



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии климатологии и охраны атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему: «Конвективные характеристики грозовых явлений для аэропорта
Пулково города Санкт-Петербург»

Исполнитель Колесников Егор Константинович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Канухина Анна Юрьевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю» заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна

(фамилия, имя, отчество)

« 19 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Содержание	
Введение	3
1. Условия развития и характеристики конвективной неустойчивости атмосферы при грозах .5	
1.1. Классификация гроз	6
1.2. Термодинамические и синоптические условия формирования гроз.....	9
1.3. Основные методы прогнозирования гроз	10
1.4 Модели конвекции – адиабатические и неадиабатические.....	12
1.4.1. Методы прогноза гроз на основе адиабатической теории атмосферных процессов.....	13
1.4.2. Методы прогнозирования гроз на основе модели неадиабатической конвекции. 14	
1.5. Международные индексы для оценки конвективной неустойчивости атмосферы	15
1.5.1. Kind или K — индекс неустойчивости	16
1.5.2. Li — Lifted index	17
1.5.3. VT — Vertical Totals индекс	18
1.5.4. CrossTotals (CT)	19
1.5.5. TT — Total Totals индекс	20
2. Климатические и физико-географические условия города Санкт-Петербург	21
2.1. Краткая характеристика климата города Санкт-Петербург	21
2.2. Географическое положение города Санкт-Петербург	24
2.2.1. Физико-географическое положение исследуемого района (Пулково)	25
3. Исходные данные и их систематизация	27
3.1. Грозовая деятельность города Санкт-Петербург за теплый период с 2015 по 2022 годы	27
4. Статистические характеристики индексов неустойчивости атмосферы	36
4.1. Сравнительный анализ пороговых значений индексов неустойчивости зарубежных стран и Санкт-Петербурга (Пулково)	37
Заключение.....	39
Список используемой литературы.....	40

Введение

Опасные явления погоды являются одним из самых важных факторов при изучении любых географических территорий, эти явления представляют собой значимые элементы климата. Выпускная квалификационная работа заключается в исследовании характеристик грозовых явлений для аэропорта Пулково города Санкт-Петербург. Гроза сложный атмосферный процесс, возникновение которого обусловлено образованием кучево-дождевых облаков. Одним из следствий неустойчивости атмосферы как раз и является сильная облачность. Гроза это бурный процесс, обычно сопровождаемый дождем, молниями, громом и сильными порывами ветра. Наибольшую опасность представляют молниевые разряды. Молнии - это большие разряды, которые возникают между участками облаков, заряженными разноименно. Удар молнии опасен также и высокими температурами свыше 30000°C . Молнии провоцируют пожары, выводят из строя электрооборудование, вызывают гибель людей.

Целью работы является анализ термодинамических параметров атмосферы в дни с грозами для района аэропорта Пулково в теплый период с 2015 по 2022 и определение их пороговых значений для дальнейшего возможного использования при составлении прогноза внутримассовых гроз.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Создать базу данных о днях с грозами в Пулково.
2. Систематизировать и проанализировать эти данные по синоптической ситуации и по месяцам.
3. Сделать статистический обзор конвективных характеристик атмосферы(индексов конвекции).

4. Определить пороговые значения индексов неустойчивости, при которых над территорией Санкт-Петербурга развивается грозовая деятельность.

И были использованы следующие исходные данные:

- данные о днях с грозами, зарегистрированными на метеорологических станциях Санкт-Петербурга;
- архивная информация МРЛ-5 Санкт-Петербург о грозовых очагах в теплый период с 2015 по 2022 гг.;
- данные радиозондирования атмосферы;
- карты приземного анализа, карты барической топографии и кольцевые карты погоды.

1. Условия развития и характеристики конвективной неустойчивости атмосферы при грозах.

Основным условием возникновения конвективных вертикальных движений воздушных масс является наличие действия механических сил, которые действуют на элементарный объем и сил плавучести, вызываемые динамическими факторами. В данных случаях образуются принудительная конвекция и тепловая (свободная) конвекция соответственно.

Главными причинами возникновения тепловой конвекции в пограничном слое атмосферы служит нагрев подстилающей поверхности, который является неравномерным, а также неустойчивая стратификация атмосферы. При этих условиях прогретый воздух начинает подъем со своего начального уровня, с подъемом его температура снижается медленнее, чем у окружающего воздуха, поэтому из-за более высокой температуры он оказывается легче окружающей среды на уровнях выше начального.

Конвекция вынужденная в свою очередь чаще всего наблюдается в зоне атмосферных фронтов. При вынужденной конвекции воздушная масса изначально начинает подъем из-за вертикальных перемещений или из-за того, что поток воздуха направлен на возвышающуюся поверхность. В данном случае подъем выше конденсационного уровня возникает из-за тепловыделения конденсации (под воздействием тепловых причин).

Развитие конвективных облаков, в которых наблюдаются интенсивные вертикальные перемещения, вызывающие наличие зон интенсивной турбулентности и образование крупных кристаллов льда, тесно связано с возникновением гроз.

Грозы принято разделять на внутримассовые и фронтальные (теплого и холодного фронта). Они разделяются в зависимости от синоптических условий.[1]

1.1. Классификация гроз

Внутримассовые грозы

Задняя часть циклона и заполняющий циклон являются естественными синоптическими точками, в которых возникают и развиваются внутримассовые грозы.

Далее описан процесс формирования и развития внутримассовых гроз. Холодный воздух вторгается в заднюю часть циклона в основном с ветрами направленными с севера. Этот процесс в свою очередь сопровождается повышением давления вблизи поверхности земли, порывы ветра также усиливаются. Холодный воздух нижней части тропосферы в этих условиях обычно довольно нестабилен, и в этом слое активно развивается динамическая и термическая нестабильность. Этот процесс способствует образованию различных по количеству кучево-дождевых облаков, которые, в свою очередь, могут сопровождаться грозами. Однако грозы редко появляются над континентом в умеренных широтах, из-за того, что облака в этом случае не получают достаточного вертикального развития. Кучево-дождевой облачный покров в таких условиях имеет вертикальную мощность в диапазоне от 4 до 5 км, поскольку удерживающие слои расположены выше. В южных широтах страны, где потепление и увлажнение воздуха более значительные, мощность облаков будет больше и находится в пределах 6-8 км, в связи со всем этим грозы в этих районах более интенсивные. Этому способствует подъем воздушных масс по склонам гор, например, на Кавказе. Однако в Кавказском регионе на побережье Черного моря грозы часто наблюдаются в холодное время года из-за того, что воздушная масса, проходящая над теплой поверхностью моря, довольно быстро увлажняется и прогревается. Также, из-за низких суточных колебаний температуры водной поверхности над морем, грозы могут возникать в первой и во второй половине дня, однако над закрытыми морями большинство гроз происходит во второй половине дня.

Грозы внутримассового типа в основном располагаются на расстоянии приблизительно равном от 20 до 30 км друг от друга или могут возникать изолированно. В связи с этим пилоты воздушных судов могут без каких-либо проблем обходить внутримассовые грозы.

Продолжительность внутримассовых гроз невелика, и обычно они длятся менее часа. Этот тип гроз может быть связан с одной или несколькими ячейками кучево-дождевых облаков, в связи с этим принято выделять 3 стадии формирования грозы:

- образование кучевых облаков и их развитие вследствие конвекции и неустойчивости воздушных масс и образования кучево-дождевых облаков;
- пиковая фаза развития кучево-дождевой облачности, когда наблюдаются наиболее частые осадки, во время прохождения грозового фронта - шквалистый ветер, а также самая мощная гроза. Эта фаза характеризуется интенсивными нисходящими движениями воздуха.
- разрушение грозовой бури (разрушение кучево-дождевых облаков, уменьшение частоты осадков и гроз вплоть до их полного прекращения). [5]

Грозы фронтального типа (холодный и теплый фронт)

Общей чертой фронтальных гроз, по сравнению с внутримассовыми, является то, что их протяженность по горизонтали очень большая. Зона активности гроз располагается, как правило, вдоль фронта на несколько сотен километров, поперек фронта имеет меньшие размеры – около нескольких десятков км. Следовательно, обходить такие грозы воздушным судам гораздо труднее. Однако, если пролететь вдоль линии фронта, можно обнаружить места, где сплошная линия грозовых облаков прерывается или вершины облаков резко опускаются. В таких местах можно легко обойти линию фронта. Большую помощь в поиске таких мест обычно оказывает радар. Далее рассмотрим подробнее основные характеристики и различия гроз холодного и теплого фронтов.

Начнем с гроз холодного фронта. Этот тип гроз чаще остальных встречается на территории нашей страны. Они возникают в результате интенсивного подъема теплого воздуха перед тем, как вторгается клин холодного воздуха. Интенсивность процесса образования кучево-дождевых облаков и гроз соответственно напрямую зависит от влажности и температуры теплой воздушной массы. Из-за вышеперечисленных факторов следует, что как и внутримассовые грозы, грозы холодного фронта достигают пика интенсивности в вечерние и ночные часы. Но, несмотря на это довольно нередко возникают случаи, когда утром фронт проходит на фоне безоблачного неба, а днем тот же самый фронт вызывает осадки и грозы. Грозовые облака на холодных фронтах часто достигают высоты тропопаузы, иногда даже прорываются через нее. Однако часто бывают случаи, когда верхняя граница грозовых облаков не достигает тропопаузы, это возможно даже на одном и том же фронте, при почти равных значениях влажности воздуха и температуры у поверхности земли. Зависит это от того, насколько благоприятные условия для поддержания движений облачности вверх в слоях тропосферы. Если данные требования соблюдаются, то облако, которое образовалось в нижней части тропосферы, прорывается наверх и продолжает развиваться в верхних слоях тропосферы, оно продолжает развитие до тех пор пока не достигнет тропопаузы. Если же такие условия не соблюдаются, развитие облачности вертикально вверх прекращается не достигая тропопаузы. Данное развитие вертикальных движений, в свою очередь напрямую зависит от распределения ветра (характера горизонтальных потоков воздуха во фронтальной зоне на большой высоте). Самыми благоприятными условиями для развития гроз с мощными кучево-дождевыми облаками создаются при расхождении воздушных потоков, находящихся на большой высоте. Эти расхождения в свою очередь связаны со снижением скорости ветра, направленного вдоль течения.

Далее рассмотрим поподробнее грозы теплого фронта. Такие грозовые явления встречаются не так часто, как на холодном фронте. Это связано с тем, что подъем теплого воздуха протекает в разы медленнее, чем на холодном фронте, скорость данного процесса не превышает нескольких сантиметров в секунду. Однако в том случае, если теплый воздух расслаивается, то в этом случае вертикальное движение начинает принимать турбулентный характер, из-за этого возникают и развиваются кучево-дождевые облака, за которыми и следуют грозовые явления теплого фронта. Следовательно кучево-дождевая облачность может быть не всегда видна, так как будет скрыта слоистой облачностью, такая ситуация может затруднить полет воздушного судна, ведь пилот может не заметить зону активной грозы. Данный тип гроз над территорией России возникает как правило при перемещении циклонов с юга, в момент, когда теплые тропические воздушные массы выносятся в теплые сектора. Характерной чертой гроз теплого фронта является то, что они как и грозы холодного фронта имеют наибольшую активность во второй половине дня. [5]

1.2. Термодинамические и синоптические условия формирования гроз

Грозы образуются при определенных термодинамических и синоптических условиях.

Термодинамические условия:

1. Наличие достаточно высокой температуры воздуха на поверхности земли, что, в свою очередь, может быть связано с солнечной активностью.
2. Повышенная влажность.
3. Вертикальный температурный градиент должен быть достаточно высоким, чтобы создать условия для конвекции воздуха.

Синоптические условия:

1. Наличие атмосферной неустойчивости, которая может быть вызвана различными факторами, такими как атмосферный фронт, нагрев земной поверхности и т.д.
2. Наличие повышенного давления на границе области неустойчивости.
3. Наличие вертикального движения воздуха, которое может быть вызвано атмосферными фронтами, воздушными реками и т.д.

Следует отметить, что наличие этих условий само по себе не гарантирует образования гроз. Для того чтобы образовалась гроза, также необходимо наличие дополнительных факторов, таких как наличие ионизации в атмосфере и т.д. [4]

1.3. Основные методы прогнозирования гроз.

Опасные явления погоды, например грозы, связаны с зонами активной конвекции и классифицируются, как мезомасштабные метеорологические явления. Такие явления образуются вследствие взаимодействия между атмосферными процессами синоптического масштаба и подстилающей поверхностью. Расстояние между метеостанциями, на которых производятся наблюдения во много раз больше конвективных зон по горизонтали. Все эти факторы способствуют затруднению в регистрации, изучении и прогнозировании опасных явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции, в рамках численных моделей атмосферы в том числе. Актуальность изучения условий образования и развития этих явлений очевидна.

Существующие методы прогнозирования гроз не способны отвечать требованиям потребителя. Используемый метод основан на «просеивании» ситуаций без грозы и грозовых с помощью диаграмм. Так, например, для аэропорта города Новосибирск достоверность прогнозов внутримассовых гроз составляет 77%, фронтальных гроз по методу - 55%, а ночных гроз по методу - 67%. Данный подход является весьма неточным и на данный момент не используются, так как диаграммы для данного метода были введены довольно

давно и материалы для них не обновлялись с самого введения. Синоптики, для обнаружения конвективных явлений активно используют данные метеорологических радаров и спутниковые снимки. А также адиабатические и неадиабатические модели конвекции, которые будут рассмотрены чуть дальше. Стоит обратить внимание, на то, что спутники фотографируют в основном внутриоблачные или межоблачные молнии, а самые опасные разряды, находящиеся между облаками и земной поверхностью остаются скрытыми толщей облаков.

С начала 40-х годов 20 века были разработаны термодинамические параметры для оценки вероятности гроз на основе данных одного профиля радиозондирования. Стоит отметить, что в зарубежных источниках данные термодинамические параметры называются индексами (индекс неустойчивости атмосферы, конвективный индекс, индекс стабильности). В странах Европы почти повсеместно используются данные параметры.

В данный момент существует около 26 параметров состояния атмосферы, которые рассчитаны на основе данных радиозондирования, они используются для построения моделей и составления прогнозов грозовых и других явлений погоды.

В 1953 году А.К. Шолуолтером был введен параметр Showalter stability index (SHOW), который используется и в наши дни. Существует два способа применить этот параметр, они будут рассмотрены ниже.

Первый связан с оценкой вероятности грозы по данным одного профиля радиозондирования. Так, например, некоторые метеорологические службы зарубежных стран публикуют данные о термодинамических параметрах вместе с прогнозирующими правилами в открытом доступе в сети Интернет. Этот способ является очень наглядным, так на экран выводится девять значений анализируемых параметров, окрашенных в разные цвета. Эти цвета находятся в диапазоне от темно-зеленого до красного. Следовательно, чем выше

вероятность грозы, тем ближе цвет будет к красному. В связи с этим любой человек в мире может получить информацию о вероятности грозового явления, даже не обладая специальными знаниями.

Второй метод основан на использовании термодинамических параметров при численном моделировании конвекции, присутствие которой является главным критерием для возникновения грозовых явлений. В европейских странах разработка метода прогнозирования развития конвективных явлений происходит путем статистической интерпретации числовых характеристик прогнозируемых полей с использованием мезомасштабных моделей. [2]

Попытки использовать окончательные результаты зарубежных исследований в нашем регионе не увенчались успехом, поскольку термодинамические характеристики атмосферы и подстилающей поверхности различаются. Исследования показали, что пороговые значения показателей, необходимых для развития конвективных явлений над территорией нашей страны, значительно ниже, чем приведенные в зарубежных источниках. Такой результат мог быть следствием того, что плотность аэрологических станций на нашей территории не столь высока. Из-за того, что конвекционные ячейки имеют диаметр не более 10 км, опасные явления носят локальный характер и не всегда могут быть зарегистрированы. Например, развитие конвекции над Томской областью можно предсказать только путем измерения температуры и ветра на двух близлежащих станциях, которые находятся довольно далеко друг от друга (около 360 км), поэтому грозы, происходящие на таком расстоянии, не могут быть зафиксированы со 100% точностью. Термодинамические параметры атмосферы в районе аэрологического зондирования могут довольно существенно отличаться от тех, которые характерны для атмосферы в районе наблюдения опасных конвективных явлений.

В нашей же стране используются адиабатические и неадиабатические модели конвекции, которые далее рассматривались подробнее.

1.4. Модели конвекции – адиабатические и неадиабатические.

Адиабатическая модель конвекции основана на предположении, что процесс перемещения конвективно-нестабильной массы происходит без обмена теплом с окружающей средой. В этом случае изменение температуры связано только с изменением давления и плотности.

Модель неадиабатической конвекции учитывает теплообмен между конвективно-нестабильными газами и окружающей средой. В этом случае изменение температуры связано не только с изменением давления и плотности, но и с теплообменом.

Обе модели имеют свои собственные приложения в геофизике, науках об атмосфере и океане. Адиабатическая модель используется для описания атмосферной циркуляции, в то время как неадиабатическая модель используется для изучения осадков и образования облаков. [2]

1.4.1. Методы прогноза гроз на основе адиабатической теории атмосферных процессов

Прогнозирование опасных явлений с использованием метода частиц считается одним из наиболее доступных и простых методов. Синоптик, используя данные измерения температуры и ветра в атмосфере, обрабатывает аэрологическую диаграмму. На этой диаграмме построена кривая состояния, которая показывает, как объем воздуха (изолированный) изменит свою температуру при повышении высоты. Остановимся поподробнее на подъемной силе, это сила, которая действует на объем воздуха, она прямо пропорциональна разнице в плотностях окружающей среды и этого объема. Также подъемная сила дает ускорение данному объему воздуха, которое пропорционально разнице температур между объемом воздуха и окружающим воздухом на каждом заданном уровне. Если объем воздуха на всех уровнях в слое будет иметь большую температуру, чем окружающая среда, то он начнет быстро подниматься через этот слой, и на верхней границе слоя у нее появится

кинетическая энергия объема воздуха (частицы), которую можно будет определить по следующей формуле:

$$E = -R * \int_{P_0}^P (T_2 - T) d \ln p \quad (1.1)$$

где

- T - температура окружающего воздуха в Кельвинах;
- T₂ - температура поднимающегося объема воздуха в Кельвинах;
- p₀ и p - давление на начальном уровне и на верхнем уровне;
- R - газовая постоянная сухого воздуха.

Значение этой энергии на аэрологической диаграмме определяется путем измерения площади, которая находится между кривой стратификации, кривой состояния и изобарами p₀ и p. Энергия неустойчивости положительна, если кривая состояния ограничивает эту область справа, и отрицательна, если кривая состояния лежит слева от кривой стратификации. На высоте пересечения кривой состояния с кривой стратификации, где T₂ = T, ускорение частицы стремится к нулю. В то же время скорость частиц на этом уровне является максимальной. Частица по инерции поднимается в вышележащем устойчивом слое, а затем замедляется под действием толкающей силы, которая направлена вниз. Скорость частицы обращается в ноль на том уровне, где ее кинетическая энергия будет потрачена на противодействие силам выталкивания. [2]

1.4.2. Методы прогнозирования гроз на основе модели неадиабатической конвекции

Одним из методов для прогнозирования гроз, основанных на модели неадиабатической конвекции, является метод конвективной активности. Этот метод основан на анализе изменений температуры и влажности на различных уровнях атмосферы за определенный период времени. При использовании

этого метода также учитывается скорость вертикального движения воздуха и ветер.

Другим методом прогнозирования гроз, основанным на модели неадиабатической конвекции, является метод атмосферной стабильности. Этот метод позволяет определить, насколько устойчива атмосфера к вертикальным перемещениям воздуха. Он основан на анализе изменений температуры и влажности на разных уровнях атмосферы и их взаимосвязи друг с другом.

Существуют также более сложные методы прогнозирования гроз, основанные на модели неадиабатической конвекции, которые учитывают множество факторов, включая температуру земной поверхности, географическое расположение места прогнозирования, атмосферное давление и другие параметры. Однако для их применения требуются компьютерные программы и высококвалифицированные специалисты. [3]

1.5. Международные индексы для оценки конвективной неустойчивости атмосферы

Расчетные (косвенные) методы прогнозирования гроз используются уже очень давно. Эти методы основаны на том факте, что процессы электризации в облаке не учитываются, а лишь косвенно схематично описываются через термодинамические параметры атмосферы. На данный момент в мире известно 26 индексов неустойчивости, которые используются для прогнозирования конвективных погодных явлений.

Показатели конвективной неустойчивости делятся на следующие группы:

- Показатели, основанные на методе частиц (поднятая, конвективная доступная потенциальная энергия)

- Показатели, полученные путем расчета параметров ветра на разных высотах или изобарических поверхностях (сдвиг на низком уровне, сдвиг в глубоком слое)
- Индексы, основанные на расчете характеристик температуры и влажности атмосферы (ВИД, итоговые значения)
- Комплексные индексы неустойчивости (индекс глубокой конвекции, индекс мезомасштабных конвективных систем)

Их классификация зависит от того, в каком слое атмосферы оценивается степень неустойчивости - основного предиктора опасности гроз. Большинство индексов оценивают степень неустойчивости в облачном слое или в подоблачных слоях. Это связано с тем, что восходящие вертикальные движения начинаются в теплом влажном воздухе облачного слоя, в облачном слое здесь увеличиваются и накапливаются гидрометеоры, такие как капли воды, снежные крупинки и частицы льда, взаимодействие которых приводит к возникновению электрических разрядов.

В данной работе были рассмотрены индексы, основанные на методе частиц, и индексы, основанные на расчете характеристик температуры и влажности атмосферы. [12]

1.5.1. Kind или К — индекс неустойчивости

Расчет К основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. К характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз.

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - (T - T_d) / 700 \quad (1.2)$$

К — индекс неустойчивости (число Вайтинга),

T_{850} — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, °С;

T500 — температура воздуха на 500 гПа, °С;

Td850 — температура точки росы на 850 гПа, °С;

$\Delta Td700$ — дефицит точки росы (T-Td) на поверхности 700 гПа, °С. [8, 10]

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

Таблица 1.1. Количественная оценка индекса К

1.5.2. Li — Lifted index

Li - это разница температур между окружающим воздухом и определенной единицей объема, которая поднялась [адиабатически] с поверхности земли (или с заданного уровня) до уровня 500 ГПа. Li рассчитывается с учетом вовлечения окружающего воздуха.

Li — характеризует тепловую стратификацию атмосферы по отношению к вертикальным перемещениям воздуха. Если значения Li положительны, то

атмосфера (в соответствующем слое) стабильна. Если значения Li отрицательные, атмосфера нестабильна.

$$Li = Tr(500) - T500 \quad (1.3)$$

$Tr(500)$ -температура частиц, поднятых с уровня изобарических поверхностей 500 гПа, °С

$T500$ - температура воздуха на уровне 500 гПа, °С [8, 10]

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

Таблица 1.2. Количественная оценка индекса Li

1.5.3. VT — Vertical Totals индекс

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

$$VT = T850 - T500 \quad (1.4)$$

T850 — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, °С;

T500 — температура воздуха на 500 гПа, °С

Если $VT > 28$, следовательно тропосфера обладает высоким потенциалом конвективной неустойчивости, достаточным для образования гроз. [8, 10]

1.5.4. CrossTotals (CT) – содержит точку росы на высоте 850 гПа.

$$CT = Td850 - T500 \quad (1.5)$$

Td850 — температура точки росы на 850 гПа, °С;

T500 — температура воздуха на 500 гПа, °С [8, 10]

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

Таблица 1.3. Количественная оценка индекса CT

1.5.5. ТТ — Total Totals индекс

Этот индекс используется для оценки мощности развития конвективной неустойчивости, представляет собой сумму СТ — Cross Totals индекса и VT — Vertical Totals индекса

$$ТТ = VT + СТ \quad (1.6)$$

СТ — Cross Totals индекс;

VT — Vertical Totals индекс. [8, 10]

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

Таблица 1.4. Количественная оценка индекса ТТ

2. Климатические и физико-географические условия города Санкт-Петербург

2.1. Краткая характеристика климата города Санкт-Петербург

Санкт-Петербург относится к умеренной климатической зоне, переходящей от умеренно континентальной к умеренно морской. Такой тип климата объясняется географическим положением и атмосферной циркуляцией, характерной для этого района. Это связано с относительно небольшим количеством солнечного тепла, поступающего на поверхность Земли и в атмосферу. Согласно классификации климата Кеппена, он классифицируется как влажный континентальный. Влияние циклонов Балтийского моря приводит к жаркому, влажному и короткому лету и долгой, холодной и влажной зиме.

Характерна частая смена воздушных масс, во многом обусловленная циклонической активностью. Летом преобладают западные и северо-западные ветры, зимой - западные и юго-западные. С запада и юго-запада, со стороны Атлантического океана, где расположены Азорский антициклон и исландский минимум давления, на территорию региона поступает влажный морской воздух, который оказывает смягчающее воздействие на климат. Из-за частого проникновения теплых воздушных масс с океана зимы в Санкт-Петербурге не суровые, и для широты 59°, Санкт-Петербургский район - один из самых теплых в Российской Федерации. Температура января здесь составляет 5 °С. В июле средняя температура в Санкт-Петербурге составляет 18,97 °С.

В принципе, зимой в Санкт-Петербурге особенности морского климата более выражены, чем континентального, в то время как летом для Санкт-Петербурга и его пригородов, наоборот, более характерны особенности континентального климата, при котором годовой максимум температуры наблюдается в июле. В

годовом исчислении температуры воздуха самым холодным месяцем является февраль, а самым теплым - июль.

Санкт-Петербург, по своему географическому положению, попадает в зону избыточного увлажнения. Поэтому для города характерно высокая влажность воздуха – около 80% (летом – 60-70%, а зимой - 83-88%), поскольку количество осадков превышает испарение влаги примерно на 200-250 мм. На долю жидких осадков приходится 65% (это также происходит зимой), твердых осадков - 19%, смешанных осадков - 16%.

В среднем в году бывает 62 солнечных дня, поэтому большую часть года преобладают дни с пасмурной погодой и рассеянным освещением.

Продолжительность дня в Санкт-Петербурге колеблется от 5 часов 51 минуты 22 декабря до 18 часов 50 минут 22 июня.

Санкт-Петербург, по своему географическому положению, попадает в зону избыточного увлажнения. Среднегодовое количество осадков в Санкт-Петербурге за последние 30 лет составляет 653 мм. Количество осадков в Санкт-Петербурге в основном определяется интенсивностью циклонической активности.

Осадки выпадают неравномерно в течение всего года: большая их часть (67%) выпадает в теплый период (апрель – октябрь, с максимумом в июле – августе) и только 33% – в холодный период (минимум в феврале – марте).

В северной части города и на севере пригородной зоны годовое количество осадков выше, чем в центральных районах, примерно на 11% и более чем на 20% соответственно. В устье Невы, напротив, годовое количество осадков на 5-7% меньше, чем в центре. Еще меньше осадков выпадает на побережье Финского залива (в поселке Лисий Нос, Петродворце, Стрельне) и на островах (в Кронштадте), где разница с центром достигает 8-9%. [6]

2.2. Географическое положение города Санкт-Петербург

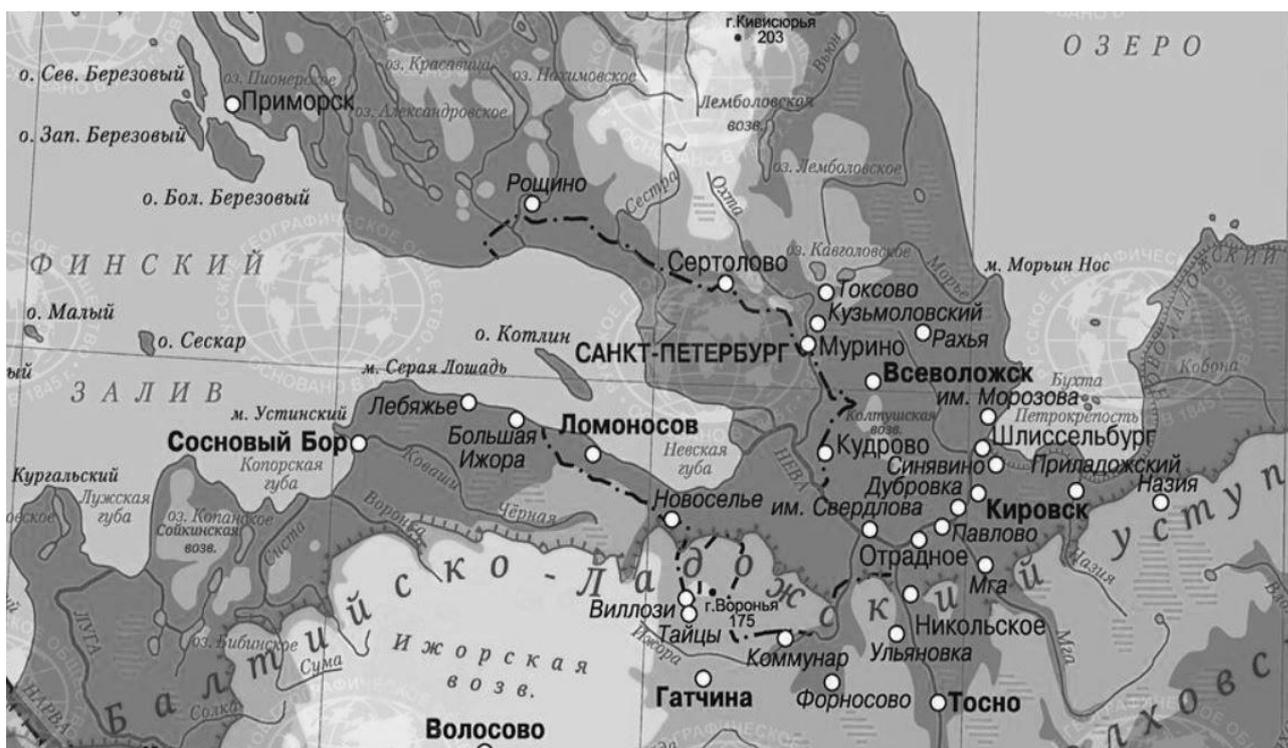


Рисунок 2.1. Физическая карта Санкт-Петербурга

Координаты города Санкт-Петербург: $59^{\circ}57'$ с. ш. $30^{\circ}19'$ в. д. Занимая побережье Невской губы Финского залива, прилегающее к устью реки Невы и многочисленным островам дельты Невы, город простирается с северо-запада на юго-восток на 90 км. Высота над уровнем моря по районам: центр — 1-6 м, север — 5-31 м, юг и юго-запад - 5-23 м. Самым высоким местом в городе являются Дудергофские высоты в районе Красного Села с максимальной высотой 176 м. Несмотря на общее однообразие окрестностей, рельеф разнообразен, и уже к юго-западу от города выделяется Ижорская возвышенность, к северу - холмы Карельского перешейка, Приморско-Вуоксинский озерный край. На территории города находится нулевая отметка системы отсчета высот и глубин, которая служит отправной точкой для нивелировочных сетей нескольких штатов. Общая протяженность всех водотоков на территории Санкт-Петербурга достигает 282 км, а их водная поверхность составляет около 7% от общей площади города. Главной водной

артерией города является река Нева, которая впадает в Невскую губу Финского залива, относящуюся к Балтийскому морю.

Географически территория города расположена в полосе южной тайги — тех непроходимых хвойных лесов, которые покрывают север России. Изначально здесь преобладал таежный ландшафт — глухие таежные леса, время от времени прерываемые топкими болотами. Даже сегодня леса занимают около 50% территории, а болота — около 15%. Преобладают хвойные деревья — 61% площади леса; также произрастает береза — 28%; осина — 8%; ольха (серая и черная) — 3%. Распределение древесных пород по территории неравномерно. Наибольшее значение имеют хвойные леса: основными породами в них являются ель и сосна. Мелколиственные леса, небольшие рощицы дуба, осины, липы, рябины и других деревьев иногда можно встретить на западе и юго-западе. Почти все луга образовались на месте вырубки лесов, иногда на 13 заброшенных пахотных землях, только некоторые пойменные луга являются коренными. [7]

2.2.1. Физико-географическое положение исследуемого района (Пулково)

Аэродром Пулково расположен на Приневской низменности, простирающейся с запада на восток от побережья Финского залива до Ладожского озера.

Приневская низменность представляет собой долину шириной 30-50 км и глубиной 50-100 м, пологими ступенями спускающуюся к Финскому заливу.

В самой нижней его части протекает река Нева.

Приневская низменность имеет равнинный рельеф. Болотистые почвы занимают почти 50% Приневской и Тосненской низменностей.

Приневская низменность на севере сменяется камским рельефом высотой 5-30 м. Далее к северу Камские горы переходят в небольшие возвышенности: Колтушскую, Парголовскую (60 м над уровнем моря), Поклонную гору (42 м над уровнем моря). Дальше на север Кама переходит в возвышенность, занимающую центральную часть Карельского перешейка.

Побережье Финского залива, которое характеризуется рядом террас с прибрежными валами и дюнами. К югу от прибрежных низменностей Финского залива лежит возвышенное плато, называемое Ордовинским или Ижорским.

Самой высокой является северная часть плато: Можайская возвышенность с наивысшей точкой 168 м над уровнем моря.

Вторая нижняя ступень расположена в виде отдельных холмов, средняя высота которых составляет 50-60 м, а самая большая – Пулковские высоты - 75 м. К югу плато постепенно понижается.

В районе аэропорта нет больших лесов. Вдоль взлетно-посадочной полосы 1 есть небольшой лес.

Рядом с аэропортом нет крупных промышленных предприятий, но близость города создает особенности микроклимата.

3. Исходные данные и их систематизация

Исходные данные представляют из себя перечень дат гроз за теплый период (апрель-сентябрь) с 2015 по 2022 гг.

С помощью приземных карт грозы были разделены на внутримассовые, теплового фронта, холодного фронта и фронта оклюзии. Если тип грозы не удавалось установить сразу, использовались кольцевые карты погоды и карты барической топографии.

Были созданы таблицы, в которых указывается количество случаев разных типов гроз по годам и сделаны 2 гистограммы повторяемости гроз по годам и по месяцам, для удобства определения самого часто встречающегося типа гроз и наглядности.

После того, как был определен самый часто встречающийся тип гроз за указанный период, приступил к рассмотрению конвективных характеристик. Конвективные характеристики рассматривались только для самого повторяемого типа гроз. Для каждой даты были выделены и выписаны характеристики неустойчивости атмосферы, и из этой выборки составлялась статистика (максимум, минимум, медиана, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и среднее значение). Для поиска характеристик неустойчивости использовалась архивная информация МРЛ-5 Санкт-Петербург о грозовых очагах в теплый период с 2015 по 2022 гг.

С помощью статистики были определены доверительные интервалы значений индексов неустойчивости атмосферы. Далее были рассмотрены таблицы значений индексов неустойчивости, используемые за рубежом, для сравнения с пороговыми значениями в г. Санкт-Петербурге (Пулково).

3.1. Грозовая деятельность города Санкт-Петербург за теплый период с 2015 по 2022 годы.

Далее представлены табличные значения грозовых явлений разных типов по годам.

внутримассовые за 2015г	теплый фронт за 2015г	холодный фронт за 2015г	фронт оклюзии за 2015г
5	0	4	1
29.04		02.06	30.07
07.06		06.08	
10.07		08.08	
17.07		12.08	
03.08			

Таблица 3.1. Количество гроз за теплый период 2015 года

внутримассовые за 2016г	теплый фронт за 2016г	холодный фронт за 2016г	фронт оклюзии за 2016г
8	4	2	2
10.07	16.06	03.07	08.04
12.07	26.06	04.07	30.08
15.07	06.08		
24.07	29.08		
25.07			
26.07			
31.07			
04.09			

Таблица 3.2. Количество гроз за теплый период 2016 года

внутримассовые за 2017г	теплый фронт за 2017г	холодный фронт за 2017г	фронт оклюзии за 2017г
9	2	1	0
13.07	12.08	19.08	
16.07	20.08		
18.07			
19.07			
21.07			
22.07			
05.08			
06.08			
17.08			

Таблица 3.3. Количество гроз за теплый период 2017 года

внутримассовые за 2018г	теплый фронт за 2018г	холодный фронт за 2018г	фронт оклюзии за 2018г
10	0	2	2
11.06		18.05	16.05
19.06		03.08	12.08
14.07			
19.07			
22.07			
28.07			
07.08			
12.09			
13.09			
16.09			

Таблица 3.4. Количество гроз за теплый период 2018 года

внутримассовые за 2019г	теплый фронт за 2019г	холодный фронт за 2019 г	фронт оклюзии за 2019г
6	2	2	4
21.05	11.05	09.06	02.07
07.06	29.05	21.06	03.07
13.06			13.07
02.07			08.08
12.07			
15.08			

Таблица 3.5. Количество гроз за теплый период 2019 года

внутримассовые за 2020г	теплый фронт за 2020г	холодный фронт за 2020г	фронт оклюзии за 2020г
4	1	3	0
18.06	16.06	09.06	
01.07		27.06	
13.07		28.06	
20.07			

Таблица 3.6. Количество гроз за теплый период 2020 года

внутримассовые за 2021г	теплый фронт за 2021г	холодный фронт за 2021г	фронт оклюзии за 2021г
8	1	0	1
17.05	20.05		01.08
18.05			
19.05			
25.06			
26.06			
15.07			
28.07			
15.08			

Таблица 3.7. Количество гроз за теплый период 2021 года

внутримассовые за 2022г	теплый фронт за 2022г	холодный фронт за 2022 г	фронт оклюзии за 2022г
6	1	5	0
09.07	11.07	19.06	
10.07		03.07	
12.07		05.07	
19.07		06.08	
23.07		25.08	
08.08			

Таблица 3.8. Количество гроз за теплый период 2022 года

В общей сложности было выявлено 96 гроз, из которых 56 являются внутримассовыми. Поэтому было принято решение рассматривать конвективные характеристики только для внутримассовых гроз.

Далее представлены таблицы и гистограммы отражающие количество гроз по годам и по месяцам

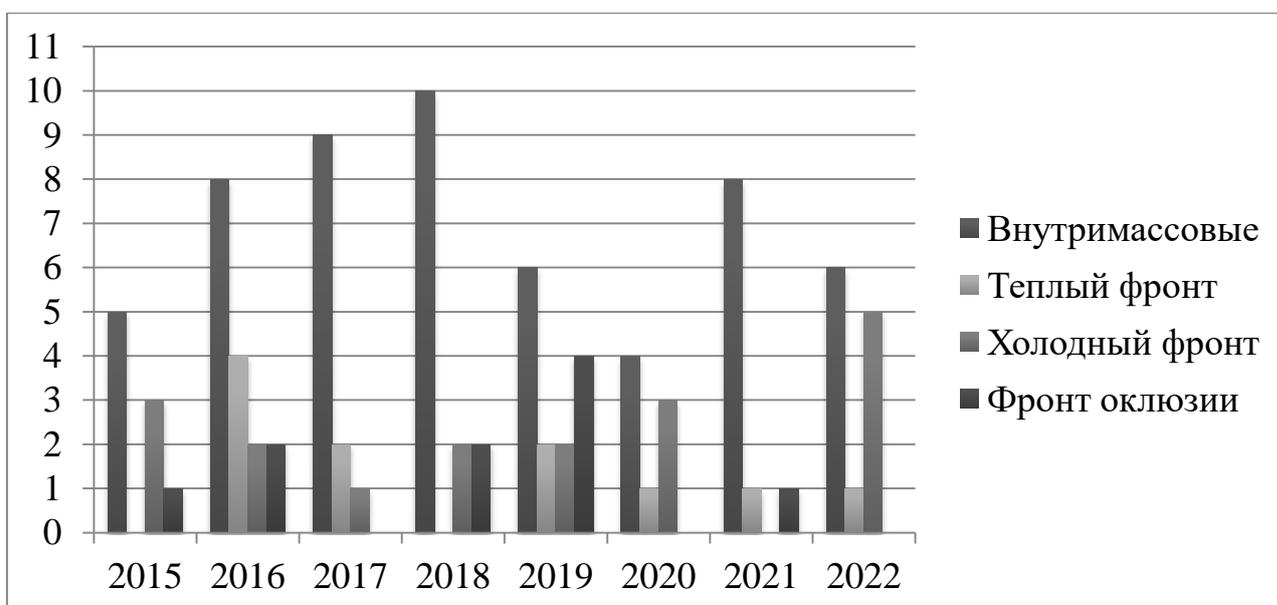


Рисунок 3.1. Количество случаев разных типов гроз в теплый период 2015 – 2022 гг.

	Внутримассовые	Теплый фронт	Холодный фронт	Фронт оклюзии
2015	5	0	3	1
2016	8	4	2	2
2017	9	2	1	0
2018	10	0	2	2
2019	6	2	2	4
2020	4	1	3	0
2021	8	1	0	1
2022	6	1	5	0
Всего	56	11	19	10

Таблица 3.9. Количество случаев разных типов гроз в теплый период 2015 – 2022 гг.

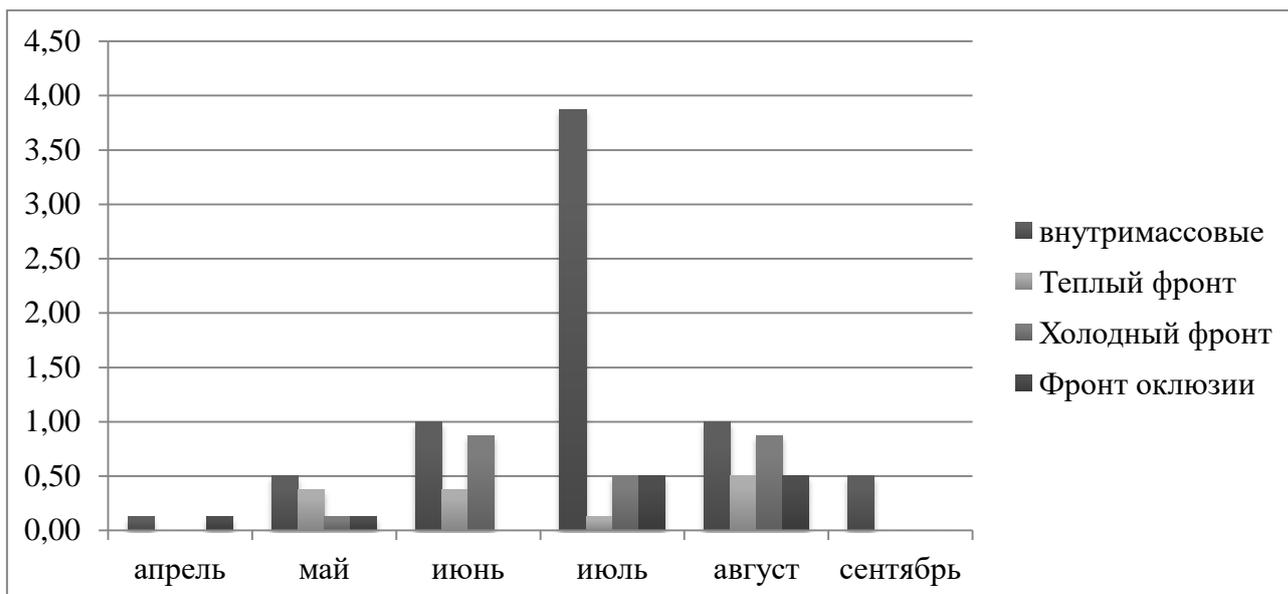


Рисунок 3.2. Количество случаев разных типов гроз по месяцам в теплый период 2015-2022 гг.

	внутримассовые	Теплый фронт	Холодный фронт	Фронт оклюзии
апрель	1	0	0	1
май	4	3	1	1
июнь	8	3	7	0
июль	31	1	4	4
август	8	4	7	4
сентябрь	4	0	0	0

Таблица 3.10. Количество случаев разных типов гроз по месяцам в теплый период 2015 – 2022 гг.

На последней гистограмме видно, что наибольшее количество случаев с грозой наблюдалось в июле, наименьшее – в апреле. Чаше развиваются

внутримассовые грозы, а грозы в зоне холодного фронта преобладают над теми, что происходят на теплых фронтах.

4. Статистические характеристики индексов неустойчивости атмосферы.

После разделения гроз по типам, было определено, что количество внутримассовых гроз было больше чем фронтальных, поэтому конвективные характеристики рассматривались только для внутримассовых гроз.

В данной работе рассматривались следующие характеристики: Lifted (Li), KIND (K) и Totals Totals (TT). По ним и приводится статистика по внутримассовым грозам представленная в табличном виде.

	Lifted	K	TT
Максимум	7,95	41,8	89
Минимум	-16,85	5,1	36,7
Медиана	0,41	26,3	49,55
Дисперсия	15,87938	40,74736	49,8102825
Среднеквадратичное отклонение	3,984894	6,383366	7,05764001
Среднее значение	0,151607	26,225	49,1910714

Таблица 4.1. Статистические характеристики индексов неустойчивости атмосферы.

После были определены доверительные интервалы значений индексов Lifted, Kind, Totals Totals. Они высчитывались как: average \pm standart deviation.

- Li индекс – от -3,75 до 4,05;

($\sigma = 3,9$);

- K индекс – от 19,8 до 32,6;

($\sigma = 6,4$);

- TT индекс от 42,15 до 56,25;

($\sigma = 7,1$).

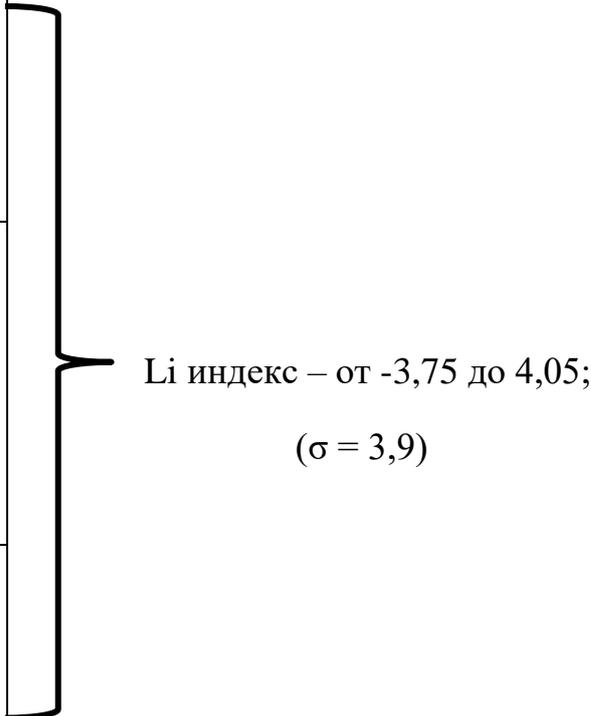
4.1. Сравнительный анализ пороговых значений индексов неустойчивости зарубежных стран и Санкт-Петербурга (Пулково)

Доверительные интервалы, полученные ранее необходимо сравнить со значениями индексов неустойчивости, используемыми за рубежом. Для последующего практического применения в прогнозировании гроз.

Далее представлены таблицы значений индексов используемые за рубежом. С ними и сравнивались показатели доверительных интервалов рассчитанных для г. Санкт-Петербурга (Пулково). Фигурная скобка показывает в каком промежутке зарубежных значений лежат доверительные значения.

Сравнение для индекса L_i

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



 L_i индекс – от -3,75 до 4,05;
 $(\sigma = 3,9)$

Исходя из сравнения видно, что рассчитанный доверительный интервал лежит в промежутке $5 \geq L_i \geq -5$

Сравнение для индекса К

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

К индекс – от 19,8 до 32,6;
($\sigma = 6,4$)

Исходя из сравнения видно, что рассчитанный доверительный интервал лежит в промежутке $20 \leq K \leq 35$

Сравнение для индекса ТТ

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

ТТ индекс от 42,15 до 56,25;
($\sigma = 7,1$)

Исходя из сравнения видно, что рассчитанный доверительный интервал для ТТ лежит в тех же пределах, что и значения из зарубежной таблицы.

Сравнение пороговых значений, приведенных для зарубежных территорий и для Санкт-Петербурга (Пулково) показывает, что для Пулково величина нижнего и верхнего порогов индексов L_i , K заметно ниже, для индекса ТТ величина порогов такая же.

Заключение

В процессе выпускной квалификационной работы были выполнены следующие задачи

- Создана база синоптических и аэрологических данных в дни, когда наблюдалась гроза в теплый период с 2015 по 2022 гг.;
- Систематизированы по синоптической ситуации и по месяцам данные аэрологического зондирования в дни, когда наблюдалась гроза;
- Проведен статистический анализ индекса Llifted, Kind-индекса и индекса Totals Totals, которые характеризуют степень развития конвекции;
- Определены пороговые значения индексов неустойчивости, при которых над Санкт-Петербургом развивается или отсутствует грозовая деятельность.

При проведении работы было выделено 96 грозовых явлений в теплый период с 2015 по 2022 год, 56 из которых являлись внутримассовыми.

На основании проделанных исследований конвективных характеристик грозовой деятельности в аэропорту Пулково в г. Санкт-Петербурге в теплый период с 2015 по 2022 год получено, что наибольшее количество случаев с грозой наблюдалось в июле, наименьшее – в апреле. Чаще развиваются внутримассовые грозы, а грозы в зоне холодного фронта преобладают, над грозами, происходящими на теплых фронтах. По годам чаще всего грозы наблюдались в теплый период 2016 года (16 грозовых явлений, 8 из которых внутримассовые), реже всего в теплый период 2020 года (8 грозовых явлений, 4 из которых внутримассовые).

Были уточнены пороговые значения индексов для аэропорта Пулково (Санкт-Петербург) для последующего практического применения в прогнозировании гроз. Анализ показал, что пороговые значения индексов неустойчивости на территории Санкт-Петербурга ниже, чем в зарубежных странах.

Список используемой литературы

1. Шмeтер С. М. Термодинамика и физика конвективных облаков [Текст] Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 287 с
2. Пономаренко С. И. Оценка способов прогноза гроз и рекомендации по их использованию (метод. указания) [Текст] / Пономаренко С. И., Лебедева Н. В., Чистяков А. Д. Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 54 с.
3. Назаренко А.В. Опасные природные явления. Часть III. Опасные явления погоды конвективного происхождения [Текст]: Учебно-методическое пособие для вузов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. - 62 с.
4. Колобков Н. В. Грозные явления атмосферы [Текст] / Н. В. Колобков, В. А. Мезенцев. - М.: Географгиз, 1951. - 149 с.
5. Богаткин О. Г. Авиационные прогнозы погоды. – СПб.: изд. «БХВПетербург». – 2010. – 288 с.
6. Экологический портал Санкт-Петербурга:
<https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091>.
7. Администрация Санкт-Петербурга: gov.spb.ru/helper/day/
8. *Andersson* , *Andersson*, М., *Jacobsson*, С., *Nilsson*, S. : Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden. *Meteorol. Mag.* 116. 1989. 141–146.
9. *Johns R.H., Doswell C.A.* Severe local storms forecasting. *Wea. Forecasting*, 11. 1992. 558–612.
10. *Schulz P.* Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado. *Wea. Forecasting*, 1989. № 4. P. 73–80.
11. *Fuelberg H., Biggar D.* The preconvective environment of summer thunderstorms over the Florida Panhandle. *Weather and Forecasting*. 1994. 9.. 316–326. doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0316:TPEOST>2.0.CO
12. *Doswell, C. A., D. M. Schultz.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.* 2006. 1(3): 1–22.
13. *Kunz M.* The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007:7.. 327-342. doi.org/10.5194/nhess-7-327-2007.
14. Синоптические карты района // wetter3.de [Электронный ресурс] / Ströer Digital Media GmbH.–Hamburg, 2015. –Access-modus: <http://www1.wetter3.de>
15. Спутниковые изображения // EUMETRAIN [Электронный ресурс] / Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, 2015. –access mode: <http://eumetrain.org>
16. Аэрологические данные зондирования // University of Wyoming [Электронный ресурс] Laramie, 2015. –access mode: <http://www.uwyo.edu/>
17. *Hewson, T.* Objective fronts [Text] / Т. Hewson // *Meteorological Applications*. – 2006. – Vol.5. – P. 37-65.
18. Thermal Front Parameter // [Zamg](http://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell) [Электронный ресурс].– Vienna, 2015. – access mode: <http://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell>