



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: «Перемещение внутримассовых гроз в районе аэропорта Пулково»

Исполнитель Васильева Марианна Александровна
(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	2
1 Факторы образования гроз.....	4
1.1. Образование грозовых облаков	4
1.2. Классификация грозовых явлений	6
2 Особенности климата и рельефа исследуемой территории	9
2.1 Климатические особенности.....	9
2.2 Географическое положение	12
2.3 Орографические и ландшафтные особенности района аэропорта Пулково.....	13
2.4 Микроклиматические особенности Санкт-Петербурга и аэродромной территории	16
3 Методы прогнозирования перемещения внутримассовых гроз	20
3.1 Метод среднего вектора ветра	20
3.2 Методика прогнозирования перемещения внутримассовых грозовых облаков и зон осадков с помощью корреляционной функции	22
3.3 Доплеровский метеорологический радиолокатор и способы его применения для прогнозирования перемещения внутримассовых гроз ..	25
4 Исходные данные и анализ случаев внутримассовых гроз в районе аэропорта Пулково	31
4.1 Данные, представленные для анализа	31
4.2 Анализ данных с расчетом корреляционной связи	32
Заключение	40
Список литературы	42
Приложение 1	44

ВВЕДЕНИЕ

Грозовая деятельность представляет собой одно из наиболее опасных явлений погоды, оказывающих существенное влияние на авиационные операции, особенно в районе аэропортов. Внутримассовые грозы, формирующиеся в результате мощной конвекции в однородной воздушной массе, характеризуются сложной пространственно-временной изменчивостью, что создает значительные трудности для их краткосрочного прогнозирования. В условиях аэропорта Пулково, являющегося важнейшим транспортным узлом Северо-Западного региона России, точное прогнозирование траекторий перемещения грозовых очагов приобретает особую актуальность, поскольку позволяет минимизировать риски для авиационной безопасности и снизить экономические потери, связанные с задержками и отменами рейсов.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью уточнения метода прогнозирования перемещения внутримассовых гроз, основанного на данных о среднем ветре, на основе данных доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ) и аэрологического зондирования атмосферы. Традиционные методы экстраполяции грозовых ячеек, основанные на постоянстве скорости и направления их движения, часто оказываются недостаточно точными из-за сложной мезомасштабной динамики атмосферных процессов. В этой связи особый интерес представляет исследование взаимосвязи между характеристиками ветра, измеряемыми ДМРЛ в нижних слоях атмосферы, и средним ветром в слое 700-500 гПа, который в метеорологической практике часто рассматривается как ведущий поток, определяющий перемещение конвективных образований.

Основной целью данной работы является детальное исследование корреляционной связи между направлением и скоростью ветра по данным ДМРЛ и в слое 700-500 гПа для прогнозирования траекторий перемещения внутримассовых гроз в районе аэропорта Пулково.

Новизна работы — в сочетании методов изучения грозových траекторий с детальным анализом ветра на разных высотах.

Теоретическая значимость работы состоит в углублении понимания механизмов переноса конвективных ячеек в условиях средней полосы России, а практическая ценность — в возможности использования полученных результатов для совершенствования алгоритмов краткосрочного прогнозирования опасных явлений погоды в авиационной метеорологии.

Методологическую основу исследования составляют методы корреляционного анализа и современные технологии обработки радиолокационных данных. Исходными данными послужили материалы наблюдений ДМРЛ аэропорта Пулково и результаты аэрологического зондирования за период 2009-2014 гг.

Проведенное исследование вносит вклад в решение актуальной научно-практической задачи по повышению точности прогнозирования опасных явлений погоды и может быть использовано метеорологическими службами аэропортов, а также в оперативной работе региональных подразделений Росгидромета. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего развития методов сверхкраткосрочного прогнозирования грозовой активности с учетом местных орографических и климатических особенностей.

1 ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГРОЗ

1.1. Образование грозовых облаков

Кучево-дождевые (конвективные) облака представляют собой обособленные облачные скопления с выраженным вертикальным развитием и относительно небольшой горизонтальной протяженностью. Их формирование обусловлено главным образом термической конвекцией и турбулентным перемешиванием воздушных масс.

Конвективные процессы возникают из-за локального перегрева воздуха при неустойчивой стратификации приземных слоев атмосферы. Наиболее благоприятные условия для конвекции складываются над сушей в теплое время года, особенно в дневные часы. Под воздействием солнечной радиации у поверхности земли формируется температурная неустойчивость, что приводит к восходящему движению нагретых воздушных масс.

До достижения уровня конденсации ($Z_{\text{конд}}$), где относительная влажность воздуха достигает 100%, поднимающиеся потоки охлаждаются по сухой адиабате. При наличии крупных ядер конденсации насыщение может наступить несколько раньше. После прохождения $Z_{\text{конд}}$ дальнейший подъем воздуха происходит по влажной адиабате, сопровождаясь конденсацией водяного пара и образованием облаков.

Грозой называют атмосферное явление, характеризующееся электрическими разрядами (молниями) между облаками или между облаком и землей, а также акустическими эффектами (громом), вызванными резким расширением воздуха в канале разряда. Если осадки отсутствуют, такое явление классифицируют как «сухую грозу». Грозы относятся к категории наиболее опасных метеорологических явлений, представляющих угрозу для авиации, энергетики и других сфер деятельности.

Грозовое положение – особый синоптический режим, характеризующийся развитием мощной кучевой или кучево-дождевой облачности при вероятности грозообразования 30-40%. В любой момент

времени на Земле наблюдается около 1500 грозовых очагов, при этом частота молниевых разрядов достигает в среднем 100 разрядов в секунду [1].

Грозовая активность демонстрирует выраженную географическую вариабельность. Наблюдается десятикратное превышение частоты гроз над континентальными территориями по сравнению с акваториями океанов. Более трёх четвертей (78%) всех зарегистрированных молниевых разрядов локализуются в тропической зоне (30°с.ш. - 30°ю.ш.), с абсолютным максимумом в Центральноафриканском регионе. В высокоширотных областях (Арктика и Антарктика) грозовые явления относятся к крайне редким событиям [1].

Временная динамика грозообразования обнаруживает чёткую связь с солнечной инсоляцией:

- В умеренных широтах пик активности отмечается в летние месяцы с максимумом в послеполуденные часы.
- Минимальные значения фиксируются в предрассветный период.

Орографический фактор играет существенную роль в формировании грозовых очагов. Наибольшая интенсивность процессов грозообразования характерна для высокогорных районов, особенно в Гималайском и Кордильерском горных массивах [3].

Стадии эволюции грозовых облаков (Рис. 1)

В процессе своего развития грозовые облака последовательно проходят три четко выраженные стадии, каждая из которых характеризуется специфическими метеорологическими параметрами и визуальными особенностями:

- 1) Стадия начального развития – представлена формирующимися кучевыми (*Cumulus humilis*) и мощно-кучевыми (*Cumulus congestus*) облаками, которые отличаются активным вертикальным ростом при относительно небольшой горизонтальной протяженности.
- 2) Стадия максимального развития – на этом этапе облако трансформируется в зрелую кучево-дождевую форму (*Cumulonimbus*) с

вертикальной мощностью 9-12 км и более. Именно в этой фазе наблюдаются наиболее интенсивные осадки в виде ливней, часто сопровождающиеся градом и шквалистым ветром.

- 3) Стадия разрушения – характеризуется постепенным размыванием облачной структуры снизу вверх с преобладанием нисходящих воздушных потоков, что приводит к распаду грозового очага.

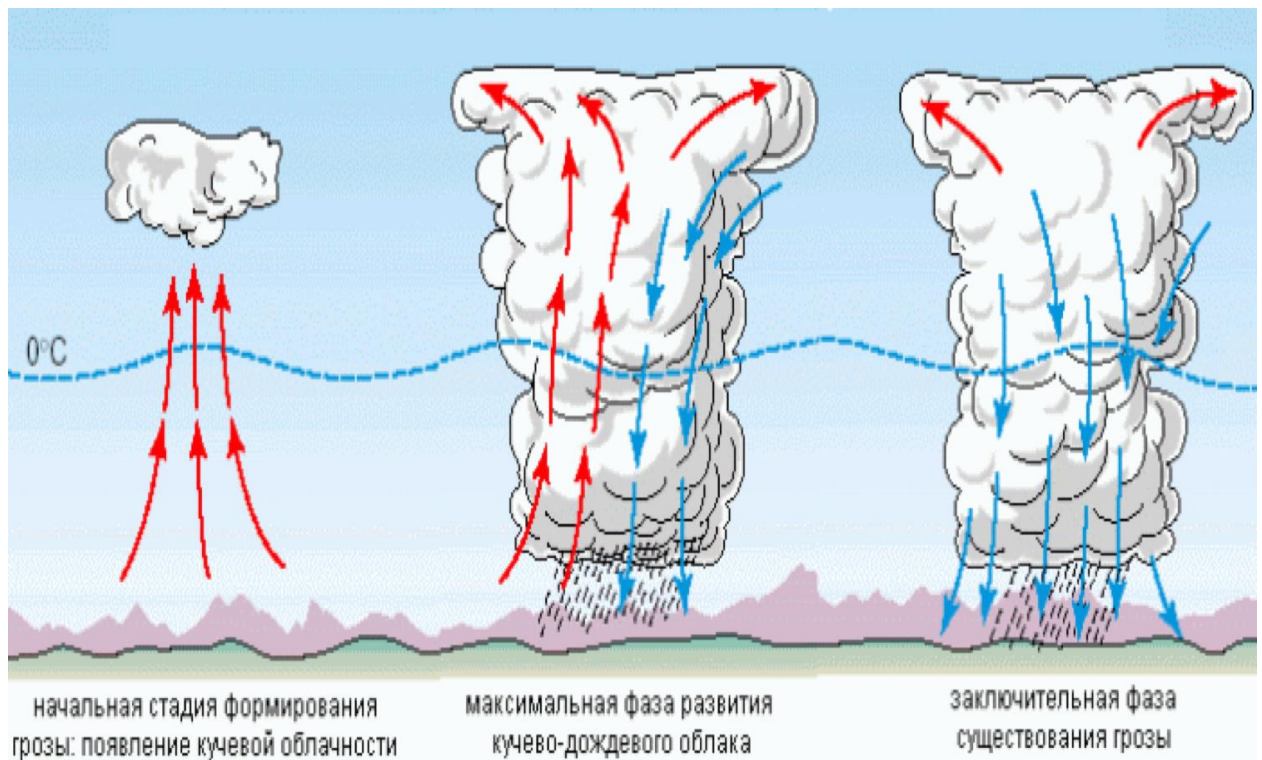


Рисунок 1 – Стадии развития грозового облака [13].

Следует отметить, что продолжительность каждой стадии может существенно колебаться в зависимости от конкретных синоптических условий и региональных особенностей. Однако статистически установлены следующие средние временные параметры: начальная стадия – 10-15 минут; стадия зрелости – 15-30 минут; стадия распада – около 30 минут.

1.2. Классификация грозовых явлений

Современная метеорология выделяет два основных типа гроз, различающихся по механизму возникновения и условиям формирования: внутримассовые грозы и фронтальные.

Внутримассовые грозы характеризуются локальным происхождением и относительно кратковременным действием (от 30 минут до 2 часов). Пик их

активности приходится на послеполуденные часы (15-19 часов). Скорость перемещения таких грозовых очагов составляет 5-25 км/ч, а направление движения соответствует ведущему воздушному потоку на высотах 3-5 км.

Внутримассовые грозы подразделяются на три подтипа:

- Конвективные – образуются при интенсивном прогреве земной поверхности и наличии влажной воздушной массы в приземном слое с наложением более холодных воздушных масс на высотах выше 7 км. Наиболее типичны для летнего периода, особенно в условиях размытого барического поля, на периферии заполняющихся циклонов и в седловинах между барическими системами.
- Адвективные – возникают при адвекции (горизонтальном переносе) холодных влажных воздушных масс над прогретой подстилающей поверхностью. Часто наблюдаются в передних частях барических гребней, в холодных воздушных массах за холодными фронтами, а также в прибрежных зонах с выраженным бризовым эффектом.
- Орографические – формируются вследствие вынужденного подъема воздушных масс по наветренным склонам горных систем, что приводит к их адиабатическому охлаждению и конденсации влаги.

К типичным синоптическим ситуациям, благоприятствующим развитию гроз, относятся:

- Тыловые части циклонов
- Седловины между барическими образованиями
- Восточные периферии антициклонов
- Области с размытыми барическими полями
- Зоны заполняющихся циклонов

Предвестниками грозовой активности служит появление башенкообразных и хлопьевидных высококучевых облаков, повышенные

значения абсолютной влажности (12-15 г/м³) и аномально высокие утренние температуры (20-25°C).

Фронтальные грозы, в отличие от внутримассовых, связаны с прохождением атмосферных фронтов. Наиболее ярким примером являются грозы на холодных фронтах и фронтах окклюзии по типу холодного фронта в летний период. Хотя могут наблюдаться в течение всего года, максимальная повторяемость отмечается в теплый сезон.

Характерные особенности:

- Отсутствие выраженного суточного хода интенсивности
- Максимум активности во второй половине дня
- Быстрое затухание после захода солнца
- Возможность образования не только на холодных, но и на теплых фронтах (особенно в ночное время)

Механизм ночного грозообразования на теплых фронтах объясняется развитием интенсивных вертикальных движений в слоисто-дождевых облаках, ночным радиационным охлаждением верхних частей облачности, увеличением вертикального градиента температуры, формированием неустойчивой стратификации, а также превышением градиента температуры над влажно-адиабатическим значением и развитием ночной конвекции с последующим образованием кучево-дождевой облачности.

2 ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТА И РЕЛЬЕФА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

2.1 Климатические особенности

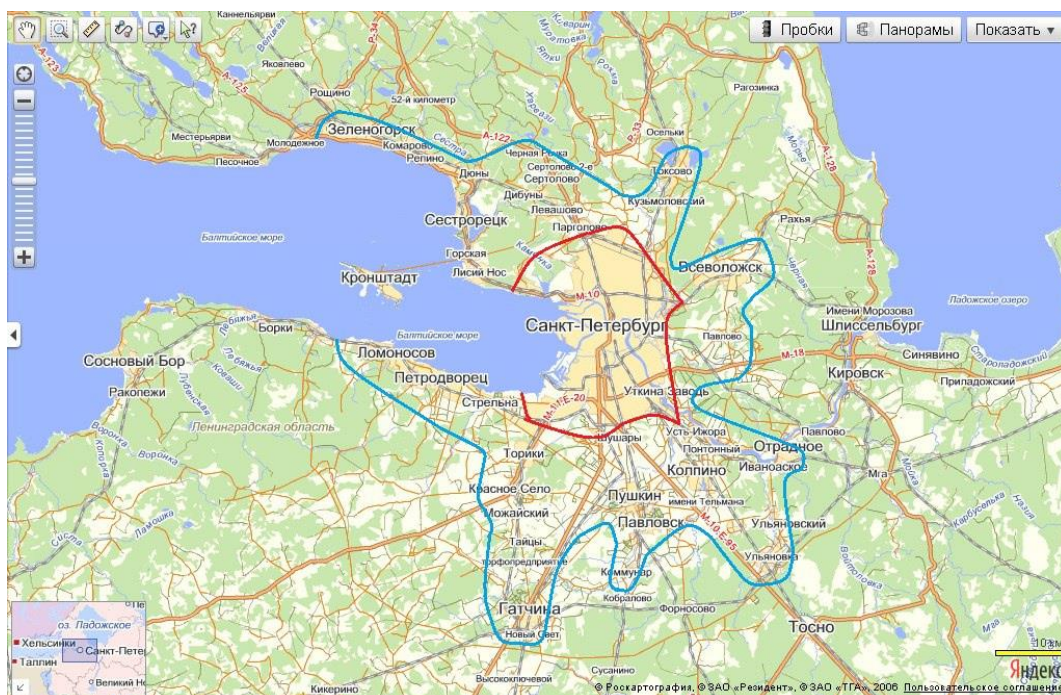


Рисунок 2 – Физическая карта Санкт-Петербурга и Ленинградской области [13].

Санкт-Петербург расположен в зоне умеренного морского климата с чертами континентального, что создает специфические условия для формирования конвективных процессов. Для района аэропорта Пулково характерны следующие климатические особенности, влияющие на грозообразование:

1. Высокая влажность воздуха, обусловленная близостью Финского залива и обширной водной поверхностью Невской губы. Создает благоприятные условия для развития мощных кучево-дождевых облаков.

2. Умеренные температурные контрасты. Средняя температура июля: +18...+20°C. Достаточный прогрев земной поверхности в летний период способствует развитию термической конвекции.

3. Особенности циркуляционных процессов. Преобладает западный перенос воздушных масс, частое прохождение атмосферных фронтов, создающих бароклинную и динамическую неустойчивость. Также

формирование местных бризовых циркуляций между акваторией Финского залива и сушей.

4. Слабая ветровая стратификация в приземном слое способствует вертикальному развитию конвективных ячеек. Средние скорости ветра 2-4 м/с в летний период.

Такая климатическая специфика Санкт-Петербурга обусловлена уникальным географическим положением города и особенностями атмосферной циркуляции, характерными для Ленинградской области. Важнейшим климатообразующим фактором является относительно невысокий уровень инсоляции – количество поступающей солнечной радиации здесь значительно ниже, чем во многих других регионах.

Основные характеристики климата:

1) Солнечная радиация и облачность

- В сравнении со Средней Азией количество солнечного тепла меньше в два раза
- Среднегодовое количество солнечных дней составляет всего 62
- Преобладает пасмурная погода с рассеянным освещением (более 300 дней в году)
- Облачный покров снижает суммарную солнечную радиацию на 21% и прямую солнечную радиацию на 60%
- Среднегодовой показатель суммарной радиации – 3156 МДж/м²
- Продолжительность солнечного сияния – 1628 часов в год [8].

2) Сезонные колебания

- Годовая амплитуда прямой солнечной радиации: минимальные значения в декабре – 25 МДж/м², максимальные в июне – 686 МДж/м²
- Существенные изменения продолжительности светового дня: зимнее солнцестояние (22 декабря) – 5 ч 51 мин, летнее солнцестояние (22 июня) – 18 ч 50 мин

3) Уникальное явление – белые ночи

- Период: с 25-26 мая по 16-17 июля (более 50 дней)
- Астрономическая особенность: солнце не опускается ниже 9° за горизонт
- Характерная черта: слияние вечерних и утренних сумерек
- Создает особый световой режим в ночное время

Медленное испарение влаги, обусловленное дефицитом солнечного тепла, в сочетании с частой облачностью формирует характерный влажный микроклимат, который оказывает значительное влияние на все компоненты природной среды Санкт-Петербурга. Эти климатические особенности стали неотъемлемой частью городского ландшафта и культурного наследия северной столицы.

Климатические условия города отличаются высокой изменчивостью воздушных потоков, что связано с активной циклонической деятельностью в регионе. В теплый период года (летом) преимущественное направление ветров – западное и северо-западное, тогда как в холодный сезон (зимой) чаще наблюдаются западные и юго-западные воздушные течения.

Метеорологические наблюдения в Санкт-Петербурге имеют богатую историю, архивные данные непрерывно фиксируются с 1722 года. За весь период инструментальных измерений были зарегистрированы следующие температурные экстремумы:

- Абсолютный максимум: +37,1°C
- Абсолютный минимум: –35,9°C

Такие значительные перепады температур демонстрируют континентальные черты климата, несмотря на общее преобладание морских воздушных масс. Указанные рекордные значения подтверждаются многолетними наблюдениями сети метеорологических станций города.

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Год
Абсолютный максимум, °С	8,6	10,2	14,9	25,3	30,9	34,6	35,3	37,1	30,4	21,0	12,3	10,9	37,1
Средний суточный максимум, °С	-3,6	-3,3	1,8	8,5	15,6	20,2	22,2	20,2	14,4	8,1	1,8	-1,7	8,8
Средняя температура, °С	-6,1	-6	-1,4	4,4	10,9	15,8	18,1	16,4	11,0	5,6	-0,1	-3,9	5,4
Средний суточный минимум, °С	-8,8	-8,8	-4,2	1,0	6,6	11,8	14,4	13,0	8,1	3,4	-2,1	-6,4	2,4
Абсолютный минимум, °С	-35,9	-35,2	-29,9	-21,8	-6,6	0,1	4,9	1,3	-3,1	-12,9	-22,2	-34,4	-35,9
Норма осадков, мм	37	30	34	33	37	57	77	80	69	66	55	50	625

Рисунок 3 – Числовые характеристики климата Санкт-Петербурга [9].

2.2 Географическое положение

Санкт-Петербург без учета прилегающих территорий находится между 59°56'19" северной широты (Авиагородок). Длина Санкт-Петербурга в административных границах составляет: с севера на юг в пределах КАД — 32 км (за КАД — 52 км), с северо-запада на юго-восток за пределами КАД — приблизительно 90 км. Следовательно, географический центр города расположен в акватории Финского залива.

Исторический центр имеет координаты 59°57' с. ш. 30°19' в. д. Та же широта пересекает южные берега Аляски и Гренландии, а также города Ухту, Магадан и норвежскую столицу Осло. По этой же долготе находятся Киев, Одесса, Каир, Хартум и Претория.

Санкт-Петербург расположен на северо-западе России, на Приневской низменности. Высота центральных районов над уровнем моря — 1—5 м, северных окраин — 5—30 м, южных и юго-западных — 5—22 м. Наивысшая точка в городской черте — район Красного Села (70—110 м), включая Воронью гору (176 м).

Белые ночи в городе обусловлены его расположением в высоких широтах. В дни, близкие к летнему солнцестоянию, Солнце в полночь находится всего на 6,5° ниже горизонта, из-за чего вечерние и утренние сумерки почти сливаются, создавая эффект непрерывного освещения.

Понятие белых ночей довольно условно. Официально в Санкт-Петербурге их принято относить к периоду с 11 июня по 2 июля. Однако если учитывать время, когда в полночь не наступают астрономические

сумерки, то на этой широте белые ночи фактически продолжаются с 12 мая по 31 июля.

2.3 Орографические и ландшафтные особенности района аэропорта Пулково

Санкт-Петербург преимущественно расположен на плоской низменности, где сохранились следы древних морских террас. Среди них выделяется Литориновая терраса, берущая начало у станции метро «Автово» и продолжающаяся вдоль проспекта Стачек и Петергофского шоссе. Своё название она получила от Литоринового моря, которое занимало территорию современной Балтики примерно 7,5–4 тысячи лет назад. В городской черте терраса значительно преобразована антропогенной деятельностью и пересечена оживлёнными транспортными магистралями.

Центральные районы города находятся на средней высоте 5 метров над уровнем моря. Северные территории варьируются по высоте от 1 метра (заболоченные участки Юнтоловского заказника) до 40 метров (Поклонная гора). В южных районах отметки составляют 5–18 метров. Более возвышенный рельеф (50–60 метров) наблюдается лишь в некоторых южных и северных пригородах. Максимальная высота в пределах города зафиксирована на Дудергофских высотах (176 метров), тогда как самая низкая точка суши расположена в Кронштадте — это Доковый бассейн, где среднегодовой уровень воды на 11,4 метра ниже нуля Кронштадтского футштока.



Рисунок 4 – Взлетно-посадочные полосы аэродрома Пулково.

Аэропорт Пулково находится на территории Приневской низменности, которая тянется от Финского залива до Ладожского озера. Эта низменность представляет собой широкую долину (30-50 км) с плавным понижением рельефа в сторону залива, где протекает Нева.

Местность здесь преимущественно равнинная, с обширными заболоченными участками, занимающими около половины площади Приневской и Тосненской низменностей. К северу равнина постепенно переходит в Камскую возвышенность (5-30 м), которая далее сменяется более выраженными холмами: Колтушскими, Парголовскими (до 60 м) и Поклонной горой (42 м). Ещё севернее начинаются возвышенности Карельского перешейка.

Побережье Финского залива отличается террасированным рельефом с песчаными дюнами. Южнее прибрежной зоны расположено Ижорское (Ордовикское) плато, наиболее высокая часть которого - Можайская возвышенность (168 м).

Вторая терраса плато представлена отдельными холмами высотой 50-60 м, среди которых выделяются Пулковские высоты (75 м). К югу высота плато постепенно уменьшается.

Окрестности аэропорта практически лишены крупных лесных массивов - лишь небольшой участок леса примыкает к одной из взлётных полос. Хотя поблизости нет значительных промышленных объектов, близость мегаполиса оказывает заметное влияние на местный микроклимат.

Рельеф территории аэропорта и прилегающих районов имеет несколько характерных черт, влияющих на динамику грозовых процессов:

1. Геоморфологическая характеристика.

- расположение Пулковской возвышенности (абсолютные отметки 50-75 метров);
- Перепад высот относительно акватории Невской губы (до 60 метров на расстоянии 15 километров);
- Создает орографическое усиление восходящих потоков при южных и юго-западных ветрах.

2. Ландшафтные особенности

- Мозаичность подстилающей поверхности (аэродромные покрытия с высокой теплоемкостью, лесные массивы к югу от аэропорта, сельскохозяйственные угодья с переменной влажностью почвы);
- Формирует неоднородность термических потоков и зон конвергенции.

3. Гидрографическая сеть

- Близость рек Ижора и Кузьминка (1-3 километра от ВПП);
- Наличие системы мелиоративных каналов;
- Создает локальные зоны повышенного испарения.

2.4 Микроклиматические особенности Санкт-Петербурга и аэродромной территории

Санкт-Петербург обладает особыми климатическими условиями, которые во многом определяются его географическим положением на берегу Финского залива и близостью к Балтийскому морю. Эти факторы придают местному климату выраженные морские черты, что находит отражение в ряде характерных особенностей. В частности, самый холодный месяц здесь не январь, как в большинстве регионов России, а февраль. Кроме того, наблюдается существенное уменьшение годовой амплитуды температур - разницы между средними показателями самого тёплого и самого холодного месяцев.

В Санкт-Петербурге эта амплитуда составляет около 26°C , что значительно меньше, чем в континентальных районах на той же широте. Для сравнения: в Восточной Сибири, где преобладает резко континентальный климат, годовой перепад температур достигает 60°C , тогда как на Гебридских островах с их типично морским климатом - всего 8°C . Эти данные наглядно демонстрируют, как географическое положение влияет на температурный режим.

Температурные показатели являются ключевой характеристикой любого климата. В нормальных условиях распределение температур должно соответствовать широтной зональности, однако в действительности этот процесс существенно корректируется атмосферной циркуляцией. Для Санкт-Петербурга характерна частая смена воздушных масс разного происхождения, что приводит к значительной изменчивости погодных условий и постоянным температурным колебаниям. В результате наблюдаются регулярные отклонения от климатической нормы.

Особое влияние на климат города оказывают тёплые воздушные массы, приходящие с Атлантического океана. Благодаря этому зимы в Санкт-Петербурге, несмотря на северное расположение, отличаются относительно

мягким характером. Для 60-й параллели этот регион считается одним из самых тёплых в России. Средняя температура января составляет здесь около -8°C , в то время как в Якутии на той же широте она опускается до -40°C , а среднемировой показатель для 60° с.ш. равен -16°C .

Летний период также имеет свои особенности - средние температуры в Санкт-Петербурге примерно на 3°C превышают характерные для данной широты значения. При анализе климатических условий обычно рассматривают несколько ключевых температурных показателей: многолетние средние значения (климатические нормы) годовых, месячных и суточных температур, а также их экстремальные величины. Эти данные позволяют составить наиболее полное представление о температурном режиме региона. Данные по температуре воздуха получены на основе показаний жидких термометров с международной стоградусной шкалой ($^{\circ}\text{C}$), совпадающей со шкалой Цельсия (рис.5).

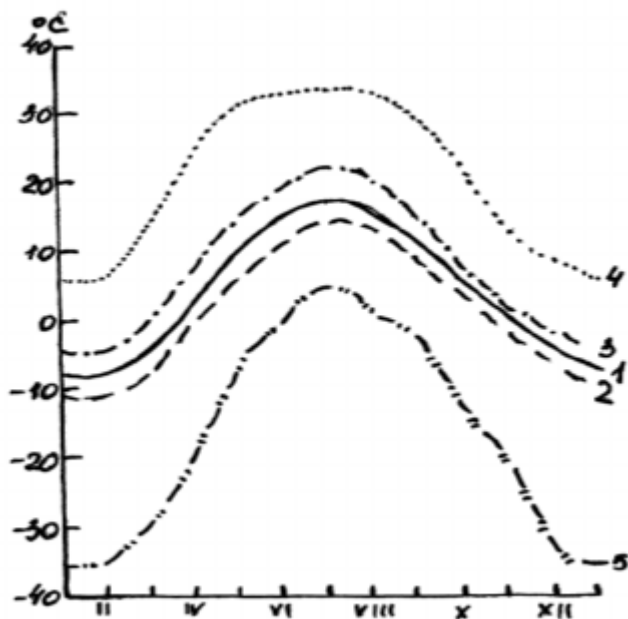


Рисунок 5 – Температура воздуха в Санкт-Петербурге: 1 – средняя, 2 – средняя минимальная, 3 – средняя максимальная, 4 – абсолютный максимум, 5 – абсолютный минимум [14].

Анализируя данные, представленные на рис. 5, можно сделать следующие выводы о температурном режиме Санкт-Петербурга.

Наблюдения показывают, что минимальные среднемесячные температуры приходится на февраль, когда столбик термометра опускается до $-7,9^{\circ}\text{C}$. В противоположность этому, самым тёплым месяцем в году является июль со средней температурой $+17,8^{\circ}\text{C}$.

Такое распределение температур в течение года демонстрирует интересную климатическую особенность региона. В зимний период климат Санкт-Петербурга проявляет ярко выраженные морские черты, что особенно заметно по сравнению с типичными континентальными регионами. Однако в летние месяцы ситуация меняется - для города и его окрестностей становятся более характерными признаки континентального климата. Это проявляется, в частности, в том, что пик летних температур приходится именно на июль, что типично для континентальных территорий.

Данная особенность объясняется комплексом факторов, включая географическое положение города, влияние Балтийского моря и Финского залива, а также особенности атмосферной циркуляции. Зимой смягчающее воздействие морских воздушных масс более выражено, тогда как летом усиливается влияние континентальных воздушных масс, что и приводит к наблюдаемым климатическим характеристикам.

Климатические условия в районе аэропорта Пулково характеризуются как умеренный морской климат. Важнейшим фактором, определяющим формирование местного климата, выступает общая циркуляция атмосферных масс. Особую роль играет постоянный перенос влажных воздушных потоков с Атлантического океана, который становится наиболее активным в период с осени до зимы. Это объясняется тем, что именно в это время года наблюдается максимальная разница температур между поверхностью суши и моря.

В осенне-зимний сезон отмечается усиление циклонической активности, особенно на границах полярных и арктических воздушных масс. Однако в весенне-летний период интенсивность атмосферной циркуляции заметно снижается. Такая сезонная динамика напрямую связана с уменьшением

температурных контрастов между северными и южными регионами, что вызвано увеличением количества поступающей солнечной радиации.

Следует отметить, что радиационный фактор становится значимым для формирования климатических особенностей преимущественно в летние месяцы. В остальные времена года, и особенно зимой, основное влияние на погодные условия оказывают процессы атмосферной циркуляции. Именно они ответственны за характерную для этого региона изменчивую погоду с частыми и резкими сменами метеорологических условий. Такая особенность является типичной для территорий с морским климатом, где воздушные массы постоянно перемещаются и взаимодействуют между собой.

Аэропорт Пулково как техногенный объект формирует собственный микроклимат.

1. Тепловой остров

- Повышение температуры приземного воздуха на 1-2°C относительно окружающей территории;
- Усиление термических восходящих потоков над взлетно-посадочными полосами.

2. Аэродинамические эффекты

- Турбулизация воздушных потоков зданиями аэровокзального комплекса;
- Формирование зон ветровой тени за ангарами и техническими сооружениями.

3. Антропогенные аэрозоли

- Выбросы авиационных двигателей как возможные ядра конденсации;
- Влияние на микрофизические процессы в облаках.

Из всего перечисленного можно прийти к выводу, что климатические и орографические условия аэропорта Пулково создают благоприятные предпосылки формирования и развития внутримассовых грозовых очагов. Сочетание повышенной влажности, умеренных температурных контрастов,

сложного рельефа и мозаичности подстилающей поверхности определяет специфику пространственно-временного распределения грозовой активности. Эти факторы необходимо учитывать при анализе траекторий перемещения грозовых ячеек и прогнозировании опасных явлений для авиационной деятельности.

3 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВНУТРИМАССОВЫХ ГРОЗ

3.1 Метод среднего вектора ветра

Метод среднего ветра – один из классических подходов к краткосрочному прогнозированию траекторий перемещения грозовых ячеек, основанный на анализе ветрового поля в разных слоях атмосферы. Он особенно эффективен для внутримассовых гроз, которые в меньшей степени зависят от фронтальных систем и больше подвержены адвекции воздушных масс.

Внутримассовые грозы формируются за счет термической конвекции и перемещаются вместе с воздушным потоком, в котором они развиваются.

Метод среднего ветра предполагает, что:

- Грозовая ячейка движется со скоростью, равной средневзвешанному ветру в слое, где происходит развитие (обычно 0-6 километров или 0-8 над уровнем моря);
- Направление движения совпадает с преобладающим направлением ветра в этом слое.

Ключевыми допущениями данного метода являются перемещение грозы, как пассивной частицы в потоке, слабое изменение ветрового поля на протяжении жизни ячейки и незначительное искажение траектории орографическими и термическими эффектами.

Для расчета среднего ветра используются данные аэрологического зондирования (радиозонды), доплеровских радиолокаторов (определение ветра по движению осадков) и модельных данных. Для определения начального движения новых ячеек анализируется слой 0-3 километра, для

зрелых гроз основной слой 3-6 километров. Усредненный вариант для анализа 0-6 километров.

Средний ветровой вектор вычисляется как взвешенное среднее по выбранному слою. Часто используется линейное экспоненциальное взвешивание (большой вес – на уровни с максимальной конвективной активностью).

$$\bar{V} = \frac{\sum(V_i \cdot w_i)}{\sum w_i}, \quad (1)$$

где: V_i – ветер на i -м уровне, W_i – весовой коэффициент (может зависеть от высоты или влажности).

$$|V|_7^5 = \frac{\sqrt{V_5^2 + V_7^2 - 2V_5V_7 \cos(180-\alpha)}}{2}, \quad (2)$$

где: α – угол между векторами ветра на уровнях 500 и 700 гПа.

$$\bar{d}_7^5 = d_7 \mp \arccos \frac{V_7 - V_5 \cos(180-\alpha)}{2|V|_7^5}, \quad (3)$$

где: d_7 – направление ветра на уровне 700 гПа. При левом повороте ветра с высотой знак «–», при правом «+» [1].

Данный метод ограничен тем, что не учитывает развитие новых ячеек по ветру, влияние сдвига ветра на морфологию грозы (например, разделение на восходящий/нисходящий потоки) и орографические эффекты, как например отклонение ветра возле Пулковских высот. Также точность метода снижается при сильном вертикальном сдвиге ветра, в условиях сложного рельефа и для долгоживущих мезомасштабных конвективных систем.

Для Санкт-Петербурга метод среднего ветра требует адаптации из-за:

- *Близости Финского залива* – бризовые циркуляции могут изменять ветровое поле.
- *Пулковской возвышенности* – орографическое усиление восходящих потоков.

- *Высокой влажности* – увеличенная вероятность многоядерных гроз.

Метод среднего ветра остается полезным инструментом для краткосрочного прогноза перемещения внутримассовых гроз, особенно в сочетании с радиолокационными данными. Однако для аэропорта Пулково следует дополнять анализом мезомасштабных эффектов и орографических поправок. В современных системах он используется как базовый алгоритм с дальнейшей коррекцией машинным обучением.

3.2 Методика прогнозирования перемещения внутримассовых грозовых облаков и зон осадков с помощью корреляционной функции

При осуществлении краткосрочных прогнозов перемещения зон радиоэха, соответствующих внутримассовым осадкам, с заблаговременностью до трех часов, основным применяемым методом является экстраполяция их траектории движения. Данный подход базируется на анализе фактического перемещения осадкообразующих облаков в течение предшествующего прогнозу часа. Такой метод позволяет с достаточной степенью точности предсказать ближайшее движение осадков, опираясь на их текущую динамику.

Для прогнозирования на более длительные сроки (превышающие трехчасовой интервал) возникает необходимость учитывать дополнительные метеорологические факторы. В этом случае ключевое значение приобретает анализ скорости ветрового потока, наблюдаемого в средних слоях атмосферы. Это обусловлено тем, что на больших временных промежутках движение облачных масс начинает в значительной степени определяться общими атмосферными процессами и воздушными течениями, а не только их первоначальной траекторией.

Такой дифференцированный подход к прогнозированию – использование простой экстраполяции для краткосрочных прогнозов и учет ветровых характеристик для более долгосрочных – позволяет оптимально сочетать точность прогноза с его заблаговременностью. При этом

трехчасовой рубеж выступает своеобразной границей, после которой влияние крупномасштабных атмосферных процессов на движение осадков становится преобладающим.

Методика исследования включает следующие этапы:

- Отбор случаев внутримассовых гроз – выбираются метеорологические ситуации, соответствующие критериям внутримассовой конвекции.
- Подготовка аэрологических данных – для каждого отобранного случая анализируются данные радиозондирования, позволяющие рассчитать средний ветер в различных атмосферных слоях.
- Корреляционный анализ – исследуется связь между скоростью и направлением ветра на разных высотах и параметрами движения радиоэха.

Результаты анализа:

Направление перемещения зон осадков площадью более 50 км² хорошо соответствует направлению ветра на изобарических уровнях 700 и 500 гПа.

Расчеты включали:

- Определение среднего ветра в слоях:
 - от поверхности до 850 гПа,
 - от поверхности до 700 гПа,
 - от 850 до 700 гПа,
 - от 700 до 500 гПа.
- Вычисление коэффициентов линейной корреляции между скоростью и направлением ветра в этих слоях и параметрами движения радиоэха.

Выводы:

Наибольшая корреляция обнаружена в слое 700–500 гПа. Коэффициент линейной корреляции (R) составил:

- 0,628 – для скорости ветра,

- 0,564 – для направления.

При числе степеней свободы 56 (58 случаев минус 2 параметра) и уровне значимости 0,05 критическое значение R равно 0,273. Поскольку экспериментальные значения превышают критический порог, гипотеза о наличии линейной корреляционной связи подтверждается. Однако связь остается слабой, что указывает на ограниченную применимость данной методики для точного прогнозирования перемещения гроз в районе Пулково.

Тем не менее, анализ подтвердил, что слой 700–500 гПа оказывает наибольшее влияние на траекторию внутримассовых гроз, что следует учитывать при разработке более точных моделей прогнозирования (рис. 6). Рассматривались 53 случая с вычетом тех случаев, которые имеют направление ветра от 180 до 360 градусов. Коэффициент корреляции $R=0,719$.

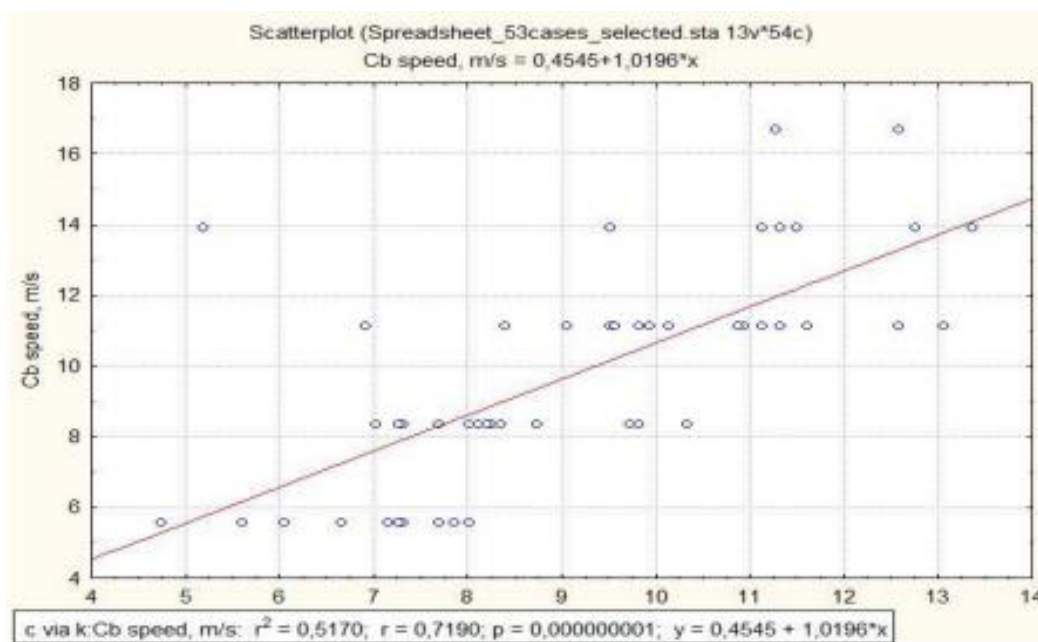


Рисунок 6 – Корреляционная связь между скоростью перемещения радиоэха (ось Y) и средним ветром в слое 700-500 гПа (ось X) для 53 случаев [10].

Анализ корреляционной зависимости между перемещением внутримассовых грозовых образований и ветровыми характеристиками показал интересные результаты. После исключения из выборки 5 случаев гроз, имевших направление движения в секторе от 180 до 360 градусов, было

обнаружено значительное усиление корреляционной связи (рис. 3.2.1). Особенно четко это проявилось для грозовых образований, перемещавшихся в направлении от 0 до 180 градусов.

Статистическая обработка данных выявила наличие тесной корреляционной зависимости ($R=0,719$) между скоростью перемещения радиоэха и средней скоростью ветра в атмосферном слое 700-500 гПа. На основе проведенного регрессионного анализа была получена эмпирическая формула, связывающая скорость перемещения радиоэха (C , м/с) со средней скоростью ветра (V , м/с) в указанном слое: $C = 0,4545 + 1,0196 \cdot V$ [10].

Полученные результаты имеют важное практическое значение для метеорологического прогнозирования. Установленная зависимость может быть использована для сверхкраткосрочного (до 3 часов) прогнозирования скорости перемещения внутримассовых грозовых образований в районе аэропорта Пулково. Особую ценность представляет возможность оперативного расчета ожидаемой скорости движения грозовых очагов на основе данных о ветровом режиме в средних слоях атмосферы.

Следует отметить, что точность прогноза существенно зависит от правильности определения направления движения грозового образования. Наибольшая достоверность прогноза достигается для случаев, когда направление перемещения радиоэха лежит в диапазоне от 0 до 180 градусов. Это ограничение необходимо учитывать при практическом применении разработанной методики.

3.3 Доплеровский метеорологический радиолокатор и способы его применения для прогнозирования перемещения внутримассовых гроз

Доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ) представляет собой сложную радиолокационную систему, предназначенную для наблюдения за атмосферными явлениями с использованием доплеровского эффекта – физического явления, заключающегося в изменении частоты отраженного сигнала в зависимости от скорости движения отражающего

объекта. В отличие от обычных метеорологических радаров, которые фиксируют лишь интенсивность осадков и их пространственное распределение, ДМРЛ позволяет измерять радиальную скорость движения метеорологических образований относительно лоатора, что делает его незаменимым инструментом для прогнозирования опасных явлений погоды, включая грозы.

Назначение:

- Отображение распределения различных метеорологических данных (отражаемости, скорости, ширины спектра, а также в режиме двойной поляризации: дифференциальной отражаемости, фазы, коэффициента кросскорреляции и линейного деполяризационного отношения) на различных высотных уровнях по типу псевдо-SARPI;
- Расчёт и отображение вертикального профиля скорости, направления ветра до высоты верхней границы обнаружения метеообъектов и других доплеровских продуктов;
- Расчёт и отображение интенсивности осадков за любой интервал времени;
- Определение опасных явлений погоды (град, гроза, шквальные усиления ветра, интенсивный дождь и снег, сильная турбулентность);
- Отображение скорости и направления перемещения облачных систем;
- Выдача радиолокационной информации в необходимых кодограммах.



Рисунок 7 – Доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ) [12].

Принцип работы ДМРЛ основан на излучении коротких импульсов электромагнитных волн и анализе сигналов, отраженных от атмосферных частиц – капель дождя, снежинок, градин или даже насекомых и пыли. Ключевое отличие доплеровского радара заключается в его способности анализировать частотный сдвиг отраженного сигнала, который возникает из-

за движения этих частиц относительно радара. Этот сдвиг позволяет определить не только наличие осадков, но и их скорость и направление движения, что критически важно для прогнозирования развития и перемещения грозовых ячеек.

Для прогнозирования гроз ДМРЛ предоставляет несколько типов данных. Во-первых, это данные об отражаемости (Z), которые показывают интенсивность осадков и позволяют идентифицировать мощные конвективные ядра грозовых облаков, где происходит интенсивное восходящее движение воздуха. Во-вторых, и это наиболее важно, радиальная скорость (V), которая измеряется благодаря доплеровскому эффекту и показывает, с какой скоростью и в каком направлении движутся частицы в облаке. Анализируя распределение радиальных скоростей, метеорологи могут выявить зоны вращения (мезоциклоны) – ключевой признак потенциально опасных гроз, способных породить шквалы или даже торнадо.

Одним из наиболее ценных продуктов ДМРЛ является так называемый «продукт сдвига ветра», который показывает изменение скорости и направления ветра с высотой. Этот параметр крайне важен для прогнозирования гроз, так как сильный сдвиг ветра способствует организации и долговечности грозовых ячеек, увеличивая вероятность возникновения суперъячеек – наиболее опасного типа гроз. Кроме того, ДМРЛ позволяет детектировать специфические структуры в грозовых облаках, такие как «крюкообразные эхо», которые часто ассоциируются с мезоциклонами и возможным образованием торнадо.

Для прогнозирования перемещения гроз специалисты анализируют временные серии радарных данных, отслеживая смещение наиболее интенсивных ядер отражаемости. Используя данные о радиальной скорости, можно построить поле ветра в нижних и средних слоях атмосферы, что позволяет экстраполировать движение грозового фронта на ближайшие 1-2 часа – этот метод называется TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation).

Более сложные алгоритмы используют трехмерные данные ДМРЛ для прогнозирования эволюции грозовых ячеек, учитывая не только их перемещение, но и изменения интенсивности.

Важным аспектом работы ДМРЛ является его пространственное разрешение. Типичный метеорадар имеет угловое разрешение около 1 градуса и дальность действия до 250-300 километров, однако наиболее точные данные получаются в радиусе 150 километров. В этом диапазоне радар способен обнаруживать объекты размером от нескольких десятков метров, что позволяет отслеживать мелкомасштабные структуры в грозовых облаках. Частота обновления данных (обычно 5-10 минут) обеспечивает возможность отслеживания быстрой эволюции грозовых процессов [12].

Интерпретация данных ДМРЛ требует специальной подготовки, так как существует множество факторов, которые могут влиять на качество данных. Например, эффект затенения (когда сигнал блокируется препятствиями, такими как горы или высокие здания) или помехи от наземных объектов. Современные алгоритмы обработки данных позволяют минимизировать эти эффекты, но метеоролог всегда должен учитывать возможные погрешности при анализе.

В последние годы развитие вычислительных технологий позволило интегрировать данные ДМРЛ с численными моделями прогноза погоды, создавая системы ассимиляции данных, которые значительно улучшают краткосрочные прогнозы гроз. Методы машинного обучения применяются для автоматического распознавания паттернов грозовой активности и прогнозирования их развития. Это особенно важно для авиации, энергетики и других отраслей, чувствительных к грозовой активности.

Таким образом, доплеровский метеорологический радиолокатор представляет собой мощный инструмент не только для обнаружения, но и для прогнозирования грозовой активности. Его способность измерить скорость и направление облачных частиц в реальном времени, сочетаемая с высоким пространственным и временным разрешением, делает его

незаменимым для оперативного предупреждения об опасных явлениях погоды. По мере развития технологий обработки данных и интеграции с другими наблюдательными системами, возможности ДМРЛ в прогнозировании гроз и их перемещения продолжают расширяться, повышая точность и заблаговременность предупреждений.

4 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ СЛУЧАЕВ ВНУТРИМАССОВЫХ ГРОЗ В РАЙОНЕ АЭРОПОРТА ПУЛКОВО

4.1 Данные, представленные для анализа

Исходные данные включают в себя даты внутримассовых гроз с 2009 по 2014 гг.

Методика сбора и обработки данных для исследования грозовой активности была следующей. Для проведения данного исследования были использованы открытые метеорологические данные, предоставляемые университетом Вайоминга. Из этого доступного источника получена информация аэрологического зондирования, необходимая для расчета средних значений ветра в атмосферном слое 700-500 гПа. Эти данные отбирались для дней, когда в изучаемом регионе наблюдалась грозовая активность.

В качестве основы для анализа был взят список случаев внутримассовых гроз, составленный в ходе предыдущих исследований по данной тематике. Общий объем выборки составил 69 метеорологических случаев, что обеспечивает достаточную репрезентативность для статистического анализа.

Анализ применимости методики прогнозирования

В работе рассматривается возможность адаптации методики, предложенной И.Н. Русиным и Г.Г. Таракановым [1], для прогнозирования перемещения грозовых образований в районе Пулково. Данный подход основан на предположении о существовании линейной зависимости между скоростью перемещения областей радиоэха и средней скоростью ветра в различных атмосферных слоях.

При выборе атмосферного слоя учитывались результаты предыдущих исследований, которые показали, что наибольшая корреляция между указанными параметрами наблюдается именно в слое 700-500 гПа [10]. Это обоснование стало решающим при определении методического подхода к настоящему исследованию.

Особое внимание в работе уделяется проверке гипотезы о возможности использования простой пропорциональной зависимости для прогнозирования траектории грозových образований. Такой подход, будучи достаточно простым в реализации, требует тщательной верификации для каждого конкретного региона, что и составляет основную задачу данного исследования.

В ходе анализа для более точных результатов корреляционной связи было решено разделить данные по направлению ветра на две разные выборки – 0-179 (Приложение 1, табл. 2) и 180-359 (Приложение 1, табл. 1) градусов.

4.2 Анализ данных с расчетом корреляционной связи

Данные по скорости ветра по ДМРЛ даны в км/ч, переводим из в м/с для дальнейших расчетов корреляционной связи. Средний вектор скорости и направления ветра в слое 700-500 гПа рассчитываются по формуле:

$$c = k|V|_7^5, \quad (4)$$

где k – коэффициент переноса, который зависит от скорости ветра и приблизительно может быть определен по эмпирической формуле:

$$k = \frac{9,2 + 0,29|V|_7^5}{|V|_7^5 + 3,5}, \quad (5)$$

Классификация корреляционных связей по степени силы делится на общую и частную.

Таблица 3 – Общая корреляционная связь.

Сильная или тесная	Более 0,70
Средняя	От 0,50 до 0,69
Умеренная	От 0,30 до 0,49
Слабая	От 0,20 до 0,29
Очень слабая	Меньше 0,19

Таблица 4 – Частная корреляционная связь.

Высокая значимая корреляция	при r соответствующем уровню статистической значимости p меньше или равно 0,01
Значимая корреляция	p меньше или равно 0,5
Тенденция достоверной связи	p меньше или равно 0,10
Незначимая корреляция	при r , не достигающем уровня статистической значимости

В научных исследованиях существует два основных подхода к оценке корреляционных зависимостей. Первый подход фокусируется исключительно на абсолютном значении коэффициента корреляции, рассматривая его величину как основной показатель силы связи между переменными. Вторым, более комплексным подходом, учитывает не только величину коэффициента, но и его статистическую значимость, которая напрямую зависит от объема анализируемой выборки данных.

Важно понимать, что между объемом выборки и требуемым значением коэффициента корреляции для признания связи достоверной существует обратная зависимость. При работе с большими массивами данных даже относительно небольшие значения коэффициента корреляции могут достигать статистической значимости. Это объясняется тем, что большие

выборки обеспечивают более надежную и репрезентативную оценку взаимосвязей, уменьшая влияние случайных колебаний.

Напротив, при малых объемах данных ситуация принципиально иная. Даже высокие значения коэффициента корреляции в этом случае могут не достигать необходимого уровня статистической значимости. Такая особенность связана с фундаментальными принципами статистики: в малых выборках количество возможных комбинаций значений ограничено, что увеличивает вероятность обнаружения случайных, не имеющих реальной основы связей между переменными. Таким образом, малый объем данных существенно повышает риск сделать ошибочные выводы о наличии корреляционной зависимости там, где ее на самом деле нет [11].

Этот принцип имеет важные практические последствия для исследовательской работы. Он подчеркивает необходимость тщательного планирования объема выборки на этапе подготовки исследования и осторожности при интерпретации результатов, полученных на ограниченных массивах данных. Одновременно он объясняет, почему в исследованиях с большими выборками даже слабые корреляции могут представлять научный интерес, так как их статистическая значимость подтверждает реальное, а не случайное существование обнаруженной связи.

Таблица 5 – Критические значения коэффициента парной корреляции при $\alpha=0,05$ [11].

Число степеней свободы f	Критическое значение r	Число степеней свободы f	Критическое значение r	Число степеней свободы f	Критическое значение r
1	0,997	9	0,602	17	0,456
2	0,950	10	0,576	18	0,444
3	0,878	11	0,553	19	0,433
4	0,811	12	0,532	20	0,423
5	0,754	13	0,514	30	0,349
6	0,707	14	0,487	50	0,273
7	0,666	15	0,482	80	0,217
8	0,632	16	0,468	100	0,195

Для определения статистической значимости коэффициента парной корреляции необходимо выполнить ряд последовательных действий. В первую очередь требуется сравнить полученное в исследовании эмпирическое значение коэффициента корреляции с критическим (табличным) значением, которое можно найти в соответствующих статистических таблицах (в данном случае - таблица 5).

Процедура проверки включает следующие этапы:

1) Определение числа степеней свободы:

- Рассчитывается по формуле $f = N - 2$, где N - объем выборки
- Это значение является ключевым для дальнейшего анализа

2) Выбор уровня значимости:

- Наиболее распространенным в практических исследованиях является уровень 0,05
- Данный уровень соответствует 5%-ному риску ошибочного заключения

- Вероятность правильного вывода при этом составляет $P = 1 - \alpha = 0,95$ (95%)
- Это означает, что в среднем лишь в 5 случаях из 100 возможна ошибка при проверке гипотезы

3) Сравнение значений:

- Абсолютная величина полученного коэффициента корреляции сопоставляется с табличным значением
- Если экспериментальное значение r меньше критического – делается вывод об отсутствии достаточных оснований для утверждения о наличии линейной связи
- Если экспериментальное значение r равно или превышает критическое – гипотеза о существовании линейной корреляционной связи не отвергается

Исследователь обладает определенной свободой в выборе уровня значимости. Хотя 5%-ный уровень является наиболее распространенным, в некоторых случаях может потребоваться более строгий критерий - например, 1%-ный уровень значимости. В этом случае увеличивается надежность статистического вывода и снижается вероятность ошибки первого рода (ложного обнаружения связи), однако одновременно возрастает риск ошибки второго рода (пропуска существующей связи).

Важно отметить, что выбор уровня значимости должен быть обоснован спецификой исследования и требованиями к достоверности результатов. В любом случае, процедура проверки остается неизменной и основывается на сопоставлении эмпирического значения коэффициента с критическим значением для выбранного уровня значимости и соответствующего числа степеней свободы. Для расчета корреляционной связи между данными по ДМРЛ и с аэрологического зондирования переводим данные по скорости ветра в м/с.

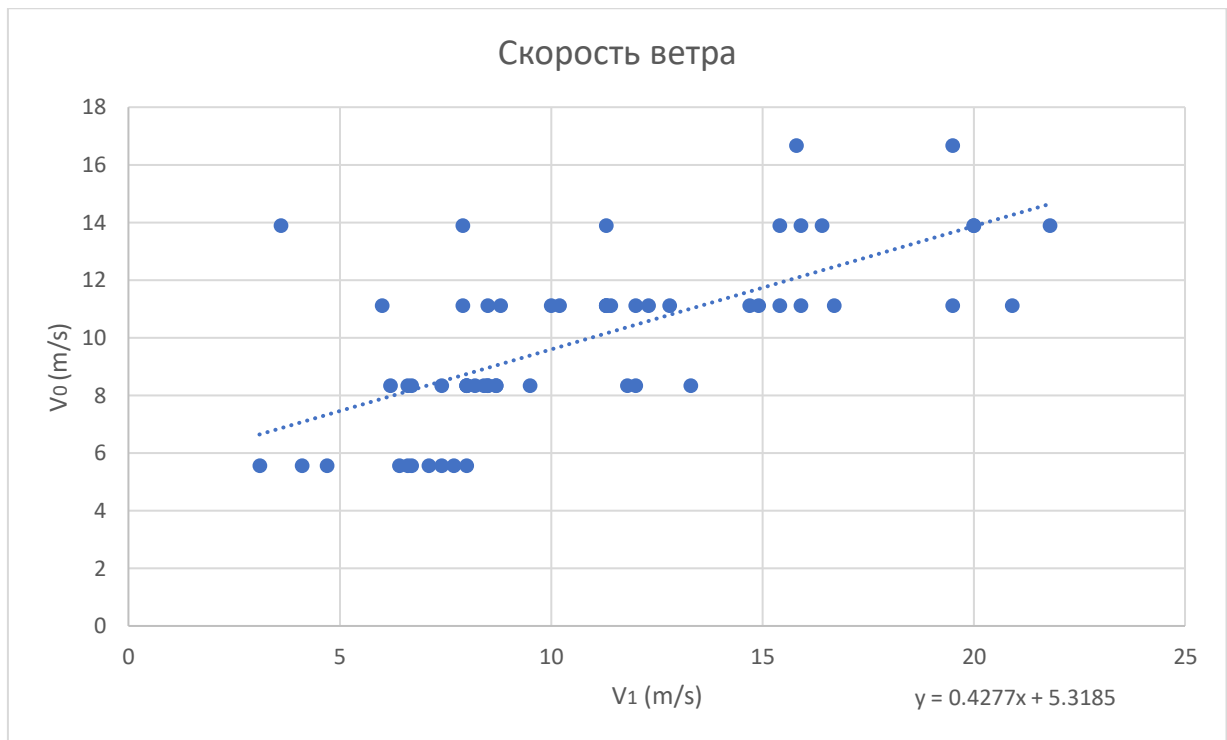


График 1 – Корреляционная связь скорости ветра по направлению 0-179 градусов, где V_0 – скорость по ДМРЛ, V_1 – средний вектор скорости в слое 700-500 гПа. Рассмотрено 58 случаев.

Наблюдается средняя корреляционная связь скорости перемещения радиоэха и среднего ветра в слое 700-500 гПа $R=0,67$ при направлении перемещения радиоэха от 0 до 179 в 58 случаев. Полученная зависимость скорости перемещения радиоэха C в м/с и среднего ветра в слое 700-500 гПа (м/с) выглядит следующим образом:

$$C = 0,4277 * V + 5,3185$$

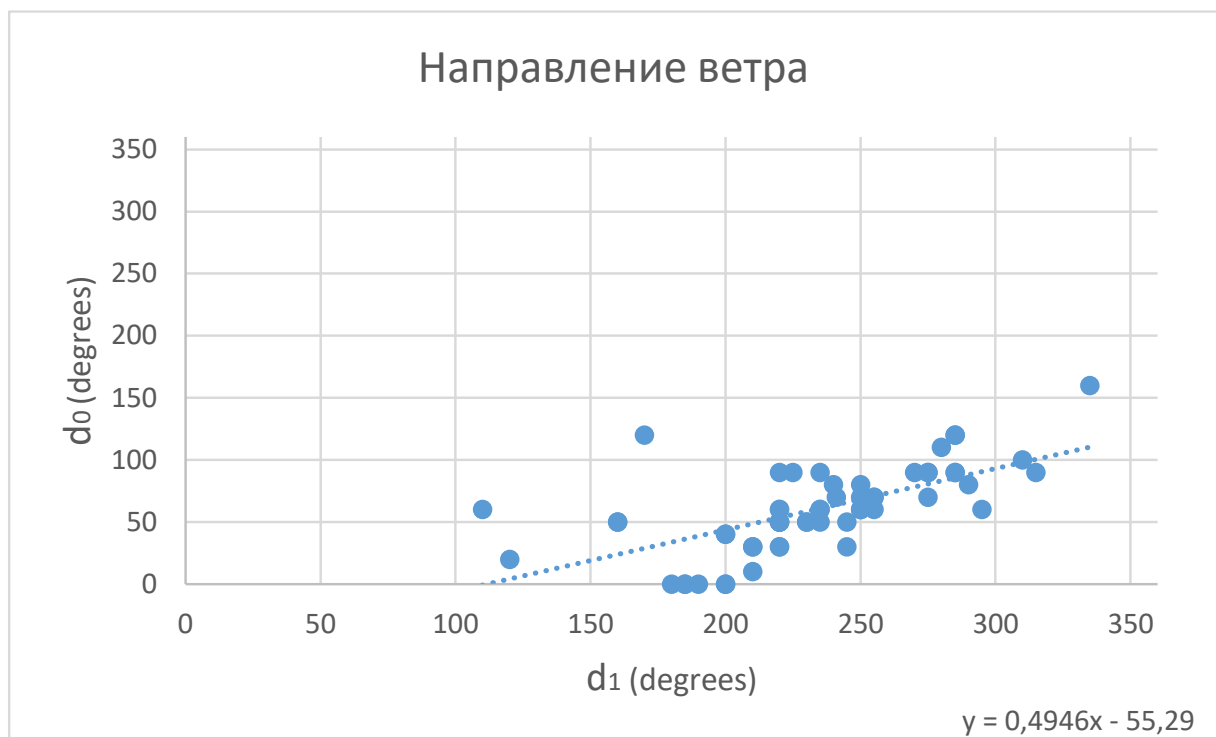


График 2 – Корреляционная связь направления ветра по направлению 0-179 градусов, где d_0 – направление по ДМРЛ, d_1 – направление среднего ветра в слое 700-500 гПа. Рассмотрено 10 случаев.

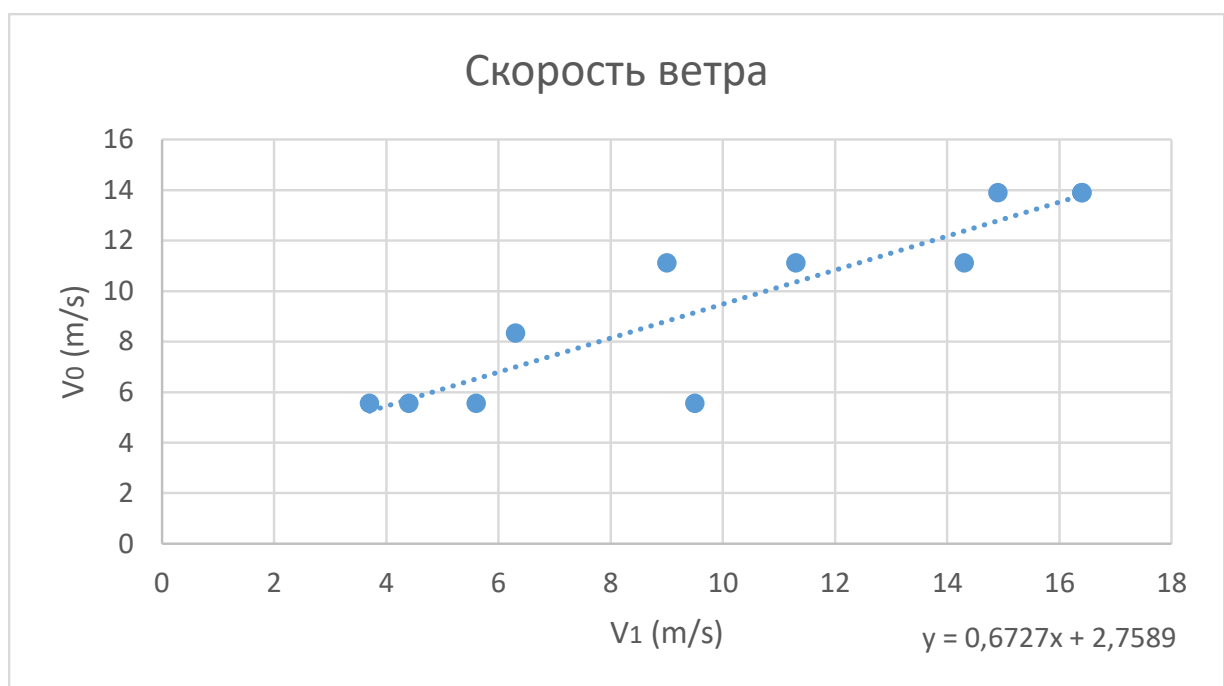


График 3 – Корреляционная связь скорости ветра по направлению 180-359 градусов, где V_0 – скорость по ДМРЛ, V_1 – средний вектор скорости в слое 700-500 гПа в 10 рассматриваемых случаях.

Наблюдается тесная корреляционная связь скорости перемещения радиоэха и среднего ветра в слое 700-500 гПа $R=0,89$ в 10 рассматриваемых случаях при направлении перемещения радиоэха от 180 до 359. Полученная зависимость скорости перемещения радиоэха C в м/с и среднего ветра в слое 700-500 гПа (м/с) выглядит следующим образом:

$$C = 0,6727 * V + 2,7589$$

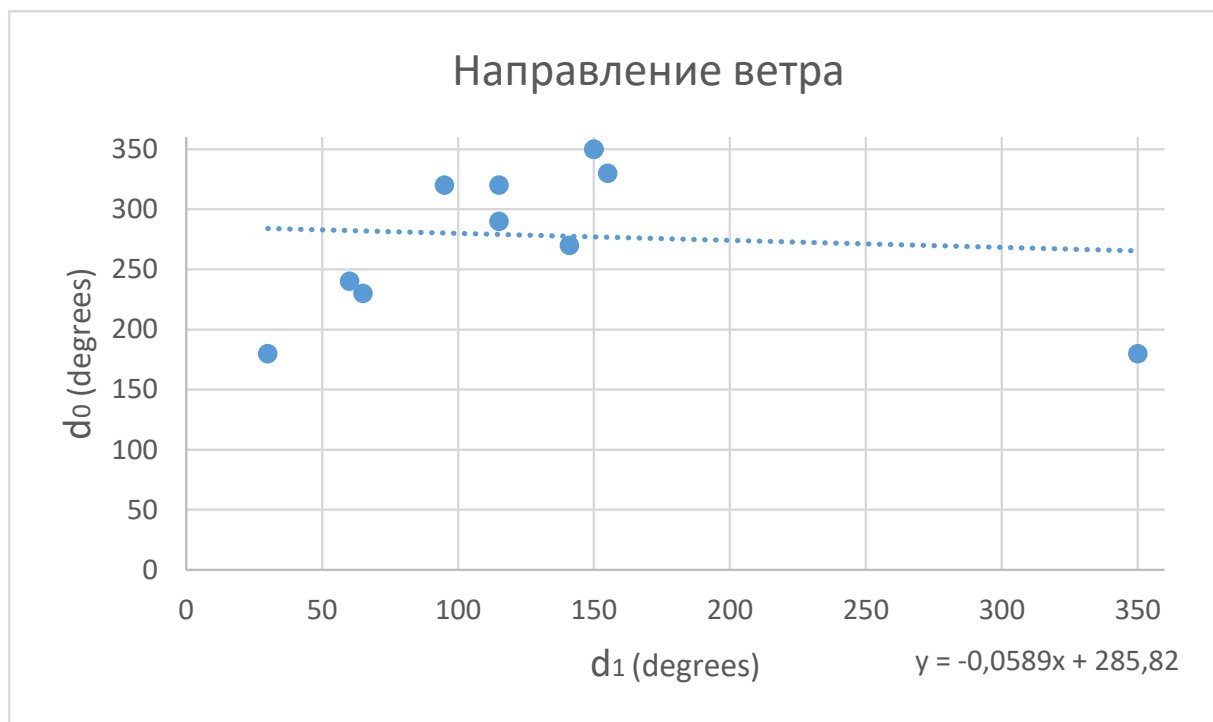


График 4 – Корреляционная связь направления ветра по направлению 180-359 градусов, где d_0 – направление по ДМРЛ, d_1 – направление среднего ветра в слое 700-500 гПа. Рассмотрено 10 случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе проведено исследование закономерностей перемещения внутримассовых гроз в районе аэропорта Пулково с целью повышения точности краткосрочных прогнозов грозовой активности. Основное внимание уделено анализу корреляционной связи между скоростью и направлением ветра, определяемым по данным доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ) и средним ветром в слое 700-500 гПа.

Корреляционный анализ выявил различия в зависимости от направления ветра:

- При направлении ветра 0-179 градусов наблюдалась средняя корреляция $R=0,67$ между перемещением грозовых очагов и средним ветром в указанном слое в 58 рассматриваемых случаях.
- При направлении ветра 180-359 градусов была установлена тесная корреляционная связь $R=0,89$, что свидетельствует о более предсказуемом характере перемещения гроз в этих условиях в 10 рассматриваемых случаях.

Установлено, что при южных и западных ветрах (180-360°) грозовые очаги чаще следуют за средним ветром, что связано с более устойчивыми мезомасштабными процессами в этом секторе, в то время как при северных и восточных ветрах (0-179°) влияние локальных факторов (орография, термическая неоднородность подстилающей поверхности) усиливается, что снижает степень корреляции. Полученные данные позволяют уточнить методику прогнозирования траекторий гроз в районе Пулково, что особенно важно для авиации и других отраслей, чувствительных к грозовой активности. Рекомендуется отдельный подход к прогнозу в зависимости от направления ветра: при южных и западных ветрах можно активнее использовать модели, основанные на переносе средним ветром, а при северных и восточных – учитывать дополнительные факторы.

Проведенное исследование подтвердило, что направление ветра является значимым фактором при прогнозировании перемещения внутримассовых гроз. Полученные результаты могут быть использованы метеорологическими службами аэропорта Пулково для повышения точности штормовых предупреждений и минимизации рисков, связанных с грозовой активностью.

Работа вносит вклад в развитие методов сверхкраткосрочного прогнозирования гроз и демонстрирует необходимость дифференцированного подхода в зависимости от синоптических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. Н. Русин, Г. Г. Тараканов «Сверхкраткосрочные прогнозы погоды» – СПб. 1996.
2. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика Атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 1965 г.
3. РД 52.27.724 - 2019 «Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» - Москва ФГБУ «Гидрометцентр России»
4. Антонов С.А. Тенденции изменения засушливости вегетационного периода на территории Ставропольского края / С. А. Антонов // . – 2013 г.
5. Дубенок Н.Н. Приоритеты научного обеспечения развития мелиорации / Н. Н. Дубенок // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2014 г.
6. Симбиотическая фиксация азота многолетними бобовыми травами в луговых агрофитоценозах / Н. Н. Лазарев, О. В. Кухаренкова, С. М. Авдеев [и др.] // Кормопроизводство. – 2022 г.
7. Галушин Д.А. Межгодовая динамика химического состава и кислотности атмосферных осадков на территории Приморского края за период с 2011 по 2020 г / Д. А. Галушин, С. А. Громов, С. М. Авдеев // Успехи современного естествознания. – 2022 г.
8. Новости Санкт-Петербурга и Ленинградской области «Комсомольская Правда» – 2024 г.
9. Архивы погоды с сайта Погода и Климат – прогнозы погоды, новости погоды, климатические данные – <http://www.pogodaiklimat.ru/>
10. Аитова О.А., Канухина А.Ю. Перемещение полей радиоэха при внутримассовых грозах в Пулковско– 2023. – С. 82-85.
11. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник, – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 408 с.
12. ПАО «НПО «АЛМАЗ» ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.А.РАСПЛЕТИНА – 1990-2025 гг.
13. ООО «Дзен Платформа» – 2015-2025

14. Афиногеева Л.П., Романова Е.В. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах. – Л.: Гидрометеиздат, 1981 – 295 с.

Таблица 1 – Количество случаев внутримассовых гроз за период с 2009 по 2014 гг. с направлением ветра по ДМРЛ с 180 до 359 градусов.

ДАТА	Направление перемещения радиоэха по ДМРЛ в град	Скорость перемещения радиоэха по ДМРЛ км/час
14.05.2010	330	30
17.05.2010	290	40
26.07.2010	350	50
27.07.2010	350	50
08.07.2011	270	20
15.06.2012	320	20
26.06.2013	320	20
20.07.2013	180	20
23.07.2013	240	40
23.07.2013	230	50

Таблица 2 – Количество случаев внутримассовых гроз за период с 2009 по 2014 гг. с направлением ветра по ДМРЛ со 0 до 179 градусов.

ДАТА	Направление перемещения радиоэха по ДМРЛ в град	Скорость перемещения радиоэха по ДМРЛ км/час
20.06.2009	70	40
11.07.2009	0	40
11.07.2009	0	50
12.07.2009	120	40
15.07.2009	80	40
22.07.2009	90	20
11.08.2009	50	30
13.08.2009	40	30
13.08.2009	40	30
29.09.2009	100	30
30.09.2009	110	40
08.05.2010	30	50
23.05.2010	50	30
23.05.2010	30	30
25.06.2010	50	40
08.08.2010	30	40
08.08.2010	30	40
14.08.2010	60	40
23.08.2010	90	50
23.08.2010	120	50
25.08.2010	30	40
25.08.2010	50	30
25.05.2011	70	40
21.06.2011	60	40
25.06.2011	0	40
09.08.2011	50	50
10.08.2011	50	50
19.08.2011	90	20
01.09.2011	60	20
03.09.2011	90	50
24.04.2012	0	40
21.07.2012	80	30
25.07.2012	70	40
24.08.2012	120	30
30.04.2013	80	60

Продолжение таблицы 2

13.05.2013	70	40
13.05.2013	50	60
17.05.2013	20	20
18.05.2013	50	20
19.05.2013	50	30
17.06.2013	60	40
05.07.2013	60	30
12.08.2013	60	40
20.05.2014	10	50
25.05.2014	90	30
25.05.2014	90	20
02-03.06.2014	0	40
09.06.2014	160	20
03.07.2014	90	30
15.07.2014	50	30
28.07.2014	60	30
29.07.2014	90	50
13.08.2014	60	30
16.08.2014	60	30
17.08.2014	70	20
22.08.2014	90	40
26.08.2014	60	20
10.09.2014	0	20