



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: «Анализ условий формирования торнадоопасных облаков в  
различных регионах»

Исполнитель Чапрасова Ирина Васильевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Кашлева Лариса Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна

(фамилия, имя, отчество)

« 17 » июня 2023 г.

Санкт–Петербург  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫЕ ОБЛАКА.....	5
1.1. Термодинамические условия образования кучево-дождевых облаков	5
1.2.Классификация кучево-дождевых облаков.....	7
1.3. Воздушные потоки в зоне кучево-дождевых облаков.....	14
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ТОРНАДООПАСНЫХ ОБЛАКОВ..	21
2.1. Классификация торнадо.....	21
2.2. Прогностические индексы.....	24
ГЛАВА 3. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОРНАДООПАСНЫХ РЕГИОНОВ.....	29
3.1. Мур, штат Оклахома, США.....	29
3.2. Гринсбург, штат Канзас, США.....	31
3.3. Туапсе, Краснодарский край, Россия.....	32
3.4. Филадельфия, штат Миссисипи, США.....	33
3.5. Цукуба, префектура Ибараки, Япония.....	34
3.6. Бржецлав и Годонин, Южноморавский край, Чехия.....	35
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ТОРНАДО.....	37
4.1. Примеры случаев торнадо в различных регионах.....	37
4.2. Анализ прогностических индексов.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	52

## ВВЕДЕНИЕ

Прогноз атмосферных процессов является важнейшей задачей для метеорологов всего мира. Прогнозирование такого опасного явления погоды, как торнадо, способно спасти множество человеческих жизней и понизить ущерб, причиняемый инфраструктуре. Ввиду специфических условий образования прогнозирование смерчей является довольно трудным процессом. На территории всего земного шара ежегодно наблюдается всё больше и больше случаев торнадо в регионах, для которых это опасное явление характерно. Это связано с изменением климата и увеличением числа метеорологических станций. Исследованием смерчей занимаются специалисты практически всех стран мира и возможность заблаговременного прогнозирования становится более доступной. Это является одной из самых актуальных метеорологических задач.

Целью данной работы является изучение атмосферных процессов, приводящих к торнадообразованию.

Для успешной реализации поставленной нами цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучение литературы об образовании торнадоопасных облаков.
2. Изучение современных моделей образования смерча.
3. Сбор и анализ данных.
4. Оценка эффективности индексов, применяемых для прогноза торнадо в различных регионах.

Выпускная квалификационная работа состоит из содержания, введения, четырёх глав, заключения и списка используемых источников. Список литературы включает в себя 12 источников, таких как: учебная литература, материалы из сети Интернет и базы архивных данных радиозондирования атмосферы. Во введении обозначена цель работы и

сформулированы задачи для её успешной реализации. Также указана актуальность данного исследования. В первой главе изучаются общие сведения об образовании и развитии кучево-дождевых облаков и торнадо. Во второй главе рассматривается классификация торнадо по шкалам, принятым ВМО и прогностические индексы (CAPE, Li, SWEAT, Ki, TT). В третьей главе мы рассмотрели особенности физико-географического положения выбранных нами регионов. В четвёртой главе мы изучили случаи торнадо, произошедшие на разных материках в Северном полушарии, провели расчёты и выполнили анализ индексов прогноза торнадо, дали оценку работы прогностических индексов.

## ГЛАВА 1. КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫЕ ОБЛАКА

### 1.1. Термодинамические условия образования кучево-дождевых облаков.

Облака являются одним из самых интересных явлений природы. Им отводится определяющая роль в таком сложном комплексе элементов и явлений, который объединяется понятием погода. Характеристики облачности оказывают внушительное влияние на формирование и дальнейшее изменение климата. Немаловажное значение оказываются облаками на радиационный и тепловой режимы атмосферы, что, в свою очередь, сказывается на всех сферах жизни человека. [1, с. 533]

Облако — это видимое объединение взвешенных капель воды либо кристаллов льда, находящееся на определённой высоте над поверхностью Земли. Это явление возникает в атмосфере в связи с конденсацией и сублимацией водяного пара. Конденсация и сублимация водяного пара может происходить при наличии ядер конденсации. Облака образуются под влиянием какого-то из двух факторов: понижение температуры воздуха или увеличение общего влагосодержания. В реальных условиях имеют значение оба фактора. В свободной атмосфере, вне так называемого приземного слоя, главным процессом, приводящим к снижению температуры и облакообразованию, является адиабатический подъём воздуха. Снижение температуры происходит под влиянием излучения турбулентной диффузии, как вертикальной, так и горизонтальной. [1, с. 533]

Кучевообразные (конвективные) облака — это изолированные облачные массы. Эти облака очень сильно развиты по вертикали и имеют, чаще всего, небольшую горизонтальную протяжённость, в отличие, например, от слоистообразных. Они подразделяются на кучевые и кучево-

дождевые. По большей части эти облака наблюдаются в зонах пониженного давления. Между ними заметны значительные просветы голубого неба. [1, с. 534]

Основными процессами, приводящими к образованию кучевообразных облаков, являются термическая конвекция и турбулентный обмен. Конвекция возникает в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой, в нижних слоях, стратификации. Наиболее благоприятные условия для возникновения конвективных движений создаются над сушей в тёплое время года. В преимущественно неустойчивых холодных воздушных массах облакообразование связывается с сильно развитой конвекцией при неустойчивой стратификации. Облака конвекции возникают из-за адиабатического охлаждения. На рисунке 1 представлена схема конвективного облакообразования. Вокруг облака заметны слабые нисходящие потоки. Это  $C_u$ , которые впоследствии могут стать  $C_b$ . Для этого должно произойти оледенение верхушек облаков. По внешним признакам это можно обнаружить при появлении наковальни и волокнистой структуры. Причиной выпадения ливневых осадков из кучево-дождевых облаков можно считать процесс появления ледяных кристаллов. Именно в этом заключается их отличие от кучевых облаков. Кучевообразные облака образуются в холодных воздушных массах. Они, в свою очередь, двигаются над тёплой поверхностью суши и моря. Летом, над поверхностью суши, они возникают в местных воздушных массах над землёй, которая очень сильно прогрета. В таком случае этот процесс имеет ярко выраженный суточный ход. И наоборот, в холодных воздушных массах суточный ход менее резкий. [2]

Конвективные облака не развиваются в зимний период над поверхностью, покрытой снегом. В холодных воздушных массах развитие

начинается в весенний период, когда весь снег растает. Над водной поверхностью облака образуются в любой период и довольно часто.

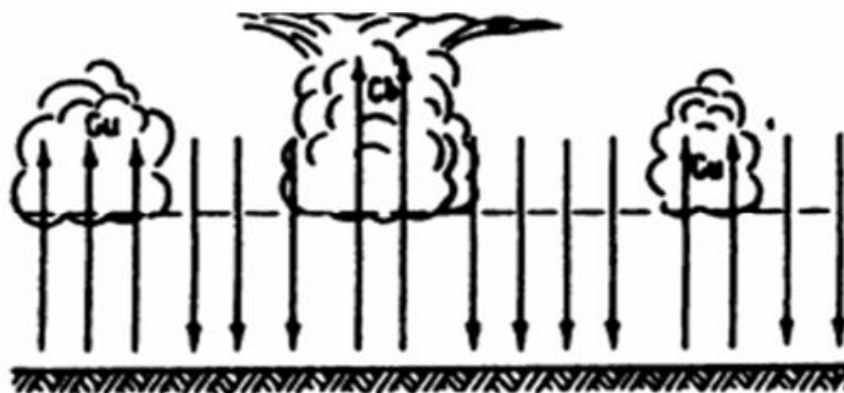


Рисунок 1 – Схема образования конвективных облаков

## 1.2 Классификация кучево-дождевых облаков.

Кучево-дождевые облака (Cumulonimbus, Cb) — это облака вертикального развития: от основания, расположенного обычно довольно низко, они быстро вырастают вверх и до очень большой высоты. Высота нижней границы Cb обычно находится в пределах 0,6–1,2 км, верхняя граница достигает 4–5 км, а иногда — высоты тропопаузы (8–9 км). [3]

Облака Cb — типичные конвективные облака, возникающие при подъёме термиком выше уровня конденсации. В тёплое время года кучево-дождевые облака очень мощные, в холодное — более плоские. Их можно наблюдать в виде отдельных облаков, а иногда они могут представлять собой целые скопления облаков и даже облачные валы. Солнце и Луна сквозь них не проглядывают никогда. В большинстве случаев осадки имеют ливневый характер: дожди и снегопады (ливневые дожди, дождь, мокрый снег, крупа и даже град). Также с ними тесно связаны грозовые процессы. Иногда, в дождливую погоду, можно увидеть радуго. Такие облака очень яркие в своих проявлениях.

Облака Cb имеют два вида:

*Cumulonimbus calvus* (Cb calv.) — «лысые».

*Cumulonimbus capillatus* (Cb cap.) — «волосатые».

«Лысыми» назвали облака, у которых нет перистовидной верхней части, и они напоминают округлые белоснежные купола лишь слегка волокнистого строения. Также Cb calvus имеют разновидность *Cumulonimbus calvus arcus* (Cb calv. arc.) — лысые с грозовым валом.

«Волосатыми» облака названы за хорошо выраженное перистовидное строение верхней части. В надвигающемся облаке перистовидные волокна часто напоминают «веер» или «волосы», а при взгляде сбоку они могут иметь вид «наковальни». В таких случаях зарождающиеся перистовидные облака постепенно распространяются по горизонтали.

Cb capillatus имеют три разновидности:

а) *Cumulonimbus capillatus arcus* (Cb cap. arc.) – "волосатые с грозовым валом". Признаки у этой разновидности такие же, как и у Cb calv. arc. Отличие их состоит лишь в выраженном волокнистом строении верхушки у Cb cap. arc.;

б) *Cumulonimbus incus* (Cb inc.) – с наковальней. Именно эта разновидность отмечается, когда верхняя перистовидная часть облака разливается над ним в стороны и принимает форму огромной наковальни;

в) *Cumulonimbus humilis* (Cb hum.) – плоские. Плоскими считаются облака, которые сравнительно мало развиты по вертикали, хотя имеют все характерные признаки кучево-дождевого облака (выпадение ливневых осадков, волокнистое строение верхней части или перистовидная форма вершины, тёмное основание облака). Cb hum. характерны для холодного времени года.



Считается, что определить Сб довольно просто, но неопытный наблюдатель может спутать их с кучевыми мощными или со слоисто-дождевыми. Но необходимо помнить о том, что Сб дают ливневые осадки (Ns – обложные, а Cu cong. осадков в умеренных и высоких широтах не дают). Также важно учитывать, что Сб образуются не только в результате развития Cu cong. по вертикали, но иногда и в слое Ns (в случае холодных фронтов). Кроме того, летом нередко с ярусной слоистообразной облачностью в зоне тёплого фронта формируются и Сб. Тогда Сб замаскированы другими формами облачности, поэтому самолёт может попасть в опасную зону.

В том случае, если надфронтальный тёплый воздух влажнонеустойчив, в облачную систему тёплого фронта конвективные облака могут вкрапливаться не только летом. В летнее время конвекция может стать настолько мощной, что на тёплом фронте образуются грозовые Сб, которые могут подниматься до тропопаузы или даже выше. Собственно, поэтому, с тёплым фронтом могут быть связаны грозы. Конечно же, грозы могут проявляться и при прохождении холодных фронтов в тёплый период.

По мнению некоторых учёных, используемая классификация является упрощённой для кучевых-дождевых облаков. На основе данных о структуре радиоэха, в ней рассмотрена возможность создания классификации для Сб. В итоге были выделены одноячейковые, мульти- и суперячейковые Сб, причём за ячейку принят элемент облака, с которым связан локальный максимум радиоотражаемости. Эта классификация принята Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО).

В ячейке объединяются восходящие и нисходящие потоки, расположенные рядом друг с другом и характерные для развитых по вертикали облаков – Cu cong. и особенно Сб. Каждая ячейка в течение жизни облака проходит три стадии развития, поэтому соседние ячейки

отличаются по возрасту. Внешний вид одноячейковых, мультячейковых и суперячейковых облаков различается достаточно сильно.

Одноячейковое облако в среднем существует 20–30 минут. Это достаточно редкое явление, поскольку фронт порывистости одного облака может стать спусковым механизмом для образования облака в непосредственной близости. В большинстве случаев такие облака не приводят к возникновению опасных явлений погоды. Потому что восходящий и нисходящий потоки, которые образуются в таких облаках, недостаточно сильны для этого. Тем не менее, иногда они могут спровоцировать сильный дождь или град, грозу, шквал и даже слабый смерч. Неустойчивость атмосферы при образовании таких облаков не очень большая, и для конвекции не свойственна чёткая организация. Одноячейковые облака обычно образуются в случайных местах и в случайное время, поэтому они очень трудно прогнозируемые. На рисунке 2 представлена схема стадий жизни одноячейкового облака. С возникновением кучевого облака хорошей погоды (Cu hum.) в одноячейковых облаках начинается гроза.

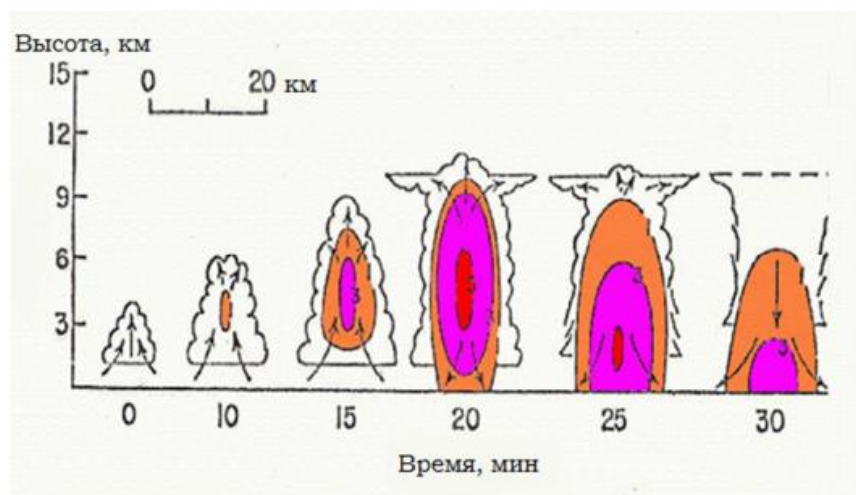


Рисунок 2 – Стадии жизни одноячейкового облака

Мультиячейковое облако является самым часто наблюдаемым типом кучево-дождевых облаков. Эти облака могут производить град достаточно крупного размера, сильные дожди и слабые смерчи, но главной их особенностью остаётся сильнейший нисходящий поток. Мультиячейка состоит из групп одноячейковых облаков. У этого скопления сверху формируется наковальня. На рисунке 3 представлена схема мультиячейкового облака. На этом изображении римской цифрой I отмечена ячейка, находящаяся в стадии распада, ячейка под номером II находится в стадии зрелости, а ячейки III и IV только развиваются. Мультиячейковое облако движется справа налево, стрелки показывают направление воздушных потоков. Время существования таких облаков — несколько часов. Толщина 7–10 км. Вершины ячеек часто достигают тропопаузы и проникают в стратосферу. На снимках с радаров эта система напоминает изогнутый лук. В английском варианте это звучит как «bow echo», то есть «луковое эхо» (имеется в виду форма радиоэхо – это радарное эхо в виде полосы, изогнутой как лук или дуга). Явление это характерно для Североамериканского континента, на Европейских территориях встречается намного реже.

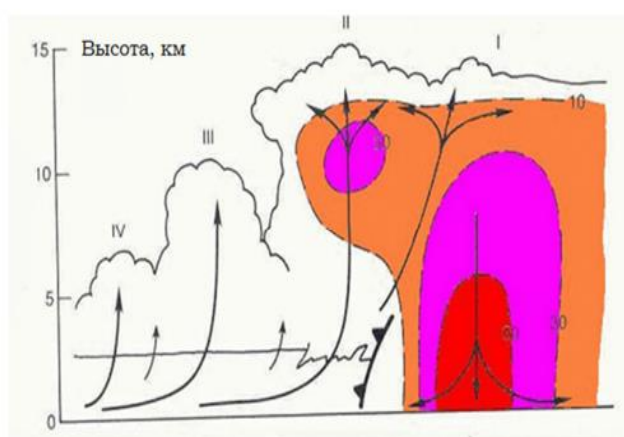


Рисунок 3 – Схема мультиячейкового облака

Суперячейковое облако – это высокоорганизованная структура. Эти облака встречаются довольно редко, но представляют огромную опасность для людей и инфраструктуры. Суперячейковое облако, как и одноячейковое, тоже имеет один главный восходящий поток. Но отличие их в том, что в суперячейковом облаке восходящий поток очень мощный, скорости в нём достигают 240–260 км/ч (60–80 м/с). Наличие вращения – это то, что отличает этот вид облаков от других. Вращающийся восходящий поток (когда он становится заметен на экране радара) способствует возникновению экстремальных погодных условий, таких как: град (диаметром более 5 см), сильные порывы ветра (более 40 м/с) и сильные смерчи. Высота суперячейкового облака составляет 10–15 км. Диаметр около 50 км. Эти облака имеют единую полукруглую наковальню. На рисунке 4 представлена схема строения суперячейкового облака. Под цифрой 1 обозначены линии тока, под цифрой 2 обозначены траектории градин, косыми линиями заштрихована область наиболее интенсивного радиоэха. На графике показаны скорости движения воздуха относительно облака. Всего 30% (или даже меньше) суперячеек способны генерировать торнадо. Поэтому важно уметь отличать облака, генерирующие торнадо, от тех, которые этого сделать не могут. На рисунке 5 показаны воздушные потоки и сопровождающие явления в структуре суперячейкового облака. Видно, что имеется сильное восходящее движение. В передней и тыловой части облака находятся нисходящие потоки. Зона осадков на этом изображении тоже представлена. Сильный дождь и град сменяют слабый дождь по мере продвижения к центру облака. За зоной осадков следует торнадо, скрытое от наблюдателя занавесом из осадков. Этот тип кучево-дождевых облаков способен образовываться в любых регионах Земли, но особенно характерен он для центральных штатов США (Великие равнины). Над европейской территорией России появляется довольно редко.

Суперячейковые облака, в свою очередь, подразделяются на три вида: классическая, суперячейка типа LP и суперячейка типа HP. [4]

Классическая суперячейка считается идеальной суперячейкой, но в природе такие почти не встречаются. Чаще наблюдаются ячейки двух других типов. [4]

Суперячейка LP (англ. «Low Precipitation» – «небольшое количество осадков»). Как следует из названия, этот тип суперячейковых облаков имеет небольшую область со слабыми осадками, отделённую от восходящего потока. Чаще всего такие ячейки быстро разрушаются, не переходя в другие типы. Они образуют слабые торнадо и град. Этот тип слабо отражается на радаре из-за сравнительно небольшого количества осадков. Даже несмотря на то, что в это время обычно наблюдается торнадо. По сравнению с другими типами суперячеек грозовая активность такой ячейки очень низкая. Формируются при CAPE, равному 500–3500 Дж/кг и Li: -2 – (-8). Такие ячейки встречаются преимущественно в весенний и летний период в США. Также они были замечены в Австралии. [4]

Суперячейка HP (англ. «High Precipitation» – «большое количество осадков»). Как следует из названия, этот тип ячеек характеризуется более сильными осадками, которые могут целиком окружать мезоциклон. Считается самым опасным типом ячеек, так как может маскировать за стеной осадков мощный торнадо. Скорость перемещения таких ячеек относительно низкая. Формируются при CAPE, равному 2000–7000 Дж/кг и более, а Li должен быть ниже -6. [4]

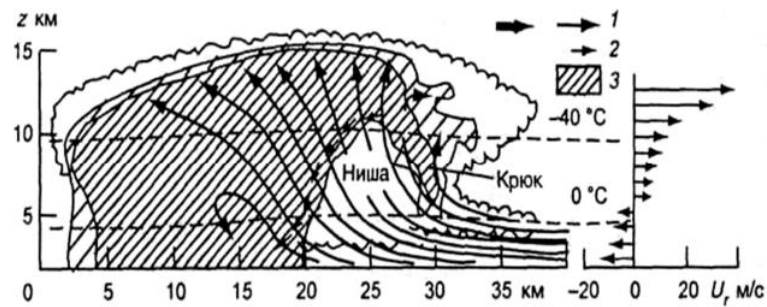


Рисунок 4 – Строение суперячейкового облака

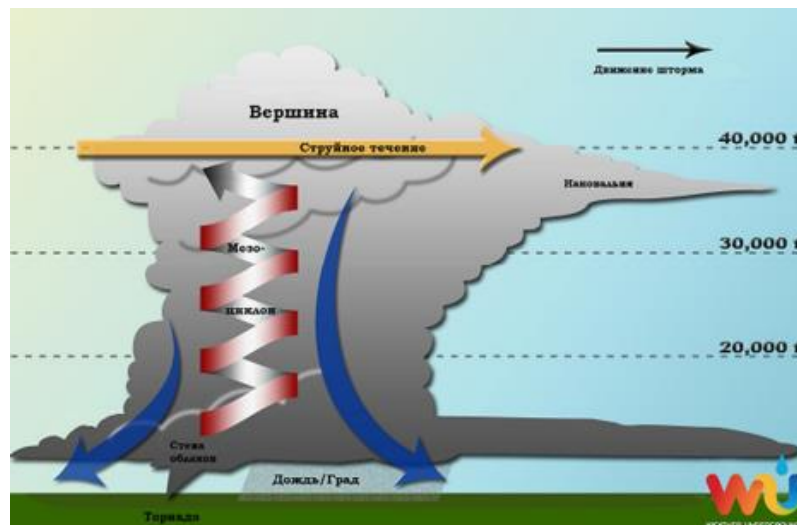


Рисунок 5 – Воздушные потоки и сопровождающие явления в структуре суперячейки

### 1.3 Воздушные потоки в зоне кучево-дождевых облаков.

Если речь идёт о воздушных потоках в зоне кучево-дождевых облаков, то особое внимание следует уделить развитию такого опасного природного явления, как торнадо. Торнадо (смерчи), как правило, образуются из класса гроз, называемых суперячейками. Такие облака всегда обладают достаточной неоднородностью и турбулентностью, поэтому они, по сути, представляют собой генераторы и носители торнадо (их ещё

называют материнскими облаками). О них мы говорили ранее. Перейдём к определению этого феномена.

Торнадо — это атмосферный вихрь, возникающий из кучево-дождевого облака и касающийся земли. Хотя смерчи и принято считать локальными явлениями, стоит помнить, что их образование также тесно связано с интенсивными макромасштабными и мезомасштабными процессами, то есть зонами активной конвекции, которые образуются при большой вертикальной неустойчивости воздушной массы. Эта воздушная масса должна характеризоваться сходимостью тёплых и влажных воздушных потоков в верхней тропосфере и нижней стратосфере. На рисунке 6 представлена схема воздушных потоков в зоне суперячейки. На схеме изображён разрез суперячейкового облака. Стрелками показаны направления движения воздуха. Перемещается облако справа налево. Восходящие движения воздуха наблюдаются в его передней части, а нисходящие — в тыловой. Образование суперячейки в условиях значительного искривления годографа в слое 0–2 км способствует развитию смерча.

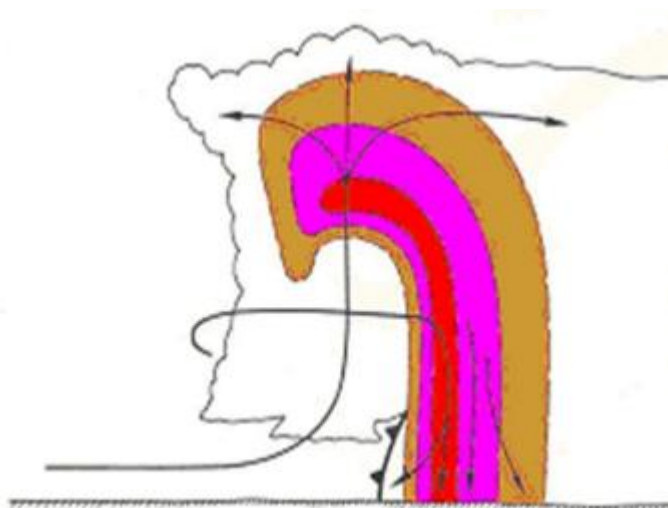


Рисунок 6 – Воздушные потоки в зоне суперячейковых облаков

Вращение в смерчах соответствует циклоническому вращению, то есть в южном полушарии вращение воздуха происходит по часовой стрелке, а в северном — против. Возможны случаи обратного вращения, но это является исключением из правила. Чаще всего, смерчи образуются перед холодным фронтом и движутся практически в том же направлении со скоростью 60 км/ч. На участках, которые расположены по соседству с этим торнадо, происходит опускание воздуха. Именно это и приводит к замыканию вихря. Расположение оси вращения торнадо — вертикальное или с небольшим наклоном к земле. Высота составляет несколько сотен метров. В особо редких случаях может достигать нескольких километров. Время существования — от нескольких минут до часа и более. Большая часть торнадо образуется в виде узкой воронки, вместе с небольшим пыльным облаком и обломками вблизи земной поверхности.

Торнадо подразделяется на три составные части: горизонтальный вихрь в суперячейке, воронка и дополнительные вихри. На рисунке 7 представлена схема торнадо. На этом изображении можно наблюдать воронку, опускающуюся из материнского облака. Также можно увидеть оболочку, окружающую воронку и направления движения воздушных потоков, показанных стрелками.





Рисунок 7 – Схематическое изображение смерча

Рассмотрим жизненный цикл смерч, представленный тремя фазами.

1. Фаза подготовки. Мезоциклон, диаметром 10–20 метров, образуется в суперячейковом облаке. Он может образовать торнадо, но происходит это не всегда. Мезоциклон, способный образовать торнадо, называется торнадо-циклон.
2. Фаза формирования смерча. Скорости вращения в ядре, образовавшемся внутри этого мезоциклона, становятся максимальными. Увеличиваются вращение воздуха и вертикальные скорости. После, из материнского облака опускается воронка, воздух затягивается внутрь торнадо и поднимается по спирали. Из-за сильного перепада давления между ядром смерча и окружающей средой, воздух с приземного слоя поднимается внутрь торнадо, а потом затягивается по спирали. Вследствие этого с подстилающей поверхности поднимается ещё одна воронка, которая состоит из мелких кусков гранита (над территорией суши) и капель воды (над водной поверхностью). Постепенно эти воронки приближаются друг другу и соединяются. Так и образуется торнадо. На рисунке 8 вторая фаза

представлена в первых двух секциях. В первой секции можно увидеть пока что слабую воронку, а во второй — уже мощный смерч.

3. Фаза разрушения смерча. Вследствие сильного трения у основания смерча скорости втекания достаточно ограничены, это и приводит к поэтапному заполнению текущей области низкого давления. При сильном уменьшении объёмов холодного или тёплого влажного воздуха мощность торнадо ослабевает, воронка становится уже и отрывается от земли, медленно поднимаясь в материнское облако. [5]

Торнадо свойственен широкий диапазон цветов. Цвет смерчей зависит от условий образования атмосферного вихря. Образованные при небольшом количестве влаги торнадо могут быть почти невидимы человеческому глазу и определить их можно только по попавшим в них предметам с земли. Окраска водяного смерча, ввиду перемещения воды по воронке, может варьироваться от белого до ярко-синего цвета. Торнадо, поднимающему пыль и другие частицы, характерен серый цвет. От скорости вращения также может зависеть цвет смерча. Для медленных смерчей, поглощающих большое количество мусора, характерна более тёмная окраска. И наоборот, для смерча с высокой скоростью, характерна более светлая окраска. Место возникновения тоже влияет на цвет торнадо. Смерчи, образовавшиеся в горах, набирают в себя снег и становятся белыми.

Смерчи подразделяются на несколько видов.

1. Бичеподобные — один из самых распространённых видов смерчей. Воронка выглядит тонкой и извилистой. Длина которой значительно превосходит её радиус. Слабые торнадо, как правило, являются бичеподобными.

2. Составные — как следует из названия, могут состоять из нескольких отдельных воронок вокруг главного центрального вихря.
3. Расплывчатые — вращающиеся, лохматые облака, опустившиеся на землю. Бывает, что диаметр превосходит высоту такого торнадо. Расплывчатые торнадо характеризуют воронки огромного диаметра (от 0,5 км и больше). Могут также являться составными. Наносят значительный ущерб из-за своих размеров и высоких скоростей ветра.
4. Водные — это торнадо, которые образуются над водной поверхностью. Они втягивают в себя воду, образуя водовороты, тянущиеся к материнскому облаку. Способны быть бичеподобными, а вот расплывчатыми — нет.
5. Огненные — обыкновенные смерчи, порождаемые облаками, образующиеся в результате пожара или извержения вулкана. Они поглощают пламя, вытягивающееся к материнскому облаку, образуя огненный смерч. Данный тип особо опасен, так как может распространять пожар на десятки и сотни километров. Не могут быть расплывчатыми, как и водяные вследствие того, что огонь не находится под давлением.
6. Земляные — один из самых редких видов торнадо. Разрушительные катаклизмы являются причиной появления этого природного феномена. В этом случае торнадо могут поднимать камни, что делает их очень опасными и разрушительными.
7. Снежные — могут образоваться при метели.

Ливневой дождь, град и грозы практически всегда сопровождают торнадо, из-за которых уменьшается его видимость. Смерч может полностью скрываться за стеной из пыли или дождя. Это очень сильно усложняет определение наличия воронки. Очень опасные торнадо, возникающие в такие условия, так как могут быть замечены только при помощи метеорологических радиолокаторов. Большая часть смерчей

образуется в дневное время суток в конце, в то время, когда солнце проникает сквозь облака, что в свою очередь помогает обнаружить и исследовать это явление. В ночное время они освещаются исключительно частыми вспышками молнии. Это и прибавляет опасность ночным смерчам.

В первой главе нами были рассмотрены термодинамические условия возникновения и дальнейшего развития кучево-дождевых облаков. Также, была изучена классификация кучевообразных облаков, и особое внимание уделялось такому опасному природному явлению, как торнадо.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ТОРНАДООПАСНЫХ ОБЛАКОВ

### 2.1. Классификация торнадо.

Ежегодно, случаи торнадо по всему миру причиняют огромный вред инфраструктуре и уносят множество человеческих жизней. Для человечества важнейшей задачей остаётся своевременное прогнозирование смерчей. Но в силу того, что это явление представляется локальным и для его формирования требуется целый ряд условий, это становится довольно трудно. Но к счастью, наука не стоит на месте и благодаря усилиям многих исследователей в этой области, появляются всё новые и новые методы прогнозирования такого опасного природного явления. Для исследования этого природного феномена были разработаны системы классификации мощности торнадо, например, такие как: шкала Фудзиты, улучшенная шкала Фудзиты, шкала Бофорта и шкала TORRO. Прогнозирование стало возможно при помощи индексов, которые мы рассмотрели в рамках этой работы.

Говоря о смерчах, нельзя не упомянуть имя японо-американского метеоролога, Теодора Фудзиты, объектом исследований которого стали суровые погодные условия, в частности: торнадо, ураганы и тайфуны. Его исследования произвели революцию в знаниях о каждом из них. Но известен он в первую очередь своей шкалой для классификации торнадо. Введённая в 1971 году шкала активно используется и по сей день. На рисунке 8 представлена шкала Фудзиты. В ней торнадо присваивается категория относительно того ущерба, которое оно нанесло. Так, например, торнадо, сорвавшему крыши с домов и повалившему деревья, присваивается категория F1, оно считается умеренным. Впоследствии шкала Фудзиты (F-Scale) была заменена более расширенной шкалой (EF-Scale), которая в данный момент используется на территории США и Канады. Улучшенная шкала Фудзиты представлена в таблице 1.

Торнадо		Диапазон скоростей			Характеристика наносимого ущерба
Категория	Словесная характеристика	м/с	км/ч	миль/ч	
F0	Штормовой	18–32	64–116	40–72	Повреждает дымовые трубы и телевизионные вышки, ломает ветки деревьев, валит старые деревья, сносит вывески, повреждает дорожные знаки, разбивает окна
F1	Умеренный	33–50	117–180	73–112	Срывает крышу с домов, выбивает окна, опрокидывает мобильные дома, разрушает легкие постройки, может разрушать гаражи, валит старые деревья, перемещает автомобили
F2	Значительный	51–70	181–253	113–157	Значительные разрушения: срывает крыши с домов, наносит значительный ущерб стенам зданий, разрушает мобильные дома, разваливает или переносит легкие постройки, вырывает деревья с корнем, сдувает автомобили с дороги
F3	Сильный	71–92	254–332	158–206	Срывает крыши с домов и разрушает полностью или частично стены зданий, опрокидывает поезда, большую часть деревьев вырывает с корнем, поднимает в воздух и бросает тяжелые автомобили, срывает легкое покрытие с дороги
F4	Разрушительный	93–116	333–418	207–260	Частично или полностью разрушает прочные дома, легкие дома поднимает в воздух и переносит на некоторое расстояние, создает и всасывает в себя большое количество мусора и обломков, вырванные деревья переносит на некоторое расстояние, сдувает верхний слой почвы, поднимает в воздух и переносит на значительное расстояние автомобили и тяжелые предметы
F5	Невероятный	117–142	419–512	261–318	Колоссальные разрушения: сносит с фундамента прочные дома и переносит их на большие расстояния, наносит значительный ущерб прочным железобетонным конструкциям, переносит тяжелые автомобили на расстояние 100 м и более, полностью вырывает с корнем все деревья, производит прочие невероятные разрушения
F6–F12	Невообразимый	Свыше 142	Свыше 512	Свыше 318	Ущерб невозможно себе представить. Для оценки разрушений, производимых такими торнадо, необходимы дальнейшие исследования

Рисунок 8 – Шкала Фудзиты

Улучшенная шкала Фудзиты

Таблица 1

EF0	64–116 км/ч	Лёгкие повреждения
EF1	117–180 км/ч	Умеренные повреждения
EF2	181–253 км/ч	Значительные повреждения
EF3	254–332 км/ч	Серьёзные повреждения
EF4	333–418 км/ч	Разрушительный урон
EF5	419–512 км/ч	Невероятный урон

Ещё одной не менее известной шкалой является шкала Бофорта. Принятая Всемирной метеорологической организацией (ВМО), она представляет собой шкалу для оценки скорости ветра в баллах по его воздействию на наземные предметы или по волнению в открытом море.[5]

В 1806 году английский адмирал Фрэнсис Бофорт разработал эту шкалу, но только спустя 68 лет, в 1874 году, она была принята для использования в международной метеорологической практике. [5] На рисунке 9 представлена шкала Бофорта. В ней содержится подробная

классификация ветров по их силе и скорости. Но у этой шкалы есть и свои минусы — она не позволяет определять направление и продолжительность воздушных потоков.

Характеристика ветра	Балл	Скорость ветра	
		м/с	км/ч
Штиль	0	0 – 0,05	0 – 1
Тихое дуновение	1	0,6 – 1,7	2 – 6
Легкий ветер	2	1,8 – 3,3	7 – 12
Слабый ветер	3	3,4 – 5,2	13 – 18
Умеренный ветер	4	5,3 – 7,4	19 – 26
Свежий ветер	5	7,5 – 9,8	27 – 35
Крепкий ветер	6	9,9 – 12,4	36 – 44
Сильный ветер	7	12,5 – 15,2	45 – 54
Очень крепкий ветер	8	15,3 – 18,2	55 – 65
Шторм	9	18,3 – 21,5	66 – 77
Сильный шторм	10	21,6 – 25,1	78 – 90
Жесткий шторм	11	25,2 – 29,0	91 – 104
Ураган	12	> 29	> 104

Рисунок 9 – Шкала Бофорта

В Европе с 1975 года применяется своя шкала оценки интенсивности торнадо. Шкала TORRO (T-Scale) считается более расширенной версией шкалы Бофорта. Отличие этой шкалы от других состоит в том, что категории присваиваются, опираясь на значения ветра, а не на масштабы разрушений. На рисунке 10 представлена шкала TORRO.

Категория	Скорость ветра			
	м/с	км/ч	миль/ч	
Слабые	T0	17-24	61-86	39-54
	T1	25-32	87-115	55-72
	T2	33-41	116-147	73-92
	T3	42-51	148-184	93-114
Сильные	T4	52-61	185-220	115-136
	T5	62-72	221-259	137-160
	T6	73-83	260-299	161-186
	T7	84-95	300-342	187-212
Разрушительные	T8	96-107	343-385	213-240
	T9	108-120	386-432	241-269
	T10	121-134	433-482	270-299
	T11	≥ 135	≥ 483	≥ 300

Рисунок 10 – Шкала TORRO

Возможно также обозначение силы торнадо одновременно по шкале Фудзиты и шкале TORRO (например F4/T9).

## 2.2 Прогностические индексы.

В рамках этой работы мы рассмотрим пять индексов для прогноза торнадо.

1. Индекс CAPE (Convective Available Potential Energy – Конвективная доступная потенциальная энергия). Является показателем неустойчивости атмосферы, численно равным количеству массы воздуха, вертикально перемещающейся от уровня свободной конвекции до уровня нейтральной плавучести. Энергия плавучести, которая достигается для ускорения воздушной частицы по вертикали. Или работа, совершаемая частицей во время подъёма. Применяется при оценке опасных погодных явлений, связанных с конвекцией. Является суммарной энергией неустойчивости атмосферы от нижней до верхней границы облака. [7] В таблице 2 приведены погодные условия, соответствующие определённым значениям индексов. Индекс CAPE можно рассчитать по формуле (1):

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \left( \frac{T_{v,p} - T_{v,e}}{T_{v,e}} \right) dz \quad (1)$$

где:

$g$  - ускорение свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );

$EL$  – уровень нейтральной плавучести;

$LFC$  – уровень свободной конвекции;

$T_{v,p}$  – виртуальная температура частицы;

$T_{v,e}$  – виртуальная температура окружающей массы воздуха.



Значение, Дж/кг	Состояние атмосферы и погодные явления
CAPE<0	Состояние устойчиво, грозы невозможны
0<CAPE<1000	Неустойчивость слабая, могут быть грозы
1000<CAPE<2500	Неустойчивость умеренная, сильные грозы и ливни
2500<CAPE<3500	Неустойчивость сильная, очень сильные грозы и ливни
CAPE>3500	Взрывная конвекция, приводящая к образованию суперячеек и смерчей

2. Индекс Li (Lifted Index). В отличие от индекса CAPE, является показателем устойчивости атмосферы. Описывается разностью температуры окружающего воздуха и температуры частицы, поднятой адиабатически до определённого уровня по вертикали. [8] В таблице 3 представлена интерпретация значений индекса. Расчёт производится по формуле (2):

$$Li = T_{500\text{окр. ср.}} - T_{500} \quad (2)$$

где:

$T_{500\text{окр. ср.}}$  – температура воздушного слоя на уровне 500гПа,

$T_{500}$  – значение температуры воздуха, конвективно поднятой до 500гПа и вторгшейся в этот слой.

Интерпретация значений индекса Li

Таблица 3

Значения индекса Li	Интерпретация
$\geq 6$	Конвекция невозможна, потому что атмосфера устойчива
0	Конвекция возможна, потому что атмосфера слабонеустойчива
$\leq -6$	Возможна сильная конвекция и сопутствующее ей появление опасных природных явлений, потому что атмосфера крайне неустойчива

3. Индекс SWEAT (Severe Weather Threat Index) — индекс, оценивающий возможность развития сильной конвекции и появления сопровождающих её опасных конвективных явлений. [8] В таблице 4 представлена интерпретация значений индекса SWEAT. Определяется по формуле (3):

$$SWEAT = 20(TT - 49) + 12T_{d850} + 2V_{850} + V_{500} + 125(\sin\Delta V + 0,2) \quad (3)$$

где:

$V$  – скорость ветра (в узлах),

$\Delta V$  – направления ветра на уровне 500гПа и 850гПа.

Интерпретация значений индекса SWEAT

Таблица 4

Значения индекса SWEAT	Интерпретация
150–300	Возможна конвекция и неблагоприятные погодные явления возникнут
300–400	Возможно возникнут опасные конвективные явления
>400	Возможно образование торнадо

4. Индекс  $K_i$  (K-Index) является оценкой возможности возникновения конвекции и гроз. Вероятность грозы зависит от того, насколько высоко значение этого индекса. Индекс  $K_i$  лучше всего использовать летом для прогноза гроз. [8] В таблице 5 представлена интерпретация значений индекса. Расчёт можно произвести по формуле (4):

$$K = (T850 - T500) + Td850 - (T700 - Td700) \quad (4)$$

где:

T850 – температура воздуха на уровне 850гПа,  
 T500 – температура воздуха на уровне 500гПа,  
 T700 – температура воздуха на уровне 700гПа,  
 Td850 – температура точки росы на уровне 850гПа,  
 Td700 – температура точки росы на уровне 700гПа.

Интерпретация значений индекса Ki

Таблица 5

Значения индекса Ki	Интерпретация
<20	Вероятность грозы близка к нулю
20–30	Вероятность образования отдельных очагов гроз
>35	Высокая вероятность образования массовых очагов гроз

5. Индекс TT (Total Totals Index — Итоговый индекс).

Включает в себя два показателя: индекс VT (Vertical Totals) и индекс CT (Cross Totals). Интерпретация значений прогностического индекса представлена в таблице 6. Рассчитывается по формуле (5):

$$TT = VT + CT = T850 + Td850 - 2 \times T500 \quad (5)$$

где:

VT – индекс Vertical Totals,

CT – индекс Cross Totals,

T850 – температура воздуха на уровне 850гПа,

T500 – температура воздуха на уровне 500гПа,

Td850 – температура точки росы на уровне 850гПа.

Интерпретация значений индекса ТТ

Таблица 6

Значения ТТ	Интерпретация
<45	Развитие конвекции маловероятно, так как атмосфера устойчива
45–50	Возможно развитие очагов гроз
50–55	Возможно развитие опасных конвективных явлений
55–60	Высокая возможность развития опасных конвективных явлений

## ГЛАВА 3. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОРНАДООПАСНЫХ РЕГИОНОВ

### 3.1. Мур, штат Оклахома, США.

Для Оклахомы характерен преимущественно равнинный тип рельефа, который может варьироваться от практически плоской территории на западе до холмистой на востоке и на её центральной части. Замечен общий уклон с запада на восток. Горные местности пересекают равнины: на юго-западе это горный хребет Уичито, а на юге центральной части штата — горы Арбакл. Оклахома находится на стыке трёх воздушных масс: тёплого влажного воздуха с Мексиканского залива, горячего сухого воздуха с территории Мексики и сухого холодного воздуха из Канады. В осенне-зимний период случаются частые изменения воздушных масс, которые, в свою очередь, вызывают колебания температуры и влажности. Подавляющая территория штата зачастую подвержена экстремально высоким или, наоборот, экстремально низким температурам, сильным ветрам, продолжительной засухе и обильным осадкам. Через большую часть штата протекает зона, называемая Аллеей торнадо, характеризующаяся воздействием тёплых и холодных воздушных масс, что способствует образованию суровых погодных условий. Месяцы самого высокого риска возникновения такого опасного природного явления, как торнадо, — с апреля по июнь. По статистическим данным, в среднем, на штат обрушивается до 60 торнадо в год. Этот показатель является одним из самых высоких по всему Земному шару. На рисунке 11 показано местоположение штата Оклахома на карте США. Аллея торнадо представлена на рисунке 12. На рисунке 13 показана средняя продолжительность торнадо в минутах.

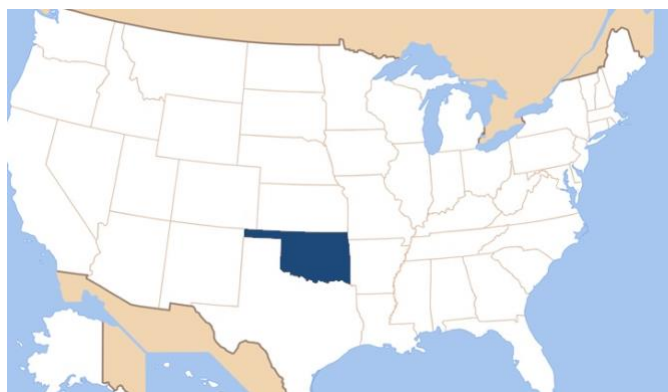


Рисунок 11 – Штат Оклахома на карте США

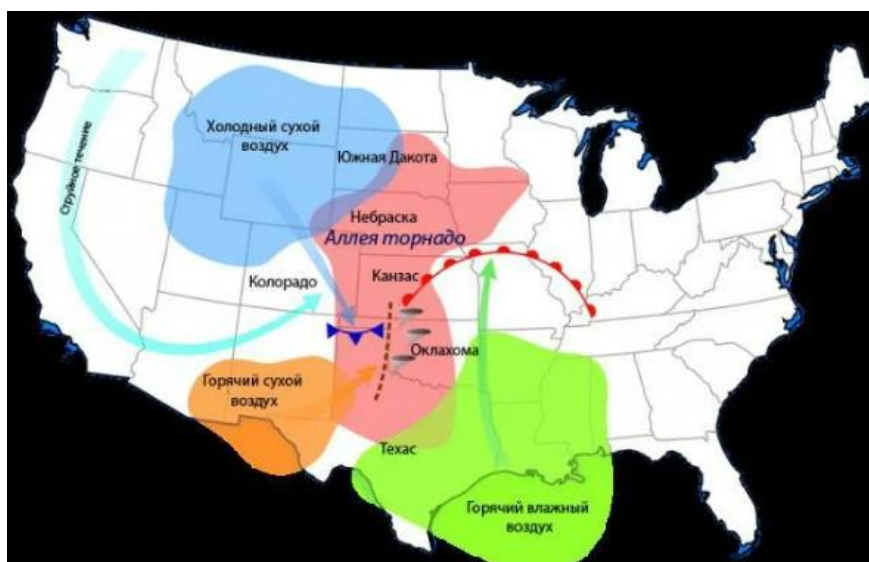


Рисунок 12 – Пересечение воздушных масс на «Аллее торнадо»



Рисунок 13 – Средняя продолжительность торнадо в минутах

### 3.2. Гринсбург, штат Канзас, США.

Штат Канзас принадлежит Среднему Западу США. Располагается он в самом сердце, так называемом, географическом центре, континентальной территории Соединённых Штатов Америки. Канзас находится на одинаковом удалении от обоих океанов: Тихого и Атлантического. Преобладающая часть территории штата охвачена предгорным плато Великие Равнины.

Для восточной части штата характерен влажный континентальный тип климата, отличающийся жарким летом с обильными осадками и холодной зимой. Здесь находится холмистая местность. На западных территория преимущественно характерен полусухой тип климата, а южные и юго-восточные территории определяются субтропической зоной с изменчивой погодой и очень тёплыми зимами.

Канзас пролегает в районе Аллеи торнадо. По количеству торнадо в год штат занимает второе место. На первом — Техас. На рисунке 14 показано расположение штата Канзас на карте США. На рисунке 15 показано расположение Канзаса на Аллее торнадо.



Рисунок 14 – Штат Канзас на карте США



Рисунок 15 – Канзас находится на Алее торнадо

### 3.3. Туапсе, Краснодарский край, Россия.

Физико-географическое положение района весьма особенно и уникально. С северо-востока на юго-запад протягивается Главный Кавказский хребет. Его основной гребень отодвинут от моря примерно на 20 километров. Рельеф состоит из горной и пологой местности. Гористая местность этого района богата долинами, ущельями и оврагами. Здесь практически не наблюдаются сухие степные ветры. Преимущественно горы состоят из осадочных пород, но на северо-востоке присутствуют и вулканические породы.

Климат Туапсе сильно похож на средиземноморский климат. Характеризуется жарким сухим летом и мягкой дождливой зимой. Граница между весной и летом не сильно ощутима. Наиболее холодный месяц — февраль. Средняя температура февраля — 5°C. Самый тёплый месяц — август (средняя температура — 23,5°C). Важнейшее влияние на климат оказывается морем. В летний период оно прогревается достаточно медленно и регулирует температуру воздуха до комфортных значений. В зимний период море также медленно охлаждается, при этом отдавая тепло



районам у его берега. Особенностью климата этого региона можно считать неравномерное распределение осадков. Инверсии также не редки для этого региона. На рисунке 16 можно наблюдать расположение города Туапсе на карте Краснодарского края.



Рисунок 16 – Расположение города Туапсе на карте Краснодарского края

### 3.4. Филадельфия, штат Миссисипи, США.

С юга штат Миссисипи омывается водами Мексиканского залива. Подавляющее большинство территорий штаты занимает холмистая местность. Климат субтропический. Зима тёплая, практически без осадков, температуры почти всегда положительные, а вот лето жаркое и влажное. Среднегодовое количество осадков — 1300 миллиметров. Торнадо не считается редким погодным явлением для этого региона. Даже несмотря на то, что штат Миссисипи не находится на Аллее торнадо. Наибольшие разрушения приходятся на территорию его южных провинций. На рисунке 17 представлено расположение штата Миссисипи на карте США.



Рисунок 17 – Расположение штата Миссисипи на карте США

### 3.5. Цукуба, префектура Ибараки, Япония.

Цукуба — японский город, находящийся в префектуре Ибараки, на её южных территориях. Климат здесь преобладает влажно-континентальный, который обуславливается тёплым летом и прохладной зимой, преимущественно с небольшими осадками. Средняя годовая температура составляет 13,5 °С. Самая высокая температура наблюдается в августе (25,8°С). Самая низкая в январе — 2,6°С. Среднее годовое количество осадков — 1280 мм. Самым влажным месяцем является сентябрь. Префектура Ибараки находится на северо-восточной части региона Канто. На севере территорию этой префектуры занимают горы, но большую часть префектуры занимают равнины с множеством озёр. Регион Канто является географическим районом самого большого острова Японии — Хонсю. Чуть больше 45 процентов территории суши занято равниной. Остальная же её часть характеризуется холмистой и гористой местностью. На рисунке 18 показано расположение города Цукуба относительно столицы Японии.



Рисунок 18 — Расположение города Цукуба на карте Японии

### 3.6. Бржецлав и Годонин, Южноморавский край, Чешская Республика.

Чехия расположена в самом центре Европы. Восточная часть, называемая Моравией или Великой Моравией, где и находятся рассматриваемые нами области, отличается преобладанием холмистой местности и относительно высоких гор, таких как, например, Карпаты. Равнина здесь занимает всего около 20% от всей территории Чехии, располагается в долинах рек Лаба и Морава. Для Чешской Республики характерны благоприятные, очень мягкие условия умеренного климата с преобладанием континентального и морского типов. Зима пасмурная и влажная. Средняя температура января —  $-2^{\circ}\text{C}$ . Иногда с полным отсутствием снега. Летом выпадает более 40% всех годовых осадков, 500 миллиметров на равнинах и 1500 миллиметров — в горах. Средняя температура июля —  $+18^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 19 на карте Чешской Республики зелёным цветом выделена Моравия.



Рисунок 19 – Расположение Моравии на карте Чехии

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ТОРНАДО

### 4.1. Примеры случаев торнадо в различных регионах.

#### 4.1.1. Гринсбург, Канзас, США, 4 мая 2007 года.

Многочисленные смерчи были вызваны сочетанием тёплого влажного воздуха с Мексиканского залива и сухого воздуха с пустынь юго-запада. Эта вспышка торнадо также может быть связана с мощной областью низкого давления с тёплым фронтом на севере над штатами Небраска и Миссури. 4 мая низкая температура установилась над Высокогорными равнинами, и влага, поступающая с Мексиканского залива, переместилась вслед за тёплым фронтом и усилила неустойчивость атмосферы на большей части региона, при этом значения индекса CAPE в некоторых регионах достигали 5500 Дж/кг. На рисунке 20 представлены значения индекса CAPE. Сильный сдвиг ветра также способствовал вращению в атмосфере. Присутствовали все составляющие для образования суперячеек, вызывающих грозу, сильный ветер, ливневый дождь, крупный град и торнадо. Температура достигала 30°C. Наиболее интенсивно суперячейки начали развиваться во второй половине дня, ближе к вечеру, на северо-востоке Оклахомы и юго-западе Канзаса. В конечном счёте они вызвали 25 торнадо, включая самое разрушительное торнадо с самой высокой категорией в Гринсбурге. Суперячейки оставались нетронутыми в течение всей ночи, поскольку чрезвычайно неустойчивая воздушная масса препятствовала их быстрому разрушению, ожидаемому при понижении температуры воздуха. На рисунке 21 представлены доплеровские данные скорости ветра на метеорологическом радаре, незадолго до того, как торнадо обрушился на Гринсбург. На них можно наблюдать второй мезоциклон, который позже перерос в ещё один крупный торнадо. На рисунке 22 показано зона риска развития торнадо.

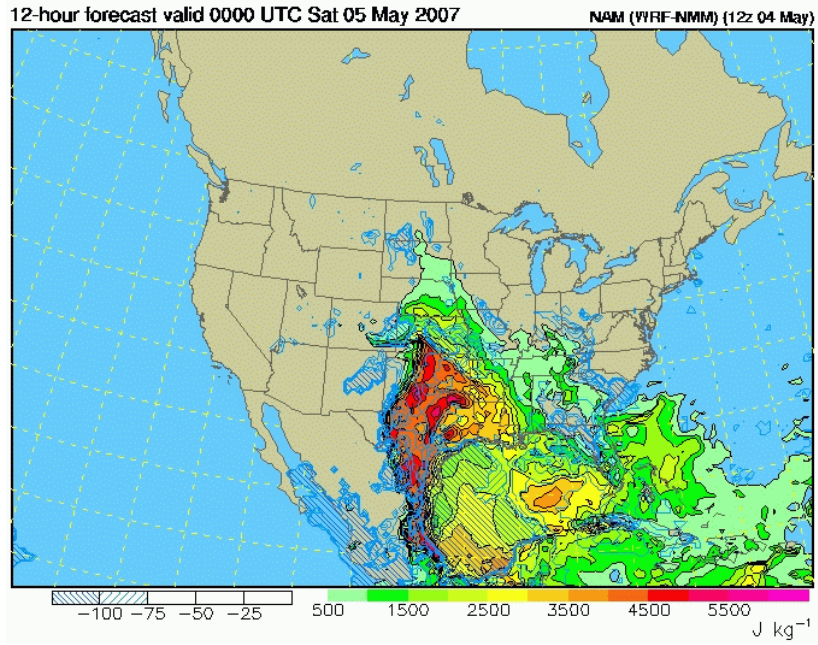


Рисунок 20 – Индекс CAPE за 4 мая 2007 года

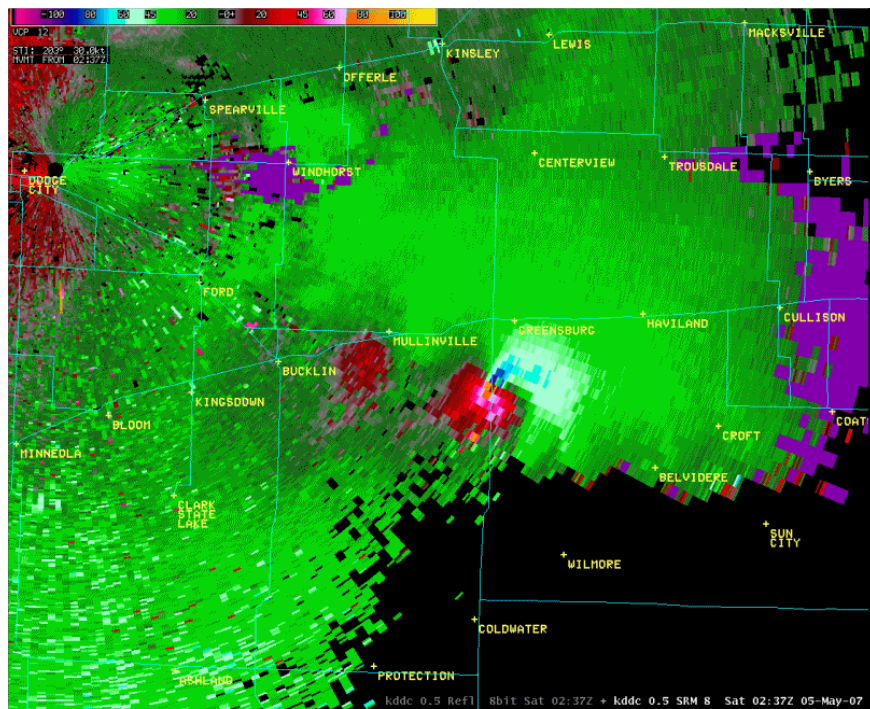


Рисунок 21 – Доплеровские данные о скорости ветра

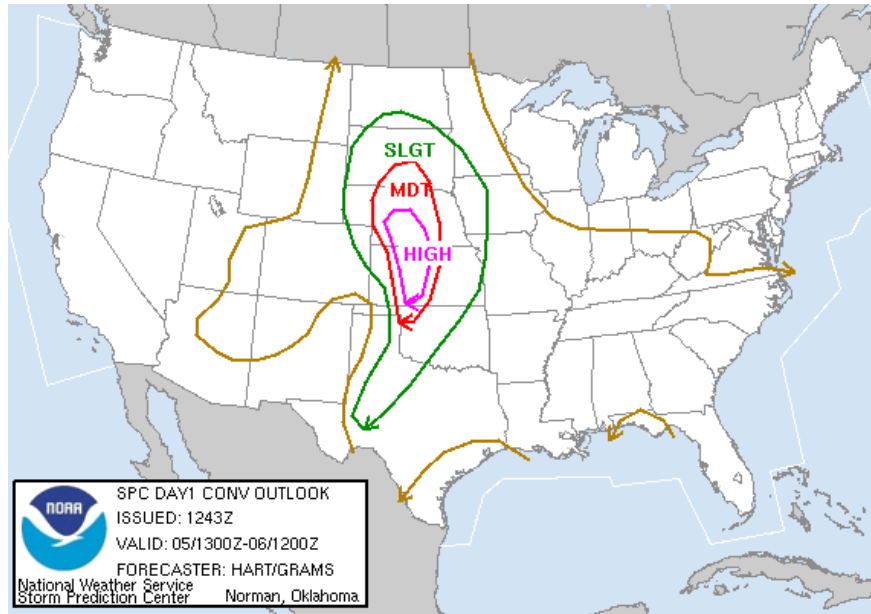


Рисунок 22 – Зона высокого риска, прогноз на первый день

Торнадо с множеством вихрей стал усиливаться по мере приближения к Гринсбургу. Вечером 4 мая местные охотники за торнадо сообщили, что он увеличился до 800 метров в диаметре. Очевидцы сообщили, что на ранних этапах по периметру большого клиновидного торнадо циркулировало множество мелких вихрей. Когда торнадо пересёк шоссе на юге города, его диаметр достигал уже 2,7 километра. Общая протяжённость пути этого торнадо составила 35 километров. Смерч разрушил 95 процентов города, сравнял с землёй 961 дом. 216 человек получили серьёзные ранения и 307 отделались лёгкими травмами. Это первое торнадо в истории, которому была присвоена категория EF5 по только что принятой в метеорологическую практику на территории США и Канады, расширенной шкале Фудзиты.

4.1.2. Мур, штат Оклахома, США, 20 мая 2013 года.

Торнадо, которое случилось 20 мая 2013 года в городе Мур штата Оклахома, была присвоена категория EF5 по улучшенной шкале Фудзиты.

Внутри воронки смерча скорости достигали значений до 320 км/ч, а диаметр — до 2 километров. [10] Полоса разрушений, оставленная за собой этим торнадо, составила 27 километров. 24 человека погибли и около 250 получили травмы разной степени тяжести. На текущий момент это было последнее торнадо, которому была присвоена категория EF5. Ущерб оценивается в 3 миллиарда долларов. На рисунке 23 представлен снимок вида с воздуха на кучево-дождевые облака над штатом Оклахома за несколько часов до случая торнадо.



Рисунок 23 – Вид с воздуха на кучево-дождевые облака над Оклахомой

4.1.3. Туапсе, Краснодарский край, Россия, 30 июня 2018 года.

Торнадо небольшой силы (EF0 по улучшенной шкале Фудзиты) наблюдалось 30 июня 2018 года на территории города Севастополь. Это опасное явление сопровождалось ливневым дождём и градом крупного размера. Температура воздуха составляла 27°C. Также на ближайшие несколько дней были спрогнозированы грозы. Но за неимением аэрологической станции в данном пункте, мы обратились к данным



радиозондирования ближайшей аэрологической станции, находящейся в городе Туапсе, Краснодарского края. Расстояние между этими пунктами составляет примерно 450 км. Станция в городе Туапсе была выбрана для дальнейшего исследования эффективности работы прогностических индексов неустойчивости атмосферы. Используя значения для случая грозы в городе Туапсе и сравнив их со значениями для случаев торнадо, можно проанализировать эффективность работы прогностических индексов.

Первая половина дня 30 числа характеризовалась сплошной облачностью. Осадки отсутствовали. Температура воздуха достигала 30°C. Ночью с 30 мая на 1 июня наблюдалась гроза.

#### 4.1.4. Филадельфия, штат Миссисипи, США, 27 апреля 2011 года.

Торнадо, выкопавшее траншею глубиной около метра на пастбище, не оставившее после себя ничего, кроме больших комьев грязи и голого верхнего слоя почвы, получило категорию EF5 по улучшенной шкале Фудзиты. Привязанный дом на колёсах был поднят в воздух и откинут на три сотни метров. Многие транспортные средства были брошены на деревья. С дорог было снято дорожное покрытие. На рисунке 24 показана полоса разрушений, оставленная торнадо на востоке Миссисипи.

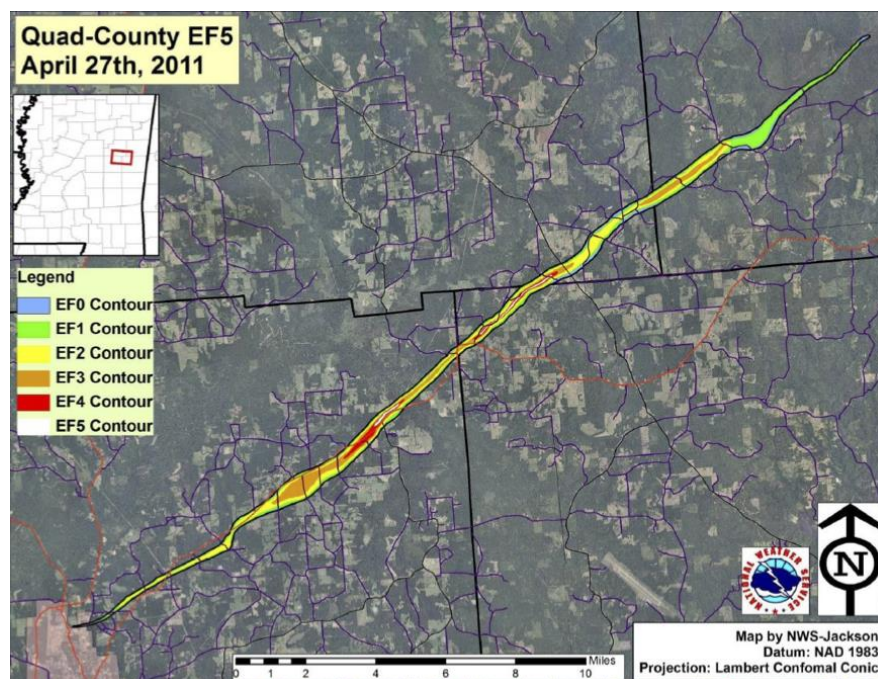


Рисунок 24 – Полоса разрушений от торнадо на востоке Миссисипи

#### 4.1.3. Цукуба, префектура Ибараки, Япония, 6 мая 2012 года.

Город Цукуба находится в 60 км северо-восточнее от столицы Японии, города Токио. Торнадо — достаточно редкое явление для Японии. Японское метеорологическое агентство присвоило этому торнадо рейтинг F3 по шкале Фудзиты, что сделало его самым мощным торнадо, когда-либо поражавшим Японию. Масштаб разрушений в некоторых местах свидетельствовал о категории EF4. В результате этого торнадо погиб один ребёнок школьного возраста, около сотни получили тяжелые ранения, около 500 домов было разрушено.

#### 4.1.5. Бржецлав и Годонин, Южноморавский край, 24 июня 2021 года.

Смерчи большой мощности для Чехии достаточно редкое явление. За всё время до этого было зарегистрировано не более 10 случаев сильных торнадо. 24 июня 2021 года метеорологические условия к северу от восточной части гор Альп были благоприятными для образования суперячеек. Уровень доступной конвективной потенциальной энергии был

высок и также присутствовал сильный сдвиг ветра в атмосфере. Смерч начался примерно в 19 часов 30 минут по местному времени и сопровождался довольно крупным градом, достигающим 10 см в диаметре. По словам местных метеорологов, смерчу присваивалась категория EF4 (по улучшенной шкале Фудзиты). Скорости ветра достигали 330–400 км/ч. Скорости были присвоены по масштабу разрушений в городах Бржецлав и Годонин. Машины разносило по окрестностям на сотни метров и более. Всего сообщалось о 6 погибших и 200 раненых. Смерч повлёк за собой серьёзные разрушения инфраструктуры. На рисунке 25 представлен примерный маршрут торнадо.

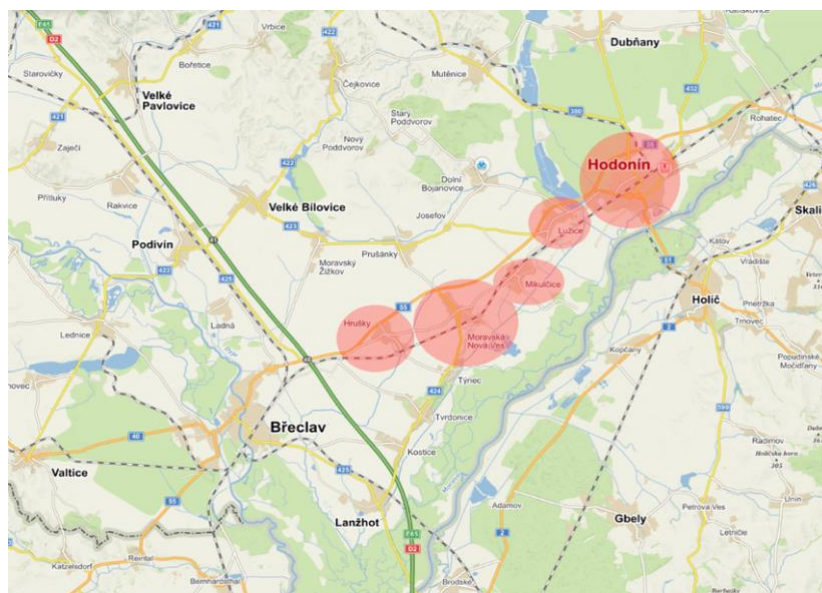


Рисунок 25 – Примерный маршрут передвижения торнадо

#### 4.2. Анализ прогностических индексов.

Нами был проведён анализ прогностических индексов неустойчивости атмосферы по данным архивов радиозондирования. [10] Результаты расчётов представлены в таблице 15.

Индекс CAPE						
Время	Мур	Туапсе	Филадельфия	Гринсбург	Цукуба	Бржецлав Годонин
00	1914,83	1339,52	1540,34	20,15	0,00	270,69
12	2066,68	822,49	438,64	412,65	396,49	2166,38
18	3352,96	1164,01	3132,46	1705,04	-	-
00	1364,63	1506,57	3004,82	277,95	1024,90	432,50
12	0,00	359,88	0,00	3567,66	803,50	1188,41
00	0,00	0,00	0,00	1712,33	328,02	0,02
Индекс Li						
00	-5,58	-3,98	-6,54	2,33	1,00	-2,13
12	-7,28	-3,11	-3,48	-1,27	-2,17	-5,58
18	-9,16	-3,50	-6,53	-5,13	-	-
00	-8,60	-3,87	-7,08	-0,25	-4,49	-3,56
12	-8,56	-3,57	16,16	-8,97	-5,12	-2,66
00	-5,39	3,27	15,34	-3,14	-0,64	0,49
Индекс SWEAT						
00	320,99	253,60	571,24	177,22	71,02	246,29
12	363,95	191,82	575,75	261,21	73,00	288,22
18	518,01	240,00	506,08	335,63	-	-
00	416,98	286,58	254,00	280,80	192,50	290,50
12	363,73	128,16	128,98	670,35	277,96	200,56
00	525,09	136,57	117,22	253,39	90,02	95,42
Индекс Ki						
00	21,30	29,70	29,50	7,60	6,70	25,70
12	22,70	36,00	38,20	26,30	15,10	14,80
18	29,60	36,50	38,80	22,30	-	-
00	26,50	36,90	9,50	31,10	19,30	35,70
12	24,30	29,50	-14,90	34,90	24,70	30,00
00	33,50	28,70	-17,70	37,40	15,10	29,10
Индекс TT						
00	55,40	47,80	51,50	43,70	43,80	48,20

12	57,40	47,20	55,36	53,40	45,40	52,90
18	56,30	49,90	56,40	52,60	-	-
00	55,20	52,60	46,40	49,80	51,00	52,60
12	55,40	45,80	23,40	61,00	51,80	50,30
00	55,20	42,80	26,40	51,00	38,40	48,80

В городе Цукуба (Япония) и городах Бржецлав и Годонин (Чехия) действительно наблюдались случаи торнадо, но в связи с тем, что измерения проводились не в полном объёме и аэрологические станции сильно удалены от центров событий, нам не удалось выполнить качественный анализ. Поэтому для оценки эффективности работы прогностических индексов мы сравнили между собой четыре случая (Туапсе, Мур, Филадельфия, Гринсбург). Используя случай в городе Туапсе, мы наблюдали за тем, как сильно значения индексов для гроз будут отличаться от значений индексов для случаев торнадо. Результаты анализа представлены на рисунке 26.

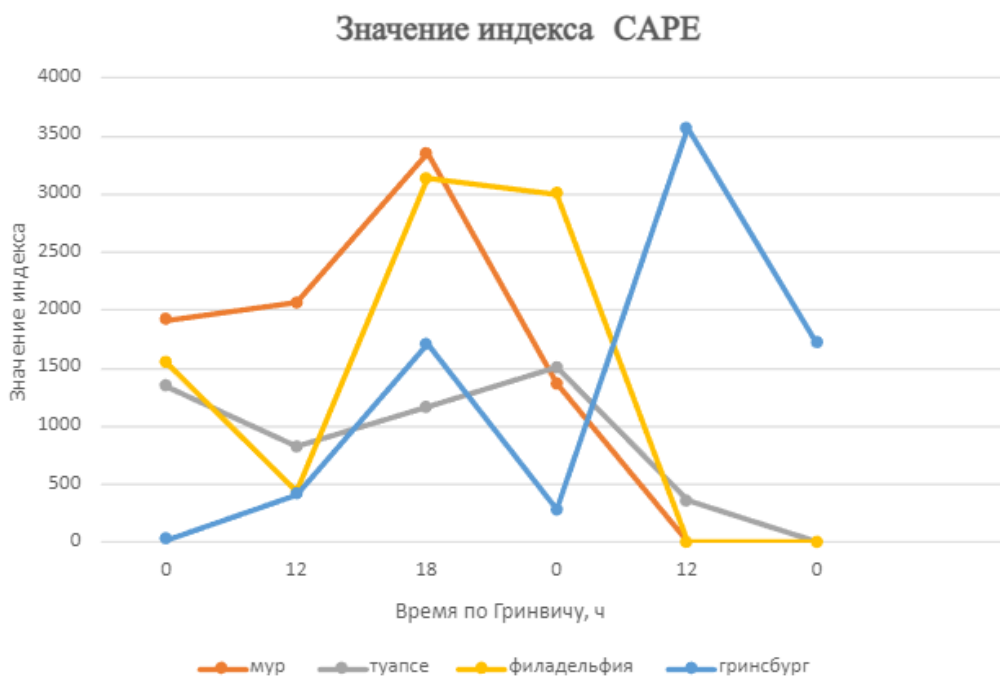


Рисунок 26 (а)

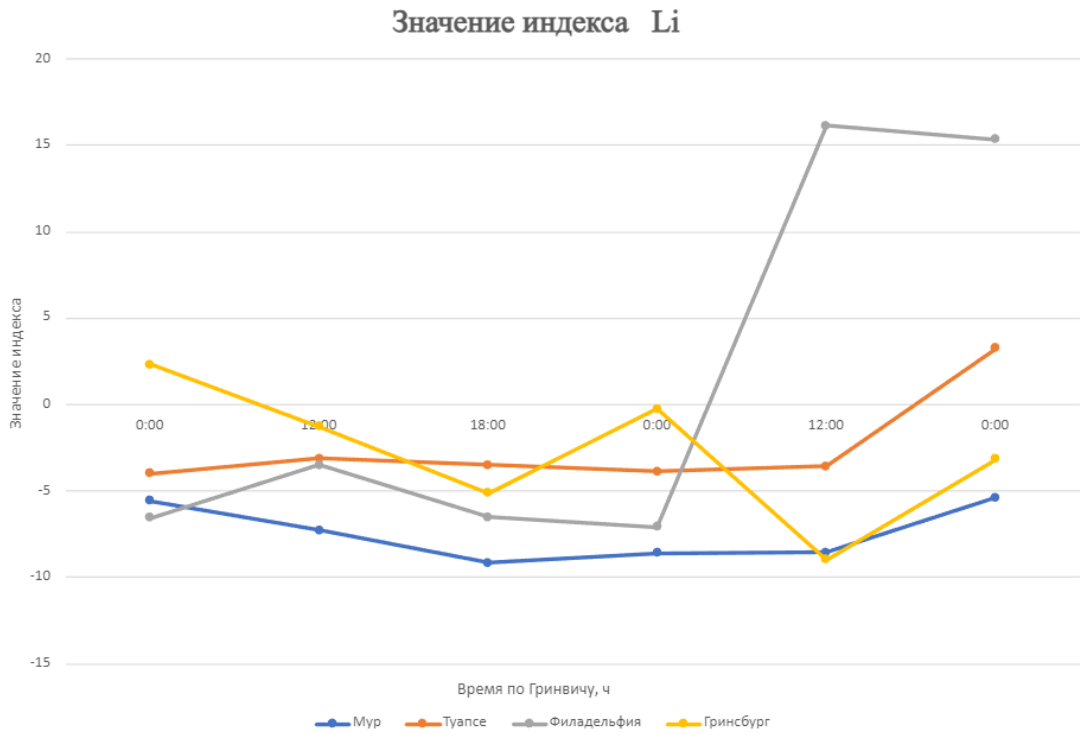


Рисунок 26 (б)

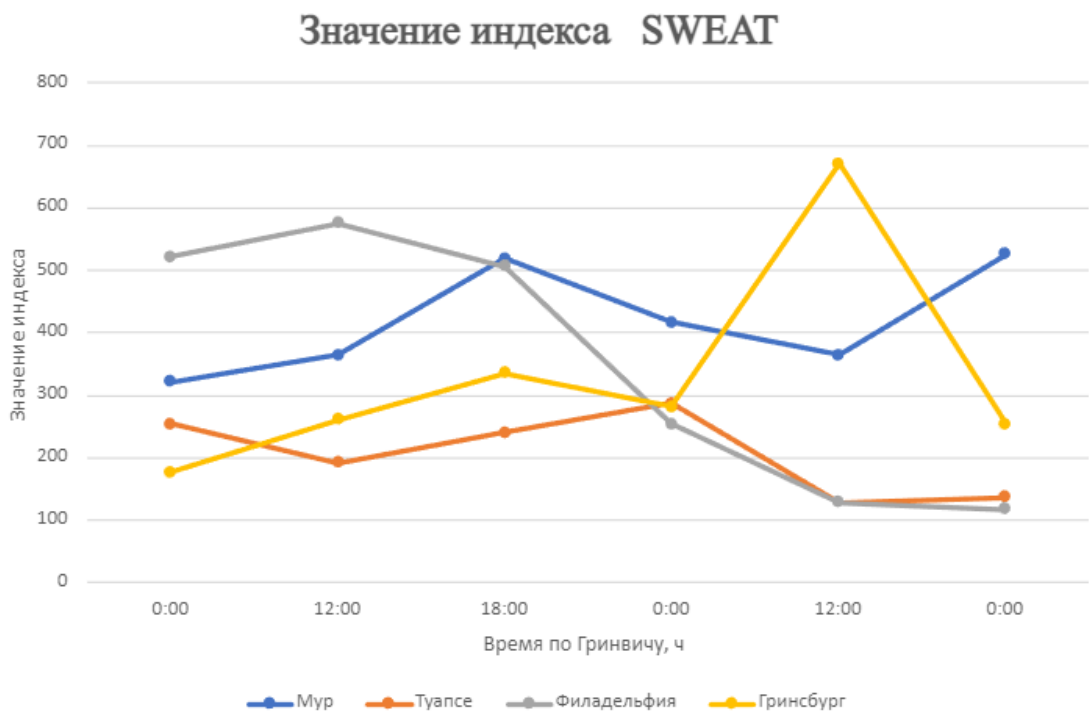


Рисунок 26 (в)

Значение индекса Ki

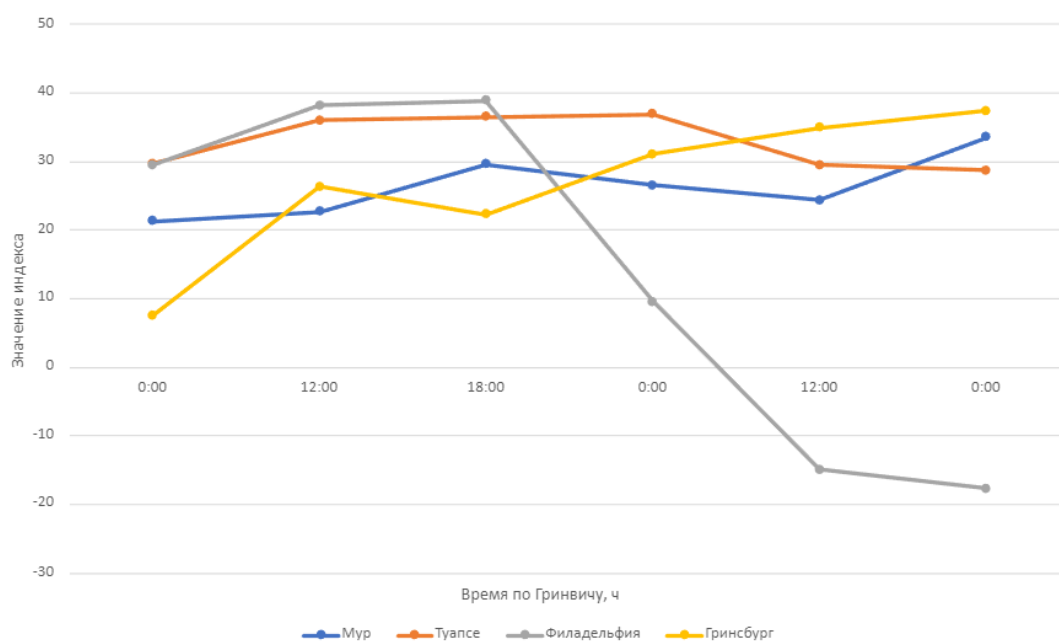


Рисунок 26 (г)

Значение индекса ГТ

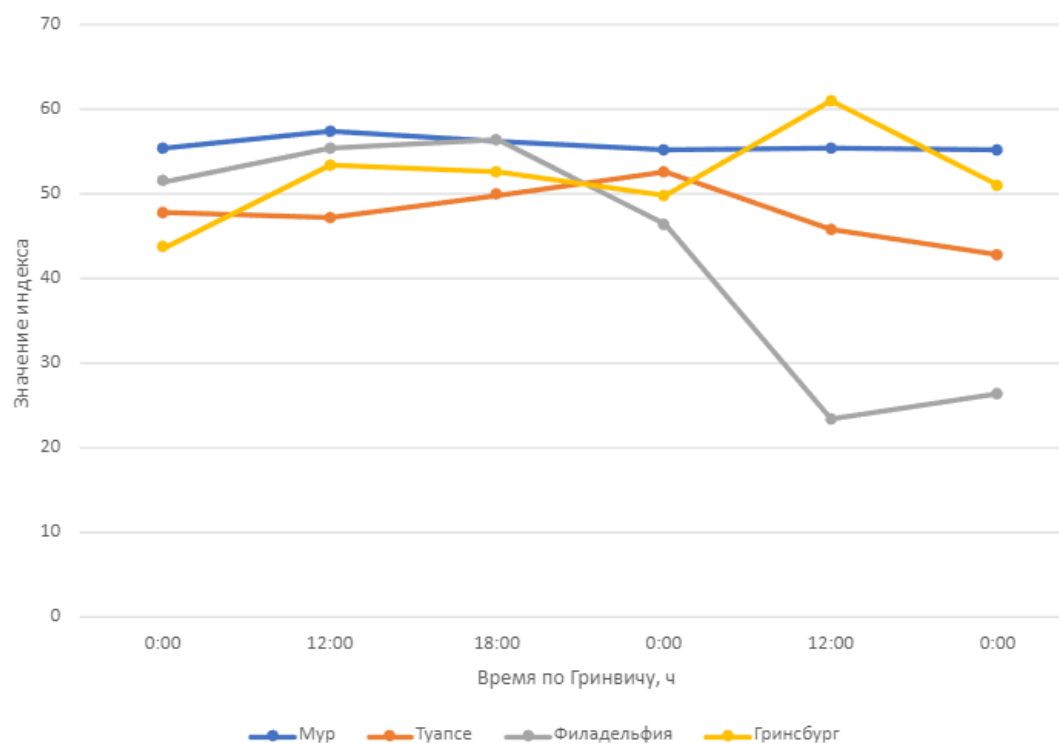


Рисунок 26 (д)

На рисунке 26 а) представлен график изменения значения индекса CAPE по времени (до начала опасного явления, во время и после него). Как видно из данного графика, значения индекса CAPE увеличивались к началу опасных погодных явлений, а самые большие значения наблюдались во время торнадо и гроз. Во время грозы в городе Туапсе наблюдались типичные значения для гроз — от 600 до 1500 Дж/кг. Во время отсутствия — менее 400 Дж/кг. Для случаев, в которых наблюдалось торнадо, значения в несколько раз больше. Во время отсутствия торнадо значения были такими же, как и во время отсутствия гроз. Исходя из анализа графика, можно с уверенностью говорить о том, что индекс CAPE показывает неустойчивость атмосферы, которая, в свою очередь, приводит к образованию опасных явлений погоды. Индекс CAPE рекомендуется использовать для прогноза торнадо.

На рисунке 26 б) представлен график изменения значения индекса Li по времени (до начала опасного явления, во время и после него). Обратив внимание на график, можно наблюдать, что значения индекса Li уменьшались к началу опасных погодных явлений, а самые низкие значения наблюдались во время самих опасных явлений (торнадо и гроз). Для грозы в городе Туапсе значения индекса Li были в пределах от -2 до -4. При отсутствии значения были больше 0. Во время случаев торнадо значения индекса Li были в несколько раз меньше значений индекса Li для гроз. Когда опасные явления отсутствовали, значения индекса Li для гроз и значения индекса Li для торнадо соответствовали друг другу. Работа этого индекса эффективна, его рекомендуется использовать для прогноза опасных явлений погоды.

На рисунке 26 в) представлен график изменения значения индекса SWEAT по времени (до начала опасного явления, во время и после него). Обратив внимание на график, можно наблюдать, что значения индекса



SWEAT росли до начала опасного явления, а во время опасного явления достигали своих максимальных значений. Для момента максимального развития грозы в Туапсе свойственны значения от 200 до 300 единиц, для момента её отсутствия — менее 200 единиц. Для случаев такого опасного явления, как торнадо, значения индекса  $L_i$  превышали значения индекса  $L_i$  для гроз в несколько раз. Когда торнадо не было, значения индекса соответствовали значениям индекса для отсутствия гроз. Индекс SWEAT действительно показывал неустойчивость атмосферы, которая приводит к образованию опасных природных явлений. Индекс SWEAT рекомендуется использовать для прогноза торнадо.

На рисунке 26 г) представлен график изменения значения индекса  $K_i$  по времени (до начала опасного явления, во время и после него). Посмотрев на график, можно наблюдать, что значения индекса  $K_i$  возрастали к началу опасных погодных явлений. Но при сравнении значений было выявлено, что значения индекса  $K_i$  для гроз были равны или даже немного больше значений индекса  $K_i$  для торнадо. Индекс  $K_i$  показывает неустойчивость атмосферы, но использовать его для прогноза опасных явлений погоды не рекомендуется.

На рисунке 26 д) представлен график изменения значения индекса  $T_T$  по времени (до начала опасного явления, во время и после него). Как следует из данного графика, значения индекса  $T_T$  возрастали до начала опасного явления, а во время опасного явления достигали своих максимальных значений. Индекс  $T_T$  показывает неустойчивость атмосферы. Но сравнивая значения индекса для торнадо и для гроз, можно пронаблюдать, что в случае грозы в Туапсе значения индекса были равны значениям индекса для случаев сильных торнадо в Муре, Гринсбурге и Филадельфии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе был изучен вопрос образования торнадоопасных облаков и выполнен анализ особенностей состава атмосферы. Образование смерчей происходит под мощным кучево-дождевым облаком, которое называется суперячейковым. Эти облака неоднородны и для них характерна значительная турбулентность. Жизненный цикл торнадо характеризуется тремя этапами: этапом зарождения, этапом максимальной мощности и этапом разрушения. За всю историю изучения этого опасного атмосферного вихря были введены различные шкалы силы торнадо и индексы, применяемые для его прогноза.

Смерчи чаще всего образуются в очень неустойчивой воздушной массе с высоким содержанием водяного пара. Вторая половина дня — самое благоприятное время для образования торнадо. Наиболее благоприятная температура воздуха для торнадообразования — 25-30°C. Наиболее часто встречающимся смерчам присваивают категории EF0, EF1, EF2 по расширенной шкале Фудзиты. Для прогноза этого опасного атмосферного явления были разработаны индексы, некоторые из которых (CAPE, Li, SWEAT, Ki, TT) были рассмотрены в рамках этой работы. Нами был составлен прогноз торнадоопасности для 5 различных регионов.

После анализа полученных нами результатов можно сделать следующие выводы:

1. Каждый из индексов показал неустойчивость атмосферы, которая, в свою очередь, приводит к опасным погодным явлениям.
2. Два индекса из пяти (индекс Ki и индекс TT) показывали одинаковые результаты для гроз и торнадо. Использовать эти индексы для прогноза такого опасного явления, как торнадо, нецелесообразно. По нашей оценке, эти индексы не эффективны.

3. Остальные индексы (индекс CAPE, индекс Li и индекс SWEAT) показали результаты для прогноза гроз, которые в несколько раз отличаются от результатов для прогноза торнадо. Мы считаем, что использование этих индексов достаточно эффективно на территории любых стран.
4. Для наиболее точного прогноза следует использовать весь комплекс методов прогнозирования и регулярные данные радиозондирования атмосферы.

В будущем необходимо изучить климатические факторы, влияющие на образование торнадо в различных регионах и рассмотреть особенности прогноза опасных погодных явлений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1965–533–534 с.
2. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник. 8-е издание. - Москва: Издательство Московского университета, 2012. - 584 с.
3. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005–136–140 с.
4. Зораб Р. Статья в научно-популярном журнале «Naked Science». Суперячейка или в шаге от торнадо. [электронный ресурс]  
<https://naked-science.ru/article/nakedscience/16-09-2013-534>
5. Зуев В. В., Павлов Н. Н. Смерчи: образование, строение, моделирование. Труды дальневосточного государственного технического университета, 2006 год, №142, с. 207–217.
6. Гидрометцентр России. Шкала Бофорта для оценки силы ветра.  
<https://meteoinfo.ru/bofort>
7. National Oceanic And Atmospheric Administrations. National Weather Service. <https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=cape>
8. Параметры для оценки рисков опасных явлений, связанных с развитием конвекции. [электронный ресурс] <https://u2019.meteoinfo.ru/services/cosmo-ru/convection.html>
9. Climate Data. Tsukuba Climate (Japan). [электронный ресурс] <https://en.climate-data.org/asia/japan/ibaraki/tsukuba-5568/>

10. Архив данных радиозондирования атмосферы. University of Wyoming.  
[электронный ресурс] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
11. Архив погоды. [электронный ресурс] [https://rp5.ru/Погода\\_в\\_мире](https://rp5.ru/Погода_в_мире)