кучево-дождевом облаке  
(третья стадия)

### 1.3. Синоптические условия образования гроз.

Теплые фронты вызывают более слабые грозы, чем холодные фронты, так как на них обычно преобладает слабая вертикальная неустойчивость. В то же время, грозы над теплыми фронтами окклюзии могут быть очень интенсивными и длительными, так как воздушные массы с различными свойствами смешиваются в этой зоне.

Следует помнить, что грозы - это опасные метеорологические явления, которые сопровождаются молниями, громом, сильным ветром и иногда градом.

Продолжительность гроз в разных районах разная: от нескольких минут до нескольких часов. Наибольшая частота гроз наблюдается в тропических регионах. В умеренных широтах частота гроз составляет от 10 до 30 дней в году.

Как правило, грозы наблюдаются в умеренных широтах в теплое время года. Однако наблюдаемое потепление климата приводит к частым грозам даже зимой.

Можно наблюдать долготные особенности в распределении гроз: на севере Беларуси полюса с низким количеством дней с грозами расположены между 28 и 31° восточной долготы. Второй минимум грозовой активности замечен в северо-западной части страны, включая Вилейский, Докшицкий и Ошмянский районы.

Изучая временную изменчивость, можно отметить, что с декабря по февраль грозы являются довольно редким явлением, их частота за пятилетний период не превышает 1-2 дней в январе-феврале, а в декабре грозы встречаются крайне редко – всего один день за 10 лет. За последние десятилетия частота зимних гроз существенно увеличилась, особенно начиная с середины 80-х годов XX века, что связано с потеплением климата.

В марте-апреле число дней с грозами увеличивается до 3-5 за пятилетний период, хотя в период 1996-2000 годов были годы с более чем 10 грозами. В мае-августе количество гроз существенно возрастает, в некоторые годы достигая 22 дней. Сентябрь-октябрь характеризуются снижением количества гроз, но с 2006 года наблюдается небольшой рост. Ноябрь обычно имеет 1-2 дня с грозами, а изменения в частоте гроз в этом месяце напоминают тенденции января и февраля.

Анализируя временные изменения среднегодового общего количества дней с грозами на всех метеостанциях Беларуси, можно выделить 3 максимума повторяемости гроз: в 1950-х годах, в конце 1990-х - начале 2000-х годов и в 2010-2011 годах – самый высокий из них. Эти максимумы в основном связаны с благоприятными температурными условиями, так как эти годы были одними из самых теплых на планете.

#### 1.4 Условия возникновения зимних гроз

В настоящее время зимние грозы стали более распространенными, встречаясь по несколько раз ежегодно. Это обусловлено началом самого продолжительного периода потепления на территории Беларуси с 1989 года. Среднегодовая температура за последние 30 лет увеличилась в среднем на 1.2 °С, с наибольшими повышениями в зимний период. Зимняя (снежная) гроза также представляет опасное метеорологическое явление, при котором могут выпадать осадки в виде ледяного снега, ледяного дождя или ледяной крупы. Однако стоит отметить, что в настоящее время зимние грозы зачастую сопровождаются выпадением жидких осадков.

Средняя частота зимних гроз на территории Беларуси составляет один раз в 5-10 лет для каждого зимнего месяца, что делает это явление довольно редким. Однако иногда зимние грозы все же случаются, например в Могилеве и Ганцевичах в январе 1983 года, в Ивацевичах в феврале 1990 года, а также в Гомеле и Славгороде в феврале 1999 года. Такие случаи зимних гроз также упоминаются в старинных русских летописях.

Кроме того, наблюдение и документирование случаев зимних гроз важно для дальнейшего изучения этого редкого феномена и его влияния на климат и окружающую среду. Только с дополнительными данными и

исследованиями можно полностью понять и прогнозировать воздействие изменений климата на подобные явления.

Увеличение частоты зимних гроз может быть связано с глобальными изменениями климата и повышением температуры воздуха. Эти изменения могут создавать более нестабильные атмосферные условия, способствующие образованию гроз и других экстремальных погодных явлений, даже в зимний период.

Одним из основных факторов, способствующих возникновению зимних гроз, является теплая и влажная воздушная масса, которая поступает из тропиков. При встрече этой воздушной массы с холодным воздухом, образуется атмосферный фронт, что способствует конвекции и образованию гроз.

Также изменения в струйных течениях могут играть важную роль в возникновении зимних гроз. Сильные ветры на высоких уровнях атмосферы могут создавать нестабильность и способствовать образованию грозовых облаков.

Кроме того, наличие теплых водных поверхностей, таких как реки, озера или моря, может также способствовать возникновению зимних гроз. Теплые поверхности воды могут нагреваться быстрее, чем окружающий воздух, что создает дополнительную тепловую энергию и помогает в формировании грозовых облаков.

Таким образом, для возникновения зимних гроз необходимо сочетание различных метеорологических условий, которые способствуют образованию грозовой активности даже в холодное время года.

С учетом этих факторов важно обращать внимание на изменения в климате и погодных условиях, особенно в отношении зимних гроз, чтобы быть готовыми к возможным экстремальным ситуациям и принимать необходимые меры предосторожности. Дополнительные исследования и мониторинг погоды помогут лучше понять и прогнозировать подобные явления в будущем.

## 2 СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ЗИМНИХ ГРОЗАХ ЗА ПЕРИОД 1989-2020 ПО АЭРОДРОМУ МИНСК

### 2.1. Физико-географическое положение и климатические особенности рельефа, способствующие образованию гроз в г.Минске.

Физико-географические особенности местности могут значительно влиять на грозовую активность. Например, даже небольшие возвышенности или горы могут способствовать увеличению грозовой активности из-за более сильной турбулентности воздушных масс и образования конвективных потоков. Горные районы с их динамической турбулентностью и восходящими потоками могут быть особенно подвержены грозам, особенно на ветреных склонах, обращенных к влажным ветрам. С другой стороны, закрытые долины и низменности обычно имеют меньшую грозовую активность из-за менее благоприятных условий для образования грозовых процессов. Например, на мелководных побережьях морей грозовая активность может быть ниже из-за влияния летнего морского бриза, который принесет относительно прохладный воздух и не стимулирует образование восходящих конвективных потоков. Таким образом, понимание географических особенностей и их влияния на климат и погодные явления, включая грозы, важно для прогнозирования и понимания погоды в конкретных регионах.

Таким образом, климат в районе аэропорта Минск умеренно-континентальный с влиянием атлантического моря, с теплым летом и мягкой зимой. Городской промышленности влияние на погоду в районе аэропорта практически не ощущается. Рельеф и географическое положение также способствуют умеренной грозовой активности.

## 2.2 Материалы и методы исследования

Для анализа были использованы необработанные данные о количестве случаев опасных конвективных явлений, а также соответствующие наземные и высотные метеорологические данные. Исследование сосредоточилось на зимних грозах и связанных с ними явлениях в холодное время года. Для анализа были использованы аэронавигационные и метеорологические наблюдения, проведенные на аэродроме Минск с октября по март в период с 1989 по 2020 год. Полученные данные позволили выявить взаимосвязи и закономерности, которые послужили основой для разработки рекомендаций по прогнозированию опасных конвективных погодных явлений в холодное время года.

Выбор Минского аэродрома для проведения исследований обусловлен большим объемом доступного фактического материала, накопленного на этом объекте в течение длительного времени. Это позволяет провести более глубокий и качественный анализ данных. Также важным фактором при выборе этого места является его значимость для авиации. Начало исследований в 1989 году объясняется тем, что в этот период в Беларуси начался один из самых продолжительных периодов потепления, сопровождающийся резким повышением зимних температур.

Путем использования погодных дневников AV-6 и анализа метеорологических данных удалось выявить опасные конвективные явления холодного сезона, такие как зимние грозы, сильные ливни, штормовые ветры, а также связанные с ними метеорологические условия. Исследование проводилось на основе данных из архивов Белгидромета, интернет-портала Wetter 3 и других источников. Это позволило выявить взаимосвязи и закономерности, необходимые для разработки рекомендаций по прогнозированию опасных погодных явлений в холодное время года на территории Минского аэродрома.



Эти данные помогли выявить взаимосвязь между аэросиноптическими ситуациями, атмосферными условиями и возникновением зимних гроз. Исследование показало, что зимние грозы чаще возникают в условиях слабой циркуляции воздуха и присутствия фронтальных зон, что способствует развитию конвекции. Важным фактором для формирования зимних гроз является также наличие влаги и тепла в воздухе на различных высотах, что способствует образованию облаков и последующему развитию грозовой активности.

Данное исследование позволяет более точно прогнозировать возможное возникновение зимних гроз и предупреждать население об опасности таких явлений. Такой анализ погодных карт высадки становится все более важным в контексте изменения климата и возможного увеличения числа экстремальных погодных явлений в будущем.

Результаты анализа исходной информации позволили установить важные взаимосвязи между аэросиноптическими условиями и образованием опасных конвективных явлений, включая зимние грозы. Эти выявленные связи и закономерности послужили основой для разработки рекомендаций по прогнозированию и предупреждению потенциально опасных погодных явлений.

Для выполнения работы были применены различные методы обработки данных и анализа информации, включая статистический анализ многолетних массивов метеорологических данных, методы синтеза и анализа аэросиноптической информации, а также наблюдения и личный опыт в области метеорологии авиации. Эти методы совместно способствовали получению ценной информации о процессах, приводящих к образованию опасных конвективных явлений в период холодного времени года.

Действительно, результаты данного исследования позволят провести анализ рисков и опасностей, связанных с зимними грозами, и разработать рекомендации для улучшения прогнозирования и предупреждения подобных явлений. Этот анализ является важным шагом в понимании и прогнозировании

экстремальных погодных явлений, что имеет большое значение для обеспечения безопасности населения и развития экономики. Результаты и рекомендации данного исследования смогут быть использованы для улучшения системы мониторинга и предупреждения опасных погодных явлений в зимний период на территории, где проводилось исследование.

### 2.3 Статистические данные о грозах

Таблица 2.1 - Статистические данные о грозах в период октябрь- март по аэродрому Минск за период 1989-2020 г.г

Год	январь	февраль	март	октябрь	ноябрь	декабрь	За период январь-март, октябрь- декабрь
1990	1	1	1				3
1996				1			1
2002		1					1
2003				1			1
2004				1			1
2005			1				1
2006				1			1
2008		1	1				2
2009				1			1
2010					1		1
2011				1			1
2012				1			1
2020			1	1			2

Из предоставленной информации видно, что в период 1989-2020 годов большинство случаев зимних гроз отмечалось в октябре (8 случаев), а наименьшее количество - в январе и ноябре (по 1 случаю). В декабре за исследуемый период вообще не было наблюденно ни одной грозы. Наибольшее

количество гроз (2-3 случая) за холодный период было зафиксировано в 1989, 2008 и 2020 годах.

Эти данные могут быть полезными для выявления паттернов и закономерностей в возникновении зимних гроз в указанный период. Подробный анализ каждого случая может помочь в понимании факторов, способствующих образованию зимних гроз в разные месяцы и года, а также в разработке методов прогнозирования и предотвращения таких явлений. Важно учитывать эти данные при планировании мероприятий по обеспечению безопасности и защите от негативного воздействия зимних гроз.

Страницы 20-32 не публикуются, так как являются составной частью другого исследования

## 4 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРОЗ

### 4.1 Индексы неустойчивости

Прогноз грозовой активности тесно связан с оценкой атмосферной неустойчивости. Согласно адиабатическим моделям конвекции, возникновение неустойчивости воздушных масс в конвективных облаках зависит от разницы в температуре между облаками и окружающим воздухом, влажности воздушной массы и сдвигов ветра в зонах кучево-дождевой облачности. Оценка атмосферной неустойчивости проводится с помощью различных индексов неустойчивости в различных слоях тропосферы и используется для прогнозирования опасных конвективных явлений, включая грозовую активность. Рассмотрим несколько видов индексов неустойчивости.

$K_i$  - индекс неустойчивости.

Расчет индекса  $K_i$  основан на вертикальном градиенте температуры и влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. Индекс  $K_i$  отражает степень конвективной неустойчивости воздушной массы, необходимой для возникновения и развития гроз. Его расчет производится по определенной формуле.

$$K_i = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - \Delta T_{d700}. \quad (4.1.1)$$

где:  $K_i$  — индекс неустойчивости (число Вайтинга),

$T_{850}$  — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

$T_{500}$  — температура воздуха на 500 гПа,

$T_{d850}$  — температура точки росы на 850 гПа,

$\Delta T_{d700}$  — дефицит точки росы ( $T - T_d$ ) на поверхности 700 гПа.

$VT$  — Vertical Totals индекс.  $VT$  - индекс рассчитывается по формуле:

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (4.1.2)$$

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

Если  $VT > 26$ , следовательно тропосфера обладает высоким потенциалом конвективной неустойчивости, достаточным для образования гроз.

СТ - Cross Totals индекс. Индекс СТ рассчитывается по формуле:

$$СТ = T_{d850} - T_{500} \quad (4.1.3)$$

где  $T_{d850}$  — температура точки росы на 850 гПа,

$T_{500}$  — температура воздуха на 500 гПа.

SWEAT — Severe Weather ThrEAT.

Индекс SWEAT - это индекс неустойчивости, разработанный ВВС США. SWEAT - это комплексный критерий для диагностики и прогнозирования опасных погодных явлений, связанных с конвективной облачностью, и включает в себя индекс неустойчивости воздушной массы, скорость и сдвиг ветра. Расчет производится по специфической формуле.

$$SWEAT = 12 \cdot T_{d850} + 20 \cdot (TT - 49) + 3.888 \cdot F_{850} + 1.944 \cdot F_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0.2]) \quad (4.1.4)$$

$T_{d850}$  — температура точки росы на 850 гПа,

TT — Total Totals индекс,  $F_{850}$  — скорость ветра на 850 гПа,

$F_{500}$  — скорость ветра на 500 гПа,

$D_{500}$  и  $D_{850}$  — направление ветра на соответствующих поверхностях.

#### 4.2 Расчет индексов неустойчивости для прогноза гроз на примере аэродрома Минск

Расчет проводился по данным аэрологических наблюдений. Прогноз гроз рассчитывался по трем индексам неустойчивости для каждого случая гроз: Vertical Total индекс, Cross Total индекс и Thompson индекс.

26 января 1990 год

Индекс неустойчивости VT — Vertical Totals

$$VT = T850 - T500.$$

Изобарическая поверхность 850 гПа; T = -3.9 TD = -28.9

Изобарическая поверхность 700 гПа T = -12,5 TD = -21.5

Изобарическая поверхность 500гПа T = -28.9 VT=25

VT<26 – неустойчивость атмосферы недостаточна для образования грозы.

1. Индекс неустойчивости TT- Total totals

$$TT = T850+Td850-2T500 \quad TT=66.3. \quad TT>44 \quad - \quad \text{грозы}$$

прогнозируются.

2. Индекс неустойчивости Thompson

$$KO = T850-2T500+TD850-(T700-TD700)+T500=69.2 \quad KO>18, \quad \text{грозы}$$

прогнозируются

8 октября 2009 год

Индекс неустойчивости VT — Vertical Totals

$$VT = T850 - T500.$$

Изобарическая поверхность 850 гПа; T=10,2 TD = 9,5

Изобарическая поверхность 700 гПа T = 2,8 TD = -5,2

Изобарическая поверхность 500гПа T = -14,5 TD=-18,6

VT = 27,9 > 26 грозы прогнозируются.

Индекс неустойчивости TT- Total totals

$$TT = T850+Td850-2T500 \quad TT=48,7 \quad TT>44 \quad - \quad \text{грозы}$$

прогнозируются.

Индекс неустойчивости Thompson

$$KO = T850-2T500+TD850-(T700-TD700)+T500=26.2 \quad KO>18, \quad \text{грозы}$$

прогнозируются.

10 ноября 2011 год

Индекс неустойчивости VT — Vertical Totals

$$VT = T850 - T500.$$

Изобарическая поверхность 850 гПа; T =5,0 TD = -7,0

Изобарическая поверхность 700 гПа T = -6,7 TD = -13,7

Изобарическая поверхность 500гПа T = -24,7 TD=-34,7

VT = 29,7 > 26 грозы прогнозируются.

Индекс неустойчивости TT- Total totals

TT = T850+Td850-2T500 TT=47,4 TT>44 – грозы

прогнозируются.

Индекс неустойчивости Thompson

KO = T850-2T500+TD850-(T700-TD700)+T500=40,0 KO>18, грозы

прогнозируются.

12 марта 2020 год

Индекс неустойчивости VT — Vertical Totals

VT = T850 - T500.

Изобарическая поверхность 850 гПа; T =4,0 TD = 2,1

Изобарическая поверхность 700 гПа T =-1,9 TD = -21,9

Изобарическая поверхность 500гПа T = -18,9 TD=-29,9

VT = 22,9 < 26 грозы не прогнозируются.

Индекс неустойчивости TT- Total totals

TT = T850+Td850-2T500 TT=43.9 TT<44 – грозы

прогнозируются.

Индекс неустойчивости Thompson

KO = T850-2T500+TD850-(T700-TD700)+T500=5 KO<18, грозы не

прогнозируются.

14 октября 2020 год

Индекс неустойчивости VT — Vertical Totals

VT = T850 - T500.

Изобарическая поверхность 850 гПа; T =-0,5 TD = -0,6

Изобарическая поверхность 700 гПа T =-6,3 TD = -6,4

Изобарическая поверхность 500гПа T = -16,3 TD=-16,9

VT = 15,8 < 26 грозы не прогнозируются.

Индекс неустойчивости TT- Total totals



$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$   $TT=31,5$   $TT < 44$  – грозы не прогнозируются.

Индекс неустойчивости Thompson

$KO = T_{850} - 2T_{500} + T_{D850} - (T_{700} - T_{D700}) + T_{500} = 15,1$   $KO < 18$ , грозы не прогнозируются.

Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что наиболее лучшие результаты оказались при расчете по индексам неустойчивости Total totals и Thompson (из 17 случаев прогнозировалось 9 случаев). Индекс неустойчивости Vertical Totals при прогнозировании гроз менее эффективен (лишь в 4 случаях из 17 прогнозировались грозы).

В исследуемый период проводилась также расчеты прогноза гроз по индексам неустойчивости в периоды, когда отмечалось прохождение фронта окклюзии, но грозы не регистрировались. Расчеты проводились по тем же индексам неустойчивости, что и при наблюдавшихся грозах. Расчеты показали, что лишь в одном случае из 17 по всем трем индексам неустойчивости прогнозировалась гроза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зимние грозы действительно являются редким явлением, особенно в более холодные месяцы, такие как декабрь и январь. Однако, изменение климата в сторону потепления может привести к увеличению числа гроз в холодный период с октября по март. Эта тенденция может быть связана с более высокими температурами воздуха, изменениями во влажности и другими факторами, которые способствуют формированию грозовой активности.

Анализ данных о происхождении зимних гроз на аэродроме в Минске в период с 1989 по 2020 год показал, что за этот период было зафиксировано 17 случаев зимних гроз. Интересно отметить, что в условиях современного изменения климата наблюдается тенденция к увеличению зимних гроз и связанных с ними феноменов, таких как сильные осадки и порывистый ветер.

Важно продолжать анализировать и мониторить климатические изменения и частоту гроз в различные периоды года, чтобы лучше понять влияние изменяющихся климатических условий на атмосферные явления и подготовиться к возможным неблагоприятным последствиям для общества и окружающей среды.

Эти факторы создают условия для формирования теплого фронта, который в свою очередь приводит к атмосферным неустойчивостям и образованию грозовых явлений. В холодное время года грозы могут быть более интенсивными из-за более резкого контраста температур и влажности воздуха. Также в холодное время года воздух может более быстро охлаждаться с высотой, что способствует вертикальному подъему и образованию облачности, необходимой для развития грозы.

1. Температура и видимость: высокие температуры с интенсивными дождями или температура около 0 °С во время сильного снегопада могут быть индикаторами предстоящей зимней грозы. Ухудшение видимости также может быть признаком приближения грозы.

2. Осадки: большинство зимних гроз сопровождаются осадками, поэтому важно учитывать информацию о наличии осадков при прогнозировании возможного возникновения грозы.

3. Волны на холодных фронтах: интенсификация волновых возмущений на холодных фронтах может способствовать образованию зимних гроз. Поэтому важно следить за данными о волновых явлениях.

4. Активные сегменты фронта: зимние грозы чаще возникают на активных участках фронта, поэтому важно мониторить движение фронтов и изменения в атмосферном давлении.

Учитывая все эти факторы и критерии, метеорологи могут делать более точные прогнозы зимних гроз и предупреждать о возможных опасных явлениях в зимний период, что поможет улучшить безопасность населения и предприятий. Так как зимние грозы могут быть сопровождаемы сильными осадками, усилением ветра и ограничением видимости, что может привести к чрезвычайным ситуациям на дорогах, воздушном и морском транспорте, а также повреждению строений и сельскохозяйственных угодий. Уточненные прогнозы позволят принимать своевременные меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций и минимизации ущерба.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подгорная ЕВ, Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия. Труды Гидрометцентра России. 2015;358:112–120.
2. Юсупов ЮИ. Прогноз шквалов и интенсивных осадков с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля [диссертация]. Москва: [б. и.]; 2021. 129 с.
3. Смирнов СЭ, Михайлов ЮМ, Михайлова ГА, Капустина ОВ. Особенности зимних гроз на Камчатке. Геомагнетизм и аэрономия. 2019;59(6):742–749.
4. Montanya J, Fabró F, van der Velde O, March V, Williams ER, Pineda N, et al. Global distribution of winter lightning: a threat to wind turbines and aircraft. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016;16(6):1465–1472. DOI: 10.5194/nhess-16-1465-2016.
5. Schultz DM, Vavrek RJ. An overview of thundersnow. *Weather*. 2009;64(10):274–277. DOI: 10.1002/wea.376.
6. Market PS. Upper air constant pressure composites of midwestern thundersnow events [Internet]. In: *Proceedings of the 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting / 16th Conference on Numerical Weather Prediction*; 2004 January 12–16; Seattle, USA. Seattle: American Meteorological Society; 2004 [cited 2021 September 29]. Available from: <http://solberg.snr.missouri.edu/ROCS/pub/WAF2004-TSSN-COMP.pdf>.
7. Crowe C, Market P, Pettegrew B, Melick C, Podzimek J. An investigation of thundersnow and deep snow accumulations. *Geophysical Research Letters*. 2006;33(24):L24812. DOI: 10.1029/2006GL028214.
8. Market PS, Oravetz AM, Gaede D, Bookbinder E, Lupo AR, Melick CJ, et al. Proximity soundings of thundersnow in the central United States. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2006;111(D19):D19208. DOI: 10.1029/2006JD007061.

9. Market PS, Halcomb CE, Ebert RL. A climatology of thundersnow events over the contiguous United States. *Weather and Forecasting*. 2002;17(6):1290–1295. DOI: 10.1175/1520-0434(2002)0172.0.CO;2.

10. Rosenow AA, Plummer DM, Rauber RM, McFarquhar GM, Jewett BF, Leon D. Vertical velocity and physical structure of generating cells and convection in the comma head region of continental winter cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2014;71(5):1538–1558. DOI: 10.1175/JAS-D-13-0249.1.

11. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ИН. Сравнение пространственно-временных особенностей изменений опасных метеорологических явлений в характерное и не характерное для них время года. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Гаврильчик АП, Волчек АА и др., редакторы. *Природопользование*. Выпуск 19. Минск: А. Н. Вараксин; 2011. с. 5–21.

12. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ИН. Изменчивость числа дней с грозами на территории Беларуси. В: Логинов ВФ, редактор. *Природопользование*. Выпуск 12. Минск: Тонпик; 2006. с. 33–39.

13. Шпока ИН. Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси [диссертация]. Брест: [б. и.]; 2011. 210 с. 55 География Geography

14. Логинов ВФ, Бровка ЮА, Микуцкий ВС. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б. Л. Дзерdzeевскому. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Волчек АА, Кадацкая ОВ и др., редакторы. *Природопользование*. Выпуск 24. Минск: Минсктиппроект; 2013. с. 5–10.

15. Мельник ВИ, Буяков ИВ, Чернышев ВД. Изменения количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата. *Природопользование*. 2019;2:44–51.

16. Сумак ЕН, Семёнова ИГ. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси. *Журнал Белорусского*

государственного университета. География. Геология. 2019;2:79–93. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93. 17. Мальчик МК. Рекомендации по прогнозу гроз в осенне-зимний период. Минск: САМО РАМЦ; 2006. 41 с.

18. Воробьев ВИ. Синоптическая метеорология. Ленинград: Гидрометеиздат; 1991. 616 с. 19. Лукша МВ. Анализ и прогноз зимних гроз на примере аэродрома Минск. В: Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий; 24–26 ноября 2021 г.; Иркутск, Россия. Иркутск: Издательство ИГУ; 2021. с. 297–305.

20. Лукша МВ. Анализ и прогноз гроз в холодный период года на примере аэродрома Минск. В: Гайсёнок ВА, Василевская ЕИ, Григорьева ОН, Евтушенко НВ, редакторы. Фундаментальная наука и образовательная практика. Материалы I Республиканской научно-методической конференции «Актуальные проблемы современного естествознания»; 2 декабря 2021 г.; Минск, Беларусь. Минск: РИВШ; 2021. с. 49–53.

21. Пастух В.П. Грозы и град на территории СССР. – Труды ГГО, 1957, вып. 74 - с. 47.

22. Прогноз гроз, шквалов. Методическое пособие. Минск, «Республиканский гидрометцентр», 1984 г.

23. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1977 – с. 533-540.

24. Баранов А.М., Иоффе М.М. Авиационная метеорология. – М.: Военное издательство. 1971 – с. 211-216.

25. Заболотников Г.В. Влияние гроз, смерчей и шквалов на деятельность авиации. Методическая разработка по учебной дисциплине «Авиационная метеорология». – С-П. 2006.

26. Баранов А.М. Облака и безопасность полетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1983 - с. 137-142.

27. Лапина С.Н. Классификация метеорологических прогнозов, их оправдываемость и оценка экономической полезности. – Лекция по дисциплине «Прикладная метеорология». Саратов, 2014.

28. Лепешко В.Н. Рекомендации к прогнозу гроз. - Минск, Республиканский гидрометцентр. 1984 - с. 7.

29. Савиковский И.А. Климат Могилева. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.

30. Хандожко Л.А. Метеорологическое обеспечение народного хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1981 – с. 146-148.

31. Топорикова Е.Н. Топтунова О.Н. Эталонные поля давления для туманов в районе акватории Печорского моря // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: Материалы VII Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 24-26 мая 2022 года. С. 148-151

32. Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Л.М. К вопросу обобщения гидрометеорологической информации // Известия Саратовского гос. ун-та. Новая серия. – 2004. – Т.4, № 1-2. – С. 157–161