



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 «Особенности эволюции мощных кучево-дождевых облаков, приводящих к образованию торнадо»

Исполнитель Мацуцына Юлия Сергеевна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент кафедры МКОА

Кашлева Лариса Владимировна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

подпись

кандидат географических наук, доцент
Абанников Виктор Николаевич

«11» 06 2019г.

Санкт-Петербург
2019

Содержание

Введение.....	3
1 Конвективные облака и торнадо.....	5
1.1 Конвективная облачность.....	5
1.1.1 Кучевые облака.....	9
1.1.2 Кучево-дождевые облака.....	10
1.2 Классы кучево-дождевых облаков.....	10
1.3 Общее описание торнадоопасных облаков.....	19
2 Модель развития торнадоопасного облака.....	23
2.1 Физическое описание возникновения торнадо.....	23
2.2 Система классификации торнадо.....	32
2.3 Индексы для прогноза торнадо.....	38
3 Оценка эффективности различных индексов активности конвективных процессов.....	46
3.1 Джоуплин, штат Миссури, США, 22 мая 2011 г.....	46
3.2 г. Севастополь и г. Туапсе, Россия, 30 июня 2018 г.....	48
3.3 Эль-Рино, штат Оклахома, США, 31 мая 2013 г.....	49
3.4 Пилджер, Небраска, США, 16 июня 2014 г.....	50
3.5 Анализ индексов неустойчивости атмосферы.....	51
Заключение.....	58
Список использованной литературы.....	60

Введение

Погода в жизни человека играет важную роль, а прогнозирование атмосферных процессов стало неотъемлемой частью современного мира. Прогнозы опасных явлений погоды способны сохранить множество жизней и снизить возможный ущерб. Одним из самых опасных атмосферных явлений является торнадо, спрогнозировать который довольно трудно ввиду специфических особенностей процесса образования. По всему земному шару каждый год фиксируется все больше случаев появления торнадо даже в регионах, для которых не характерен данный атмосферный вихрь. Возможная причина данной ситуации – это изменение климата. Изучением торнадо занимаются исследователи практически всех стран, потому что возможность прогнозирования опасных явлений является одной из наиболее актуальных задач в метеорологии.

Целью данной работы является изучение особенностей эволюции мощных кучево-дождевых облаков и погодных условий, приводящих к образованию торнадо.

Для реализации поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Сбор и изучен литературы об условиях формирования торнадоопасных облаков,
2. Изучение современных моделей развития торнадо,
3. Сбор данных, прогнозирование и оценка работы индексов неустойчивости для случаев возникновения торнадо в различных регионах.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. В списке литературы содержится 17 источников, включающие научную и учебную литературу, материалы из глобальной сети Интернет, а так же базы архивных данных метеорологических наблюдений.

Во введении сформулирована цель работы, поставлены задачи для ее достижения, указана актуальность данного исследования.

В первой главе изучаются общие сведения о конвективных и торнадоопасных облаках.

Во второй главе рассматривается процесс развития торнадоопасного облака, системы классификации торнадо и индексы неустойчивости атмосферы, используемые для прогноза торнадо.

В третьей главе изучаются случаи возникновения торнадо на Черном море и Североамериканском континенте, проведен расчет и анализ индексов неустойчивости в роли прогностического параметра по отношению к торнадо.

1 Конвективные облака и торнадо

1.1 Конвективная облачность

Облака представляют собой одно из интереснейших явлений природы. Понятие погода можно определить как сложный комплекс явлений и элементов, в котором облакам и явлениям, связанных с ними, отводится определяющая роль. Характеристики и параметры облачности оказывают важное влияние на формирование климата и его дальнейшее изменение. Так же облака влияют на радиационный и тепловой режимы атмосферы, что сказывается на многих сторонах деятельности человека, на флору и фауну Земли.

Облаком называют видимую совокупность взвешенных капель воды или кристаллов льда, которые находятся на определенной высоте над земной поверхностью. С точки зрения микрофизического строения между туманами и облаками принципиальной разницы нет, но между ними наблюдается существенное различие в условиях образования, вертикальной мощности и других параметрах. Оба явления возникают в результате конденсации (а так же сублимации) водяного пара. Процессы конденсации и облакообразования происходят в атмосфере под влиянием тех же процессов, которые работают и для туманов. Облачность образуется вследствие увеличения общего влагосодержания или под влиянием понижения температуры воздуха. Однако в реальности важную роль играют оба фактора. В свободной атмосфере, т.е. вне приземного слоя, важнейшим процессом является адиабатический подъем воздуха, который приводит к понижению температуры и процессу облакообразования. Понижение температуры может происходить также под влиянием излучения и турбулентного перемешивания.[1, 533-534]

Облака можно разделить на следующие виды в зависимости от условий образования и свойств:

1. Волнистые облака: при движении двух воздушных масс (холодной и более плотной, теплой и менее плотной) на их границе образуются волновые движения с разной длиной волны и амплитудой. Данные волны возникают в инверсионных слоях или слоях с сильно устойчивой стратификацией, а так же при обтекании потоком воздуха гор и возвышенностей. На гребнях этих волн атмосферный воздух поднимается, адиабатически охлаждается и насыщается водяным паром. Вследствие этого и образуются облака в виде плит, гряд, валов.

Этот тип облаков имеет небольшую вертикальную мощность — до сотен метров, в редких случаях могут достигать 2-3 км и более.

2. Облака восходящего скольжения: образуются при встрече холодных и теплых воздушных масс. Процесс образования для всех типов фронтов схожий. Рассмотрим процесс образования облаков восходящего скольжения на примере холодного фронта. В самом начале фронт разделяет пологий клин холодного воздуха и лежащий рядом и над ним более теплый воздух. Это приводит к развитию восходящего движения теплого воздуха по клину холодного, но вследствие того, что поверхность фронта имеет совсем небольшой угол наклона, основное движение теплого воздуха происходит по горизонтали с небольшим вертикальным переносом (скорость составляет примерно 0,5 – 2 см/с). Именно этот медленный подъем теплой воздушной массы приводит к медленному адиабатическому охлаждению мощных слоев воздуха и конденсации водяного пара в них. В результате возникает система облаков, которая находится над холодным воздухом.

Такие облака представляют собой огромные облачные системы, вытянутые в длину вдоль фронта на тысячи километров и в ширину на сотни километров. Облачная система холодного фронта более узкая, а в передней части имеет характер кучево-дождевых облаков, из которых выпадают ливневые осадки. Это связано с более бурным характером подъема теплого воздуха, чем в случае теплого фронта. На фронтах окклюзии движение воздуха

происходит по более сложной схеме, но и в этом случае получается облачная система похожая на предыдущие случаи.

3. Облака турбулентного перемешивания: возникают в результате подъёма воздуха с земной поверхности при усилении ветра. Вероятность их образования возрастает, если в приземном слое атмосферы наблюдается туман, который может постепенно переходить в слоистые облака.

В нижнем слое атмосферы (толщина которого 1 - 1,5 км) на некоторой высоте может возникнуть инверсионный слой. Ниже этого слоя в результате интенсивного турбулентного перемешивания происходит перераспределение тепла и влаги. Водяной пар и тепло поднимаются вверх от подстилающей поверхности. В результате температура в подинверсионном слое понижается, а влажность увеличивается, т.к. водяной пар задерживается инверсионным слоем. Все это и приводит к образованию облачности.

4. Кучевообразные (конвективные) облака: имеют вид изолированных облачных масс. Облака сильно развиты по вертикали и имеют небольшую горизонтальную протяженность, делятся на кучевые и кучево-дождевые. В основном эти облака наблюдаются в зонах пониженного давления. Конвективные облака в зависимости от облакообразующих факторов подразделяются на облака динамической конвекции и облака термической конвекции.

На возникновение облаков динамической конвекции в тропосфере оказывают влияние динамические факторы: вертикальные движения синоптического масштаба, конвергенция потоков воздуха, вынужденный подъем воздуха при обтекании препятствия, перпендикулярного к потоку. В левой части рисунка 1 изображена схема образования кучевого облака под влиянием динамической конвекции. Стрелочками показан поток воздуха, который совершает вынужденный подъем из-за встречи с препятствием, расположенного перпендикулярно к потоку.[1, 556-567]

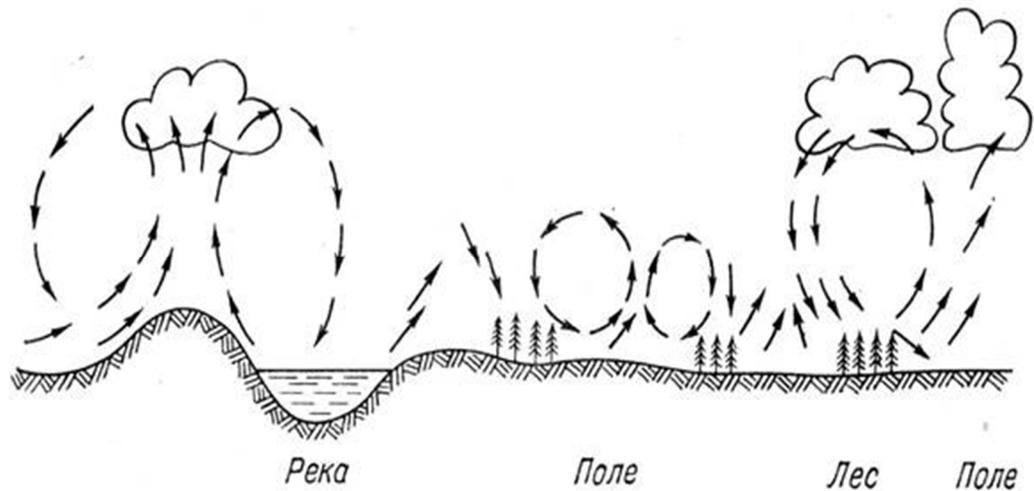


Рисунок 1 – Развитие динамической и термической конвекций

Термическая конвекция возникает из-за неравномерного прогрева подстилающей поверхности солнечной радиацией. Над более холодными участками возникают нисходящие движения воздуха, а над более теплыми – восходящие. Со временем небольшие потоки объединяются, создавая крупные восходящие и нисходящие движения воздуха. Именно эти потоки и приводят к образованию конвективных облаков. Наиболее благоприятные условия для возникновения конвективных движений создаются над сушей в теплую половину года днем. Именно этот процесс образования облачности вследствие термической конвекции и изображен в правой части рисунка 1. Так же стрелочками показаны восходящие и нисходящие движения воздуха. При движении слева направо можно увидеть процесс объединения мелких потоков в более крупные, которые и приводят к образованию облачности.

На рисунке 2 представлен процесс образования конвективных облаков. Первая стадия характеризуется восходящими движениями воздуха небольшой мощности и относительно низким уровнем конвекции, вследствие этого образуются облака небольшой вертикальной мощности (кучевые плоские). При увеличении мощности вертикальных движений и возрастании уровня конвекции, облака переходят в форму кучевых средних, а далее в форму

кучевых мощных. В случае очень мощных вертикальных потоков, облака могут достигнуть уровня ледяных ядер, что и приводит к образованию ледяной «шапки», где водяной пар превращается в ледяные кристаллы и может образоваться град. [1, 568-577]

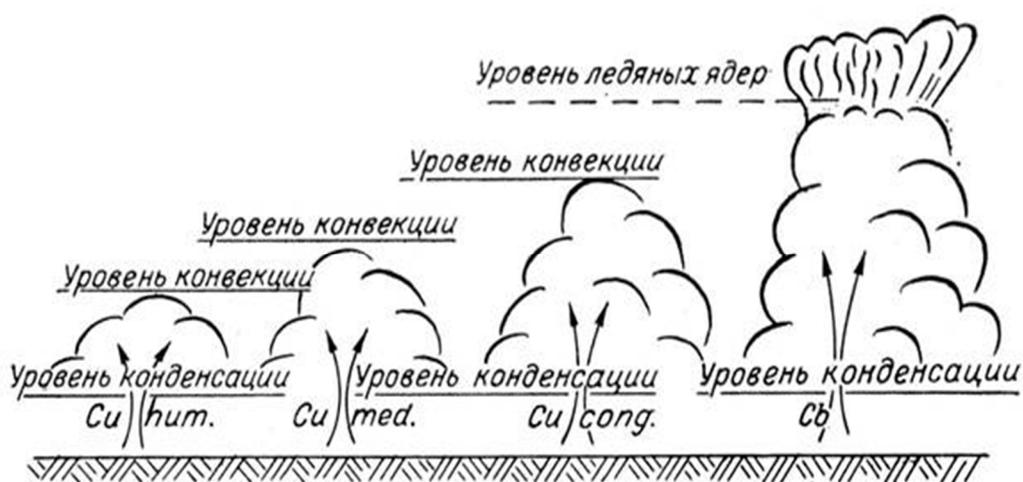


Рисунок 2 – Процесс образования кучевых и кучево-дождевых облаков

1.1.1 Кучевые облака (Cumulus – Cu).

Кучевые облака — это плотные, ярко-белые облака со значительной вертикальной протяженностью, верхние части которых имеют вид куполов или башен с округлыми очертаниями. Данная форма облаков состоит из капель воды, более крупных в верхней части облака (радиус капель около 20 мкм) и более мелких у его основания (радиус капель около 10 мкм). При отрицательных температурах капли находятся в переохлажденном состоянии. В умеренных широтах высота нижней границы облачности составляет 0,5–1,3 км, вертикальная протяженность – 0,1–2 км, но иногда встречаются случаи с большей вертикальной протяженностью.

Из всего многообразия кучевых облаков выделяют 3 вида: кучевые плоские (Cuhum.) (слабо развиты по вертикали), кучевые средние (Cumed.) и мощные кучевые (Cucong.) (сильно развиты по вертикали, внешний вид похож

на башенки с клубящейся верхней частью). При определенных условиях Cusong. могут превращаться в кучево-дождевые облака (Cb).

1.1.2 Кучево-дождевые облака (Cumulonimbus - Cb).

Кучево-дождевая облачность имеет свинцово-темную окраску и дает ливневые осадки. Состоит из капель разного размера (радиус которых колеблется от 0,1 мкм до 1 см), а также ледяных кристаллов, снежных зерен и града (радиусом до нескольких см). В холодное время года, когда температура воздуха принимает отрицательные значения, при которых замерзают облачные капли и растут ледяные кристаллы, наблюдаются уже на сравнительно небольшой высоте, при наличии конвекции образуются плоские кучево-дождевые облака (Cbhum.), но дающие достаточно интенсивные осадки.

Высота нижней границы кучево-дождевого облака обычно находится в пределах 0,6–1,2 км, а верхняя граница достигает 4–5 км, в отдельных случаях – высоты тропопаузы (8–9 км).[2]

Основным процессом образования кучево-дождевых облаков является процесс охлаждения воздуха при восходящем движении в условиях сильно развитой динамической или термической конвекции. Поэтому толщина их достигает 3–5 км.

1.2 Классы кучево-дождевых облаков

Выделяют три класса кучево-дождевых облаков по классификации, принятой Всемирной метеорологической организацией (ВМО): одноячейковые, мультіячейковые (многаячейковые) и облака типа суперячеек. Рассмотрим каждый класс подробнее.

1. Одноячейковые (Ordinary): Их называют ещё локальными грозами или внутримассовыми. Этот тип облачности состоит из конвективной ячейки, в

центральной части которой находится восходящим потоком. С ними связаны кратковременные ливневые осадки, а иногда и слабые грозы.

На рисунке 3 приведена схема всех стадий жизни одноячейкового облака. Гроза в одноячейковых облаках начинается с возникновения кучевого облака хорошей погоды (*Cumulushumilis*). При благоприятных условиях (слабый ветер и малоградиентное барическое поле) сформировавшиеся облака быстро растут в вертикальном и в горизонтальном направлении. Восходящие потоки находятся почти по всему объёму облака и возрастают до 15-20 м/с, а нисходящие потоки очень слабы. Окружающий воздух активно проникает внутрь облака за счёт смещения на границе и вершине облака. В этом заключается 1 стадия роста одноячейкового облака, которая длится 10-15 минут. На рисунке 3 стадия роста представлена первыми тремя секциями. Затем облако переходит в стадию зрелости, из *Cumulushumulus* переходит в *Cumulusmediocris*. Мельчайшие водяные капли, образующиеся в результате конденсации, сливаются в более крупные, которые уносятся мощными восходящими потоками вверх. Облако всё ещё имеет однородный состав, т.е. состоит из капель воды, которые удерживаются восходящим потоком, что препятствует выпадению осадков. В верхней части облака капли постепенно начинают превращаться в кристаллы льда из-за преобладающих здесь отрицательных температур. Облако переходит в стадию мощно-кучевого облака (*Cumuluscongestus*). Смешанный состав облака приводит к укрупнению облачных элементов и созданию условий для выпадения осадков. Такое облако называют кучево-дождевым (*Cumulonimbus*) или кучево-дождевым лысым (*Cumulonimbuscalvus*). Вертикальные воздушные потоки в нём достигают скорости 20 – 25 м/с, а уровень вершины составляет 7—8 км.

Частицы осадков испаряются и охлаждают окружающий воздух, что приводит к дальнейшему усилению нисходящих потоков. На стадии зрелости, которая на рисунке 3 представлена третьей и четвертой секциями, в облаке одновременно присутствуют и восходящие, и нисходящие воздушные потоки.[3]

На стадии распада (на рисунке 3 представлена шестой секцией) в облаке преобладают нисходящие потоки, которые постепенно охватывают все облако. Вертикальная протяжённость одноячейкового облака достигает от 8—12 км, а диаметр 5—15 км. Продолжительность жизни около 1 часа.

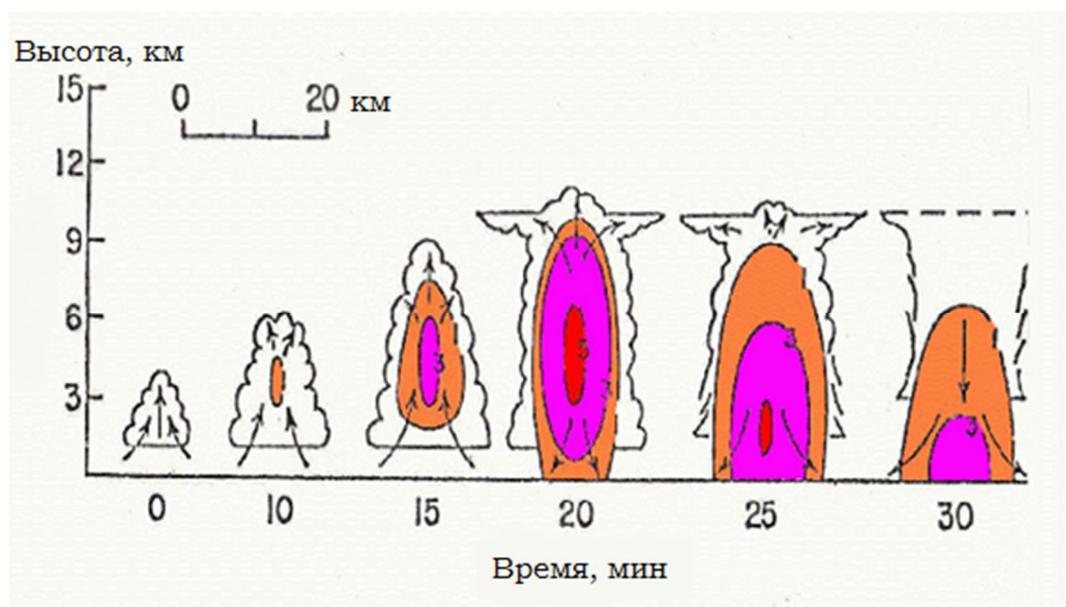


Рисунок 3 – Стадии жизни одноячейкового облака

2. Мультиячейковые (Multicell): это наиболее распространённый тип гроз, который связан с мезомасштабными возмущениями. Они состоят из групп одноячейковых облаков, слившихся в общее скопление (кластер), у которого формируется единая наковальня сверху. Каждая ячейка в кластере идентична одноячейковому облаку и находится на разных стадиях развития грозового облака, рассмотренного выше. На рисунке 4 приведена схема многоячейкового облака. На нем цифрой I отмечена ячейка, находящаяся в стадии распада, ячейка II находится в стадии зрелости, а ячейки III и IV только развиваются. Мультиячейка на схеме движется справа налево, стрелки показывают направление воздушных потоков.

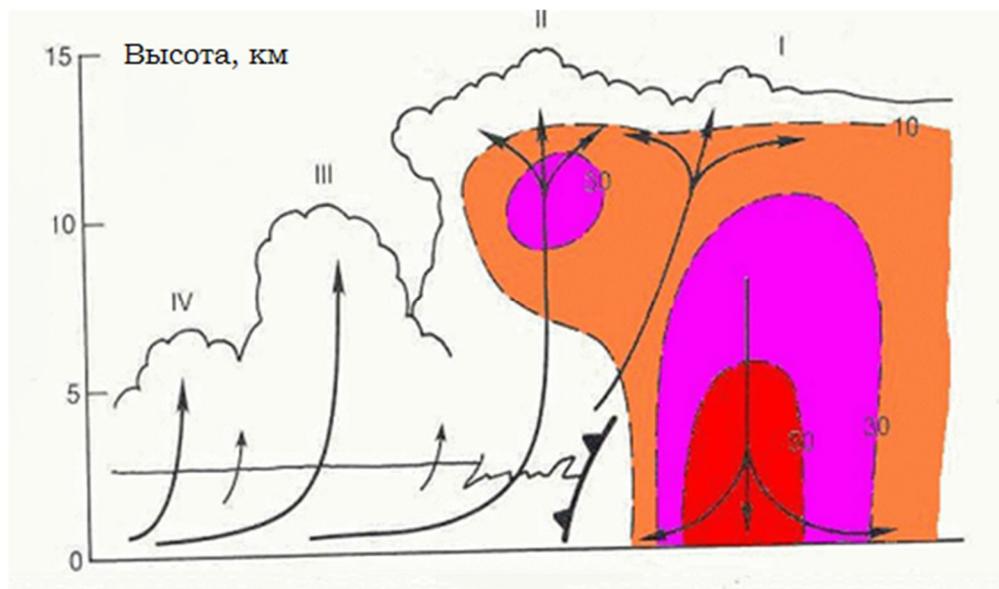


Рисунок 4 – Схема многоячейкового облака

С мультячейками связаны интенсивные ливни, грозы, шквалы, иногда град. Это самый часто наблюдаемый класс кучево-дождевых облаков в средних широтах в летний период.

Каждая отдельная ячейка в многоячейковом кластере находится в зрелом состоянии около 20 минут, а сам многоячейковый кластер может существовать в течение нескольких часов. Диаметр этого многоячейкового скопления составляет порядка 15—20 км, толщина 7—10 км, вершины ячеек нередко поднимаются до тропопаузы и проникают в стратосферу. Данный тип грозы обычно более интенсивен, чем одноячейковая гроза, но намного слабее суперячейковой грозы.[4]

В некоторой литературе мультячейковые облака разделяют на кластерные многоячейковые и линейные многоячейковые (линии шквалов) облака.

Многоячейковые линейные грозы представляют собой линию гроз, на передней линии которого расположен продолжительный и хорошо развитый фронт порывов ветра. Линия шквалов может быть сплошной или прерываться. Приближающаяся многоячейковая линия выглядит как тёмная стена облаков. Квалифицировать данный комплекс гроз как многоячейковый можно из-за

большого числа близко расположенных восходящих и нисходящих потоков воздуха, но его грозовая структура резко отличается от многоячейковой кластерной грозы. Данный тип облачности может давать крупный град и интенсивные ливни, но его яркой особенностью являются сильные нисходящие потоки. Линия шквалов близка по свойствам к холодному фронту и часто возникает впереди него, но она является локальным результатом грозовой деятельности. На снимках с радаров эта система напоминает изогнутый лук. Данное явление характерно для Северной Америки, на территории Европы и Европейской территории России может наблюдаться реже.

3. Суперячейковые (Supercell): самое высокоорганизованное грозовое облако. Из всех типов кучево-дождевой облачности суперячейки встречаются наименее часто и представляют наибольшую опасность.

Суперячейковое облако имеет одну зону восходящего потока как и одноячейковое, но главное различие этих облачных систем состоит в размерах: высотасуперячейковых облаков составляет 10—15 км (нередко проникают в стратосферу), диаметр около 50 км, имеют единую полукруглую наковальню, а так же часто изолированы от других гроз. Скорость восходящего потока в данном типе грозовых облаков значительно выше, чем в других: до 40—60 м/с.

На рисунке 5 представлена схема строения суперячейки. В легенде на схеме под цифрой 1 обозначены линии тока, цифрой 2 обозначены траектории градин, а косыми линиями заштрихована область наиболее интенсивного радиоэха. На графике, который находится справа от схемы суперячейки, показаны скорости движения воздуха по отношению к облаку.

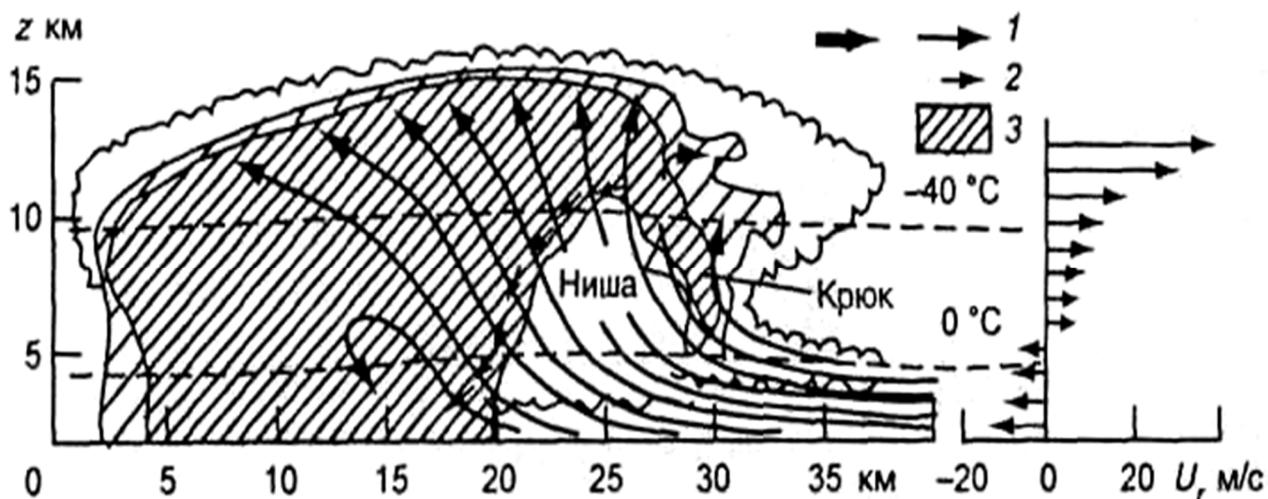


Рисунок 5 – Схема строения суперячейкового облака

Для формирования суперячейки необходимы следующие окружающие условия: очень сильная конвективная неустойчивость воздуха, температура воздуха у земли до грозы должна составлять $+27 - +30$ °C и выше, мощное струйное течение в верхней тропосфере, но главным необходимым условием является ветер переменного направления, который способен вызывать вращение. С суперячейкой связана целая система вертикальных и горизонтальных потоков воздуха. Мощный сдвиг в слое 0-6 км и достаточная плавучесть необходимы для образования вращающегося восходящего потока – мезоциклона.[5] Горизонтальное вихрение, вызванное вертикальным сдвигом является решающим в его формировании. Таким образом, для формирования суперячейки благоприятен тёплый сектор циклона недалеко перед холодным фронтом, вблизи оси высотной фронтальной зоны и соответствующего ей струйного течения.

На рисунке 6 представлена схема воздушных потоков в зоне суперячейки. На схеме изображено суперячейковое облако в разрезе, стрелочками на котором показаны направления движения воздуха. Облако перемещается справа налево. В его передней части наблюдаются восходящие движения воздуха, а в тыловой – нисходящие.

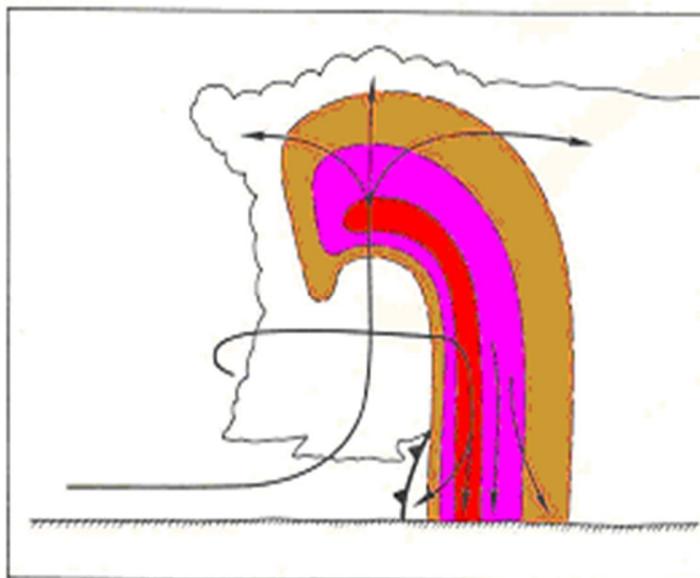


Рисунок 6 – Воздушные потоки в зоне суперячейкового облака

Все суперячейковые облака производят суровые погодные условия (град, шквалы, ливни), но только 30% или меньше из них генерируют торнадо, поэтому необходимо различать облака, генерирующие торнадо, от более «спокойных». Образование суперячейки в условии существенного искривления годографа в слое 0-2 км способствует развитию торнадо. Однако развитие торнадо зависит от динамической структуры шторма. Должен присутствовать сильный восходящий поток и вертикальное вращения для сильного мезоциклона и развития смерча.

На рисунке 7 наглядно показано строение суперячейкового облака. В нем имеется сильное восходящее вращение, которое образует мезоциклон, приводящий к образованию торнадо. В тыловой и передней частях облака располагаются нисходящие потоки. Так же на данном рисунке показана зона осадков, в которой слабый дождь сменяется сильным дождем и градом по мере приближения к центру облака. За зоной осадков следует торнадо, который скрыт от наблюдателя «занавесом» из осадков, пыли и поднятых обломков.

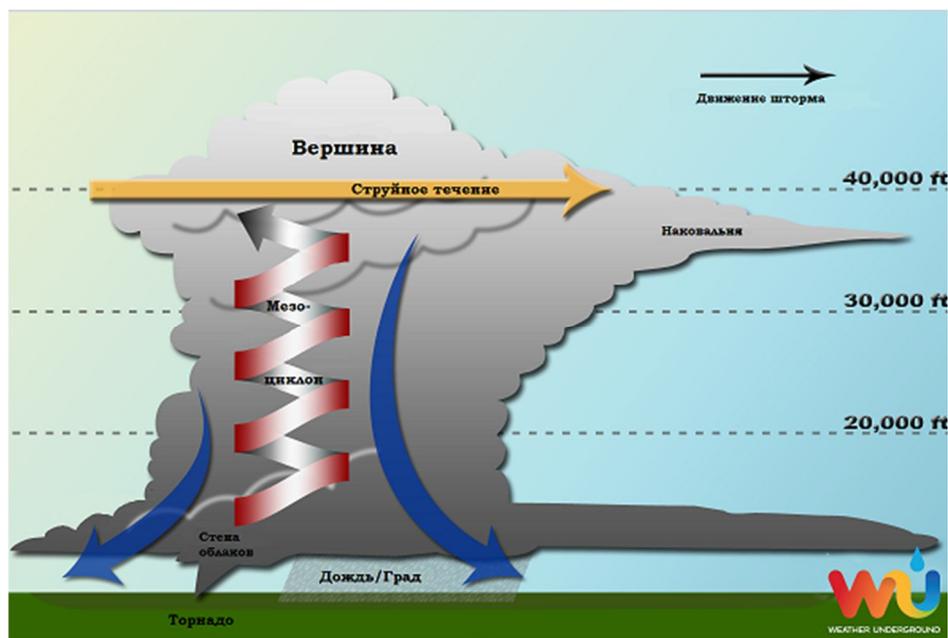


Рисунок 7 – Структура суперячейки с воздушными потоками и сопровождающими явлениями

Данный тип кучево-дождевых облаков может образоваться в любых регионах Земли, но самыми благоприятными для этого районами являются: в центральных штатах США – на Великих равнинах (в районе, известном как Аллея торнадо), над равнинами в Аргентине, Уругвае и на юге Бразилии. В Европе и России они крайне редкие (наиболее часты в Кавказском регионе).

Суперячейки обычно разделяют на 3 вида, но некоторые из них часто переходят с одного вида в другой в процессе своей эволюции, что затрудняет процесс их идентификации.

- Классическая суперячейка (Classicsupercell): это идеальная суперячейка, в которой присутствуют почти все вышеперечисленные элементы, как на радаре, так и визуальные. Показатели неустойчивости для этого типа составляют: CAPE: 1500 – 3500 Дж/кг, Li от -4 до -10. Но в природе такие ячейки встречаются довольно редко, чаще наблюдаются два оставшихся типа.[5]

- Суперячейка типа LP (LowPrecipitation): этот класс суперячеек имеет небольшую область со слабыми осадками (дождь, град), которая отделена от восходящего потока. Этот тип легко распознать за счёт выразительных

облачных борозд в основании восходящего потока и иногда имеет менее внушительный по сравнению с классической суперячейкой. Это связано с тем, что они формируются вдоль сухих линий в случаях, когда у поверхности земли наблюдается тёплый и влажный воздух, который вклинивается, подобно холодному фронту, под более жаркий и сухой воздух, имея мало доступной влаги для своего развития, несмотря на сильный сдвиг ветра. Такие облачные ячейки обычно быстро разрушаются, не переходя в другие типы. Как правило, они порождают слабые торнадо и град, размером до 2 см. Из-за отсутствия сильных осадков, этот тип ячеек имеет слабое отражение на радаре без чёткого отраженного сигнала, хотя в это время на самом деле наблюдается торнадо. Грозовая активность такой ячейки значительно ниже по сравнению с другими типами и молнии преимущественно внутриоблачных, а не между облаком и землёй. Эти суперячейки формируются при следующих значениях показателей неустойчивости: $CAPE=500 - 3500$ Дж/кг и $Li=-2 - (-8)$. Ячейки типа LowPrecipitation обычно образуются в более засушливом климате, таком как в высокогорных долинах США. Также они наблюдались в Австралии. [5]

- Суперячейка типа HP (HighPrecipitation): данные суперячейки имеют гораздо более сильные осадки, чем остальные виды, которые могут полностью окружать мезоциклон. Суперячейки типа HP особо опасны, т.к. могут содержать мощный торнадо, который визуально скрыт за стеной осадков. Они часто вызывают наводнения и сильные нисходящие потоки, но имеют меньшую вероятность формирования крупного града в отличие от других типов. Было отмечено, что эти суперячейки генерируют большее количество разрядов между облаком и землей и внутриоблачных, чем остальные типы. Перемещаются такие ячейки относительно медленно. Показатель CAPE для этих суперячеек равен $2000 - 7000$ Дж/кг и более, а Li должен быть ниже -6. Характерны для более влажного климата, в Европе и России встречаются как раз суперячейки этого типа. [5]

1.3 Общее описание торнадоопасных облаков

Торнадо (смерч) – это быстро вращающийся столб воздуха, который опускается из кучево-дождевого облака или образуется под ним. Имеет вид облачного рукава (или «хобота»), а чтобы быть идентифицированным как торнадо, атмосферный вихрь должен исходить из облака и касаться земли.

Хотя смерчи – это локальное явление, но их образование связано с интенсивными макро- и мезомасштабными атмосферными процессами – зонами активной конвекции и грозовой деятельности, которые образуются при большой вертикальной неустойчивости воздушной массы. Эта воздушная масса должна характеризоваться конвергенцией (сходимостью) теплых и влажных потоков в ее нижней части и дивергенцией (расходимостью) относительно холодных и сухих потоков в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

Направление вращения воздуха в смерчах соответствует вращению в циклоне. То есть в Северном полушарии вращение происходит против часовой стрелки, а в Южном полушарии – по часовой стрелки. Известны случаи обратного вращения, но это скорее является исключением, чем правилом. Эта ситуация может быть связана с направлениями взаимных перемещений воздушных масс по сторонам от атмосферного фронта, на котором формируется смерч. Обычно торнадо возникает перед холодным фронтом и движется примерно в том же направлении со скоростью до 60 м/с.

На соседних со смерчем участках происходит опускание воздуха, что приводит к замыканию вихря. Ось вращения торнадо расположена вертикально или слегка наклонена. Его высота составляет сотни метров (в случаях мощных торнадо может достигать 1-2 км), диаметр 10-30 м, время существования — от нескольких минут до часа и более.

Большинство смерчей возникает в виде узкой воронки, с небольшим облаком пыли и обломков вблизи земной поверхности. Торнадо имеют широкий диапазон цветов (это зависит от условий образования атмосферного вихря). Смерчи, зарождающиеся при небольшом количестве влаги, могут быть

практически невидимы, и определить их наличие можно только по движениям воздуха у основания вихря и посторонним предметам, попавшим в него. У водяного смерча из-за процесса перемещения воды по воронке, окраска может колебаться от белого до насыщенного синего цвета. Конденсированные воронки, которые поднимают малое количество пыли и других частиц имеют цвет от серого до белого. Так же цвет зависит и от скорости вращения. Смерчиснизкой скоростью вращения успевают поглотить большее количество мусора, чем быстровращающиеся, что приводит к более темной окраске. Место зарождения вихря влияет не только на скорость и силу торнадо, но и на его цвет. Например, смерчи, возникающие в горных районах, могут стать белыми из-за попавшего в них снега, а сформированные на территории Великих равнин, могут покраснеть из-за красноватого оттенка почвы.

Условия освещения так же определяют цвет смерча. Если солнце располагается за воронкой (вихрь как бы подсвечивается), то его окраска кажется более насыщенной. В то же время если солнце светит в спину наблюдателя, то цвет кажется белым, серым или даже блестящим. Смерчи, возникающие в часы заката, имеют множество различных цветов и оттенков оранжевого, жёлтого и красновато-розового.

Торнадо практически всегда сопровождаются ливневым дождем, градом, грозой, которые уменьшают видимость этого опасного явления. Смерч может быть полностью скрыт стеной пыли или дождя, что очень сильно затрудняет определение наличия, параметров и местоположения воронки. Торнадо, возникающие в этих условиях, особенно опасны, ведь они могут быть обнаружены только с помощью метеорологических радиолокаторов наблюдения (либо по специфическому звуку приближающегося торнадо). Наиболее значительные смерчи образуются восходящими потоками штормового ветра, которые содержат дождевую воду, что делает их видимыми. Большинство торнадо возникают в конце дня, когда солнце может проникнуть сквозь облака (это помогает при обнаружении и исследовании этого явления),

но в ночное время они освещены только частыми вспышками молнии, именно это и добавляет ночным смерчам опасность.

Рассмотрим основные поражающие факторы торнадо:

- Подъём на большую высоту, падение с которой для человека может оказаться смертельным
- Захваченные предметы (в том числе заостренные), летящие с большой скоростью
- Возникновение пожаров
- Сопровождающая гроза, выпадающие ливневые осадки, град
- Разрушение зданий, обрывы линий электропередачи, коммуникаций из-за быстрого потока воздуха и перепада давления

Из-за различных условий образования и прочих факторов, торнадо делятся на следующие виды:

1. Бичеподобные – это наиболее распространённый вид смерчей. Воронка выглядит тонкой, гладкой, извилистой. Ее длина значительно превосходит радиус. Слабые торнадо и опускающиеся на воду смерчевые воронки, как правило, являются бичеподобными.

2. Составные торнадо – могут состоять из двух и более отдельных воронок вокруг главного центрального вихря. Подобные торнадо могут быть практически любой мощности, но чаще всего это одни из самых мощных. Они наносят значительный ущерб на обширных территориях. Довольно часто формируются на воде. Эти воронки немного связаны друг с другом, но бывают и исключения.

3. Распльвчатые – выглядят как вращающиеся, лохматые, спустившиеся на землю облака. Иногда диаметр такого торнадо даже превосходит его высоту. Все воронки большого диаметра (около 0,5 км и больше) являются распльвчатыми. Обычно это очень мощные вихри, часто составные. Наносят огромный ущерб из-за больших размеров и очень высокой скорости ветра.

4. Водяные – это торнадо, которые образовались над поверхностью океанов, морей, в редком случае озёр. Они затягивают в себя воду,

образовывая, в некоторых случаях, водовороты, которые вытягиваются к материнскому облаку, образуя водный смерч. Бывают бичеподобными. Не могут быть расплывчатыми (вода не находится под давлением, как у бичеподобных смерчей).

5. Огненные – это обычные смерчи, порождаемые облаком, которые образуются в результате сильного пожара или извержения вулкана. Они как бы впитывают в себя языки пламени, которые вытягиваются к материнскому облаку, образуя огненный смерч. Данный тип очень опасен, т.к. может разносить пожар на десятки километров. Бывают бичеподобными. Как и водяные, не могут быть расплывчатыми (огонь не находится под давлением, как у бичеподобных смерчей).

6. Земляные – эти торнадо очень редкие. Образуются во время разрушительных катаклизмов или оползней, землетрясений выше 7 баллов по шкале Рихтера, очень высокие перепады давления, сильно разрежен воздух. Бичеподобный земляной смерч расширяется к земле, имеет тонкую струйку земли внутри плотной воронки. Если сошел оползень, то появляется «вторая оболочка» из грязи и обломков. В случае с землетрясениями поднимает камни, что добавляет ему опасности.

7. Во время метелей могут образоваться снежные торнадо.

В первой главе мы рассмотрели условия формирования и развития кучево-дождевых облаков. Установили, что причиной образования конвективных облаков может быть динамическая или термическая конвекция. Кучево-дождевые облака могут порождать ливни, грозы, град и торнадо.

Во второй главе мы привели классификацию кучево-дождевых облаков, в которую входят одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые облака. Показали основные особенности развития каждого класса кучево-дождевых облаков.

В третьей главе подробно описано явление торнадо и приведена классификация этого опасного явления. Для диагноза торнадоопасных облаков

и прогноза их развития необходимо на основе теоритического описания явления выявить основные предикторы прогноза, что и является задачей нашего исследования.

2 Модель развития торнадоопасного облака.

2.1 Физическое описание возникновения торнадо.

Торнадо образуется под особо мощными кучево-дождевыми облаками (суперячейковыми), вершины которых пробивают тропопаузу. Торнадоопасные облака всегда обладают значительной неоднородностью и турбулентностью, вследствие этого они фактически являются генераторами и носителями торнадо (именно поэтому эти облака еще называют материнскими). Смерч состоит из трех частей: горизонтальных вихрей в материнском облаке, воронки и дополнительных вихрей.

На рисунке 8 приведено схематическое изображение торнадо. На нем можно увидеть облака и опускающуюся из них воронку, оболочку, которая и окружает воронку, а так же стрелками показаны движения воздушных потоков в системе материнское облако-торнадо и на поверхности земли. Далее все составные части торнадо разберем более подробно.



Рисунок 8 – Схема строения торнадо

Воронка – это основная составляющая торнадо. Она состоит из внутренней полости и стенок. Воронка смерча, по сути, является мелкомасштабным вихрем.

Размеры внутренней полости смерча колеблются от нескольких метров до нескольких сотен метров. Это пространство относительно резко ограничено стенками. Оно почти чистое, безоблачное, иногда от стенки до стенки могут проскакивать небольшие молнии. Движение воздуха в нем резко ослабевает и в основном направлено вниз.

Важнейшая особенность внутренней полости торнадо – это резкое падение давления. Это падение давления происходит довольно быстро, в некоторых случаях практически внезапно, что делает торнадо более опасным.

Движение воздуха внутри воронки направлено сверху вниз и редко достигает большой скорости. В стенках смерча, наоборот, движение воздуха направлено по спирали вверх и очень часто достигает необыкновенной скорости, до 100-200 м/с и больше. Создается область сильно разреженного воздуха. Точное определение скорости движения воздуха в воронке до сих пор представляет серьёзную проблему. В основном оценки этой величины известны

из косвенных наблюдений. В зависимости от интенсивности вихря скорость течения в нём может варьироваться.

Стенки смерча – это его активная разрушающая и характерная часть. Строение их весьма разнообразно. Можно выделить два основных типа. Первый тип обладает плотными, гладкими, резко ограниченными стенками (соответствует бичеподонным, огненным и водяным видам торнадо). У второго типа они расплывчатые, неясно ограниченные (расплывчатые торнадо).

Несмотря на различие внешнего вида этих двух типов, принципиального внутреннего различия между ними нет. На различных стадиях развития один и тот же смерч может принимать то один, то другой тип строения его стенок. Это зависит от условий формирования торнадо. Ширина стенок составляет всего несколько метров.

В месте контакта основания смерчевой воронки с поверхностью земли или воды (в зависимости от места формирования торнадо) может возникать каскад. Это столб или облако пыли, обломков, поднятых с земли предметов и брызг воды. При формировании торнадо наблюдатель видит, как навстречу опускающейся с неба воронке с земли поднимается каскад, который затем охватывает нижнюю часть воронки. Термин каскада происходит от того, что обломки, поднявшись до некоторой незначительной высоты, не могут уже удерживаться потоком воздуха и падают на землю. Воронку может окутывать футляр, который не соприкасается с землёй. Сливаясь, каскад, футляр и материнское облако создают иллюзию, что смерчевая воронка шире, чем есть на самом деле. На рисунке 9 это хорошо просматривается. Воронка имеет более темный цвет, т.к. ее стенки более плотные, чем окутывающий футляр. Но по мере приближения к земле футляр становится более плотным из-за большего количества пыли и обломков в нижней части торнадо. По обе стороны от места контакта воронки и окутывающего ее футляра можно наблюдать описанный выше каскад. Он не такой плотный и ровный как футляр и стенки воронки, но он несколько шире, чем большая часть «хобота».



Рисунок 9 – Составные части торнадо

Так как торнадо опускается из материнского облака и имеет определенную связь с ним, то для лучшего понимания процессов, происходящих во время жизни этого опасного вихря, необходимо рассмотреть строение материнского облака и воздушные потоки в нем.[6, 233-235]

Это облако состоит из следующих элементов:

1. Облако-воротник (так же иногда называют его верхней ступенью): находится в основании. Ширина этой части облака 3-4 км, а толщина составляет около 300 м и находится на высоте 1,5 км.

2. Облако-стена: находится под облаком-воротником. Толщина этого облака 300-450 м, ширина 1,5-2 км, а нижняя граница располагается на высоте 500-600 м. Именно от нижней границы этой части облака и опускается смерчевая воронка.

С крупными индивидуальными кучево-дождевыми облаками чаще всего связано 1-2 короткоживущих смерча. Иногда интенсивность мезоциклона пульсирует, что приводит к образованию одного торнадо за другим. Особенно часто это происходит в крупных суперячейковых облаках, которые могут

порождать целые семейства торнадо разной интенсивности. В отдельных случаях на периферии основного смерча образуются несколько вихрей более мелких размеров, каждый из которых вращается вокруг своей оси, а все вместе – вокруг оси основного смерча. Самый сильный ветер и наибольшее падение давления происходят вблизи оснований вторичных вихрей. Если стадия зрелости материнского облака длительна, то велика и продолжительность существования смерчей. В этих случаях торнадо с порождающим его облаком иногда перемещаются на десятки и даже сотни километров.

Смерчи образуются в зонах активной конвергенции в углубляющихся циклонах, на обостряющихся холодных фронтах, впереди них и под обширными тропосферными депрессиями. Торнадо может возникнуть при поступлении тёплого воздуха, насыщенного водяным паром, когда происходит соприкосновение тёплого влажного с холодным сухим «куполом», который образуется над холодными участками поверхности земли или моря. Узкие зоны хорошо выраженной конвергенции (сходимости) ветра в пограничном слое атмосферы и значительная продольная завихренность в сильно неустойчивом воздухе свидетельствуют о возможности возникновения торнадо.

Известны три типа вертикальной структуры воздушных масс, которые благоприятствуют образованию торнадо.[6, 236-238]

1. Тип I. Теплая воздушная масса, состоящая из трех слоев в нижней части тропосферы (до 400 гПа). Толщина слоев может быть любой при условии, что средний слой будет самым тонким. Нижний слой – влажный ($f \geq 65\%$, $T_d \geq 13^\circ\text{C}$), условно неустойчивый. Средний слой – сухой ($f < 50\%$), устойчивый. Верхний слой – условно неустойчивый. В верхнем слое относительная влажность сначала увеличивается медленно, а затем отмечается ее резкий рост.

Ветер усиливается с высотой, причем непосредственно над нижним слоем наблюдается сильное узкое течение со скоростью около 15 м/с, который направлен перпендикулярно потоку в нижнем слое.

Для воздушной массы данного типа соответствуют следующие условия погоды, характерные перед образованием торнадо. Утром небо покрыто

слоистыми облаками, затем на короткий промежуток времени небо проясняется, после чего появляются облака типа Asammatus. За 1-4 часа до появления смерча резко повышается температура точки росы (как бы «парит» в воздухе). В течение нескольких часов перед началом грозы, с которой может быть связан опасный атмосферный вихрь, давление медленно падает (не более 3 гПа/3 часа), а за несколько минут до начала явления (гроза, шквал, смерч), падение давления прекращается (может отмечаться даже некоторый рост), а с началом наблюдается резкое падение. Затем атмосферное давление быстро увеличивается и после прохождения конвективной ячейки возвращается к исходному.

2. Тип II. Теплая, влажная, неустойчивая воздушная масса без инверсий и задерживающих слоев. Обычно соответствует морскому тропическому воздуху. За несколько часов до появления торнадо температура воздуха у поверхности земли $T \geq 27^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность до высоты 7 км $f \geq 65\%$.

Ветер с высотой обычно меняется мало, но для формирования смерча необходим значительный вертикальный сдвиг ветра хотя бы в тонком слое. Процессам образования смерча в воздушных массах этого типа сопутствуют такие же погодные условия, как и в воздушных массах I типа.

3. Тип III. Относительно холодная ($T \approx 20^{\circ}\text{C}$ у поверхности земли), неустойчивая и влажная ($f \geq 70\%$ до высоты 7 км) воздушная масса. Скорость ветра увеличивается с высотой и быстро меняется направление. Вертикальный сдвиг в слое 500-800 гПа составляет порядка $5 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$.

Торнадо, которые возникают в такой воздушной массе, сопровождаются следующими погодными условиями. Утром небо ясное, но через некоторое время появляются перисто-кучевые облака, а еще через несколько часов – отдельные высококучевые облака. Еще через некоторое время практически внезапно развиваются (т.к. период развития составляет десятки минут) кучево-дождевые облака и может образовываться смерч.

В любой из рассмотренных воздушных масс возможно образование торнадо, однако он формируется не всегда. Чаще всего смерч следует ожидать,

если мезомасштабная зона значительной конвергенции совпадает с ячейкой конвергенции или присутствует пересечение линий неустойчивости. Так же необходимо наличие сдвига ветра, который может привести к образованию горизонтального вихря в нижних слоях атмосферы.

На рисунке 10 представлена схема процесса образования вертикального вихря, который приводит к образованию торнадо. Под цифрой один обозначена начальная фаза, в которой происходит сдвиг ветра. Следующим шагом, обозначенным на схеме номером 2, является образование горизонтального вихря, который появился из-за сдвига ветра в шаге 1. И на 3 шаге можно увидеть вертикальный вихрь, образованный из-за нисходящих потоков, который вращается все быстрее.

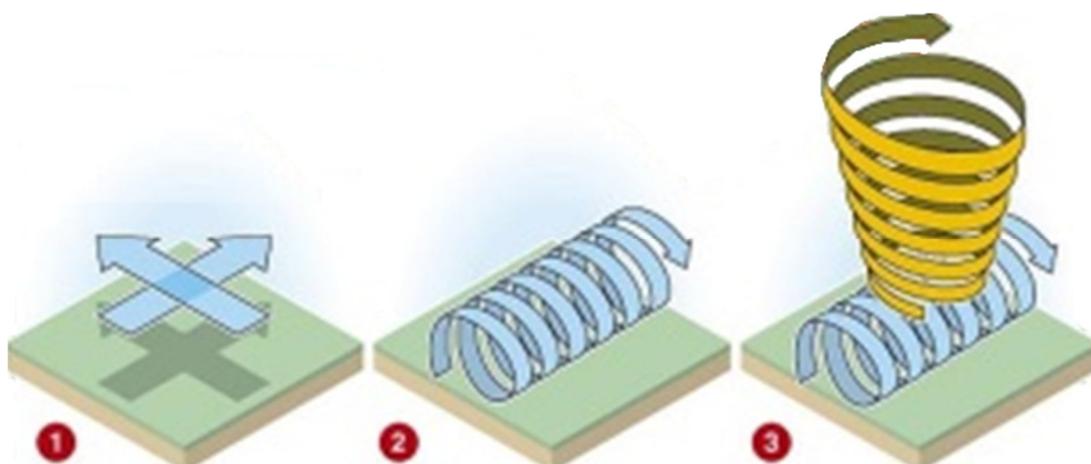


Рисунок 10 – Схема образования вертикального вихря

В своем развитии каждый смерч проходит три стадии, которые и приведены на рисунке 11.

1 этап: подготовительная фаза. В средней тропосфере (на высоте 3-6 км) внутри суперячейкового облака образуется мезоциклон с диаметром 10-20 км. Образовавшийся мезоциклон и способен сгенерировать торнадо, что происходит не всегда, т.к. зависит от многих условий описанных выше. Мезоциклон, который способен образовать смерч, называют торнадо-циклоном.

Выше пограничного слоя вращающийся воздух находится в циклострофическом балансе, т.е. нетрадиального движения к оси вращения. Из-за этого поднимающийся теплый влажный воздух приходит снизу. По мере поднятия он охлаждается, а влага, которая содержится в нем, конденсируется, что и приводит к ливневым осадкам перед появлением воронки. На месте поднятого воздуха образуется зона разряжения, в которую втягивается близлежащий воздух. Это приводит к лавинообразному развитию процесса образования смерча и выделению большого количества энергии.

Постепенно диаметр торнадо-циклона уменьшается до нескольких километров, скорость вращения возрастает, что приводит к увеличению вертикальных размеров мезоциклона и его вершина достигает нижней границы пограничного слоя, при этом скорость ветра возрастает до 30-40 м/с.

2 этап: формирование смерча и вихрь максимальной мощности. Внутри мезоциклона образуется ядро, в котором скорость вращения максимальна. Вращение воздуха и его вертикальные скорости в ядре еще больше увеличиваются. Затем из материнского облака спускается вниз воронкообразный выступ. Вследствие большого перепада давления между ядром и окружающей атмосферой воздух из приземного слоя затягивается внутрь смерча и далее поднимается по спирали. Из-за этого от подстилающей поверхности поднимается вторая воронка, состоящая из мелких частиц грунта (над сушей) или капель воды (над морем). Постепенно эти воронки сближаются и, соединяясь, они и образуют торнадо. На рисунке 11 второй этап расположен в первых двух секциях. В первой секции можно увидеть еще слабую воронку, которая только опускается от материнского облака, а во второй секции мы уже видим мощный смерч и воздушные потоки, которые его окружают.

3 этап: разрушение смерча. Из-за большого трения в слое у основания смерча скорости втекания ограничиваются, что и приводит к постепенному заполнению имеющейся области пониженного давления. При исчерпании объемов холодного или теплого влажного воздуха, мощность торнадо ослабевает, воронка сужается и отрывается от поверхности земли, постепенно

обратно поднимаясь в материнское облако.[7]Но торнадо может разрушиться в любой момент при изменении окружающих условий, которые не соответствуют условиям усиления мощности вихря. В некоторых, хотя и очень редких случаях смерч может существовать более часа. На рисунке 11 этап разрушения смерча представлен в последней секции. На данном рисунке можно увидеть, что суперячейковое облако уже не такое мощное, ослабели воздушные потоки, которые и питали торнадо, а сам вихрь уже оторвался от земли и поднимается в материнское облако.



Рисунок 11 – Жизненный цикл торнадо

Смерч не обязательно все время «привязан» к земле. Временами основание этого вихря может подниматься над нею и снова спускаться, так что он как бы перескакивает через некоторые участки. А так жеторнадо перемещается вместе с порождающим его облаком.

Вертикальные движения способствуют энергообмену суперячейки с подоблачным слоем, что приводит к концентрации в торнадо больших запасов кинетической энергии. Вся область смерча характеризуется чрезвычайно сильными ветрами, причем по мере приближения к его оси, для сохранения момента количества движения, которым воздух обладал во внешней части вихря, скорость ветра увеличивается.

2.2 Система классификации торнадо.

Теодор Фудзита – выдающийся японско-американский исследователь сильных штормов. Его исследования в Чикагском университете, посвященные сильным грозам, торнадо, ураганам и тайфунам, произвели революцию в науке. Он признан первооткрывателем шквалов и микрошквалов. Теодор Фудзита сыграл важную роль в продвижении современного понимания многих опасных погодных явлений и того, как они влияют на людей и сообщества, но самым значимым был его вклад в изучение торнадо.

В статье «Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales» [8] от 1981 года Теодор Фудзита провел исследование исторических планетарных масштабов и на его основе разработал собственную систему масштабов.

Объединив последовательность макро-, мезо- и микромасштабов с последовательностью пяти гласных в алфавитном порядке, Фудзита предложил последовательность из пяти градаций. Новая шкала основана на измерениях планеты Земля, поэтому максимальная длина шкалы – это длина экватора, округленная до 40000 км. А далее все градации делятся на: 40000 км (масомасштаб), 400 км (мезомасштаб), 4 км (мисомасштаб), 40 м (мосомасштаб) и 40 см (мусомасштаб). Приращение горизонтальных размеров составляет два порядка масштаба.

Но небольшим недостатком является то, что не были разработаны в этой последовательности шкал разделительные линии, которые равны $10^{1,5}$, $100 \cdot 10^{1,5}$ и т.д.

На рисунке 12 представлены масштабы, которые разработал и представил Фудзита в своей работе. Так же на этом рисунке отмечены на соответствующих масштабах явления, которые соответствуют системам высокого, низкого давления и расположенные на фронтах.

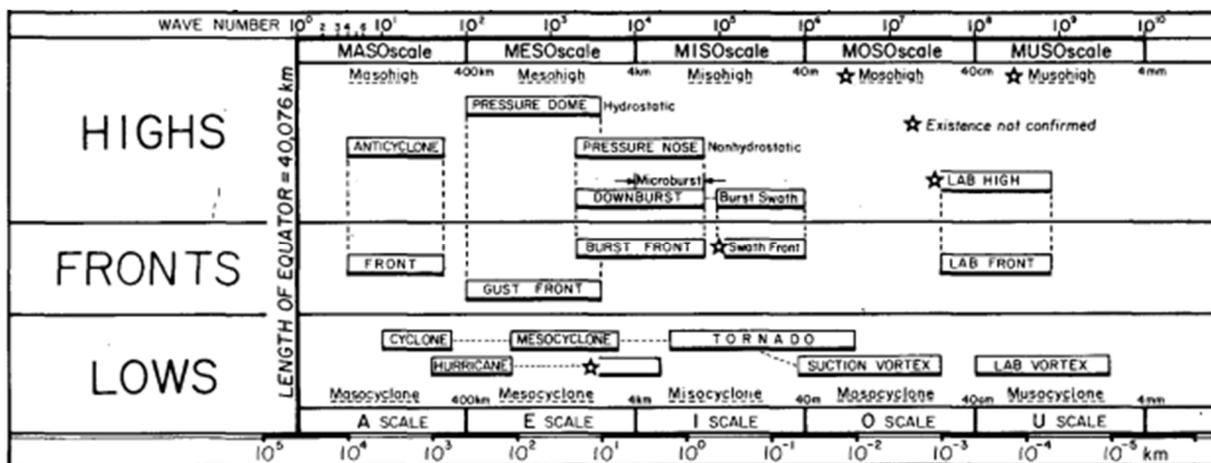


Рисунок 12 – Шкала, разработанная Т. Фудзито

Торнадо относится к атмосферным вихрям месо- и мосо- масштабов, т.е. им соответствует размер 30 см - 3км, а мезоциклон, который способствует образованию торнадо, имеет размеры 5-300 км, что соответствует мезомасштабу.

Так же в своей работе [8]Фудзита представил F-шкалу, которая дифференцирует интенсивность торнадо и связывает повреждения от торнадо со скоростью ветра. Но так как системы классификации торнадо опираются на шкалу Бофорта, то необходимо для начала ознакомиться с ней.

Шкала Бофорта — это двенадцатибалльная шкала, принятая Всемирной метеорологической организацией (ВМО) для примерной оценки скорости ветра по его воздействию на наземные предметы или по волнению в открытом море. Средняя скорость ветра указывается на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью земли.

Шкала была разработана английским адмираломФрэнсисом Бофортом в 1806 г., а в 1874 г. принята для использования в международной синоптической практике. Изначально в ней не указывалась скорость ветра, она была добавлена только в 1926 г. В 1955 г. Бюро погоды США расширило шкалу до 17 баллов, чтобы различать ураганные ветра разной силы. На рисунке 13 приведена шкала Бофорта.[9]

ШКАЛА БОФОРТА

Название ветрового режима	Скорость ветра, км/ч	Баллы	Признаки
Затишье	0—1,6	0	Дым идет прямо
Легкий ветерок	3,2—4,8	1	Дым изгибается
Легкий бриз	6,4—11,3	2	Листья шевелятся
Слабый бриз	12,9—19,3	3	Листья двигаются
Умеренный бриз	20,9—28,9	4	Листья и пыль летят
Свежий бриз	30,6—38,6	5	Тонкие деревья качаются
Сильный бриз	40,2—49,9	6	Толстые деревья качаются
Сильный ветер	51,5—61,1	7	Стволы деревьев изгибаются
Буря	62,8—74,0	8	Ветви ломаются
Сильная буря	75,5—86,9	9	Черепица и трубы срываются
Полная буря	88,5—101,4	10	Деревья вырываются с корнем
Шторм	103,0—120,7	11	Везде повреждения
Ураган	Более 120,7	12	Большие разрушения

Рисунок 13 – Шкала Бофорта

В шкале Футзиты скорость ветра связана со скоростями ветра в шкале Бофорта по формуле (1):

$$V_F = 6,30 \cdot (F + 2)^{1,5} \quad (1)$$

где: V_F – скорость ветра в м/с,

F – категория в F-шкале.

Шкала состоит из 6 градаций: от F0 до F5. При этом интервал между F0 и F1 соответствует 11-му и 12-му баллам по шкале Бофорта. Категории торнадо F6 были введены в качестве теоретических, и вне зависимости от скорости

ветра в торнадо, даже если она превышает 512 км/ч, максимальная присваиваемая категория в любом случае будет F5. Теоретическая скорость смерча шкалы F6 равна скорости звука. Все категории торнадо с соответствующими диапазонами скоростей ветра и характеристиками ущерба показаны на рисунке 14.

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 100м 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 14 – Шкала Фудзиты (F-шкала)

Так же в своей работе Теодор Фудзита исследовал частоту появления торнадо каждой категории. [8, 1516-1519 с.] На рисунке 15 представлены результаты этого исследования. В верхней части рисунка размещается таблица, в которой для периода с 1916 по 1979 г. и за 1979 г. отдельно взяты все случаи наблюдения торнадо и соотнесены с соответствующими категориями. И для большей наглядности после данной таблицы составлен график появления торнадо каждой категории за 1979г. Можно сделать вывод, что наиболее часто встречаются смерчи категории F0, F1 и F2. Реже — более высоких категорий.

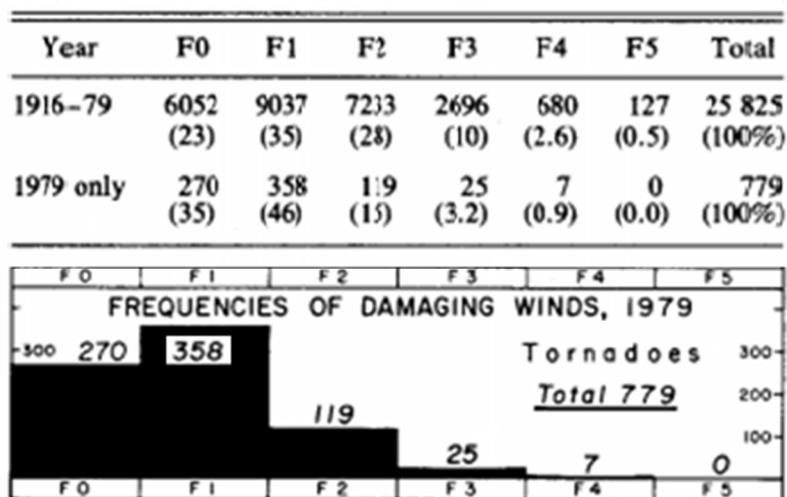


Рисунок 15 – Количественное распределение торнадо каждой категории

В качестве уточнения в 2007 году была создана улучшенная шкала Фудзиты (EF-шкала), которой пользуются в настоящее время в США и Канаде. [11]Необходимость обновления F-шкалы возникла из-за технического прогресса, увеличения прочности зданий, изменения веса машин и прочих факторов. Были уточнены значения скоростей ветра, описание практически не подверглось изменениям. В таблице 1, расположенной ниже, представлены категории торнадо в EF-шкале и соответствующие им значения скоростей ветра в м/с и км/ч. Описание отсутствует, т.к. теоритическое описание разрушений торнадо в шкале Фудзиты идентично описанию в улучшенной шкале Фудзиты соответствующих категорий торнадо.

Таблица 1

Улучшенная шкала Фудзиты (EF-шкала)

Категория	EF0	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5
Скорость ветра, м/с	29-37	38-49	50-61	62-74	75-89	>90
Скорость ветра, км/ч	105-137	138-177	178-217	218-266	267-322	>322

В Великобритании и Европе также применяется другая шкала для оценки интенсивности смерчей – шкала TORRO, которая строится на значениях скоростей ветра, а не на масштабах разрушения. Она была создана в Великобритании в 1975 г. (тестирование проводилось с 1972 по 1975 г). В ней выделяют 12 категорий (от T0 до T11), где скорость ветра в смерче T0 соответствует 8 баллам по шкале Бофорта.[11] Связана со шкалой Бофорта следующими формулами (2) и (3):

$$T = (B/2-4) \quad (2)$$

$$V_T = 2,36 \cdot (T+4)^{1,5} \quad (3)$$

где: T – категория смерча,

B – баллы скоростей ветра в шкале Бофорта,

V_T – скорость ветра в м/с.

В таблице 2 представлено соответствие категорий скоростей ветра в шкале TORRO (T-шкала в таблице) и шкале Бофорта (B-шкала).

Таблица 2

Соответствие шкал TORRO и Бофорта

T-шкала	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B-шкала	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30

Большинство британских торнадо имеют категорию T6 или ниже, а самый сильный из известных британских торнадо оценивается как T8 (Лондонский торнадо 1091 года). Для сравнения, наиболее сильным обнаруженным ветром в торнадо США (во время вспышки торнадо в Оклахоме в 1999 году) относится к категории T11. На рисунке 16 приведена шкала TORRO с соответствующими скоростями ветра.

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 16 – Шкала TORRO

Иногда на практике указывают на силу торнадо комбинацией шкалы Фудзиты и шкалы TORRO. Например, торнадо силой F3/T7 это - вихрь, вызывает разрушения, которые квалифицируются как F3, но оценочная скорость ветра соответствует верхней части диапазона и близка к степени F4.

2.3 Индексы для прогноза торнадо

Торнадо является локальным явлением, для формирования которого необходим целый ряд условий, что и делает его прогноз столь сложным. Но наука не стоит на месте, а значит, появляются средства для прогнозирования столь опасного явления, одними из которых являются различные индексы. [12] Рассмотрим некоторые из них.

1. Convective Available Potential Energy (CAPE) (Доступная конвективная потенциальная энергия) – это количество энергии плавучести, которая доступна для ускорения частицы воздуха по вертикали или количество работы, которую

совершает частица воздуха при подъёме. Данный индекс используется для прогнозирования грозовой деятельности и конвективных явлений.

CAPE можно рассчитать по формуле (4):

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g \cdot \left(\frac{T_{v_{\text{частица}}} - T_{v_{\text{окр.возд.}}}}{T_{v_{\text{окр.возд.}}}} \right) dz \quad (4)$$

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

z_f – высота свободной конвекции,

z_n – высота уровня выравнивания температур (нейтральная плавучесть),

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

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

Этот индекс можно так же определить по аэрологической диаграмме. Положительная область между линией влажной адиабаты и кривой состояния воздуха от уровня свободной конвекции до уровня выравнивания температуры и есть доступная конвективная потенциальная энергия CAPE. В таблице 3 приведены значения индекса CAPE и соответствующие погодные условия.

Таблица 3

Значения индекса CAPE

Значение, Дж/кг	Состояние атмосферы и явления погоды
CAPE < 0	устойчивое состояние, грозы невозможны
0 < CAPE < 1000	слабая неустойчивость, возможны грозы
1000 < CAPE < 2500	умеренная неустойчивость, сильные грозы и ливни
2500 < CAPE < 3500	сильная неустойчивость, очень сильные грозы, шквалы
CAPE > 3500	взрывная конвекция, образуются суперячейки, торнадо

2. Normalized CAPE (NCAPE) (Нормализованная CAPE) – это усовершенствованный индекс CAPE. Обычный CAPE не всегда является

хорошим показателем плавучести, поэтому ввели некоторое дополнение, которое можно определить по формуле (5):

$$NCAPE = \frac{CAPE}{FCL} \quad (5)$$

где: FCL – мощность слоя свободной конвекции (FreeConvectiveLayer).

Для получения полной картины состояния атмосферы нужно учитывать оба индекса.

3. K Index(Ki) – характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз. [13] Расчет Ki основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, он также учитывает вертикальную протяженность влажного слоя воздуха. Ki рассчитывается по формуле (6):

$$Ki = T850 - T500 + Td850 - DD700 \quad (6)$$

где: T850 – температура воздуха на уровне 850 гПа,

T500 – температура воздуха на уровне 500 гПа,

Td850 – точка росы на уровне 850 гПа,

DD700 – дефицит точки росы на уровне 700 гПа.

Чем выше значение данного индекса, тем больше вероятность сильной грозы и ливня. Т.к. Ki включает в себя дефицит точки росы на уровне 700 гПа, где воздух относительно сухой, который может вызывать низкие значения индекса. Однако ниже этого уровня влажность может быть выше и поэтому всё же существует вероятность грозы и ливня. Данный индекс лучше всего использовать в летний период для прогнозирования внутримассовых гроз. Пороговые значения в таблице могут изменяться в зависимости от сезона, географии и синоптической ситуации. Значения индекса соответствуют следующим погодным условиям, приведенным в таблице 4.

Значения индекса K_i

Значение	Состояние атмосферы и явления погоды
$K_i < 20$	гроза не возможна
$K_i = 20-25$	отдельные изолированные грозы
$K_i = 25-30$	несколько гроз
$K_i = 30-35$	рассеянные грозы
$K_i = 35-40$	многочисленные грозы
$K_i > 40$	Грозы повсеместно

4. LiftedIndex (Индекс плавучести) (L_i) – это еще один показатель неустойчивости. Этот индекс рассчитывается по формуле (7):

$$L_i = T_{500_{\text{окр.ср.}}} - T_{500_{\text{част.}}} \quad (7)$$

где: $T_{500_{\text{окр.ср.}}}$ - значение температуры воздушного слоя на уровне 500 гПа,
 $T_{500_{\text{част.}}}$ - значение температуры воздушной массы, поднятой в результате конвекции до уровня 500 гПа и вторгшейся в этот воздушный слой.

При отсутствии конвекции слой воздуха на уровне 500 гПа однороден, и никаких атмосферных мини-катаклизмов не возникает. Но если конвекция очень бурная и поднимающиеся воздушные массы просто не успевают охладиться сильнее, чем окружающий их воздух, то тогда возникают сильно отрицательные (ниже -3) значения L_i , что служит "пищей" для сильных гроз. Отрицательные значения указывают на неустойчивость в атмосфере, на наличие сильных восходящих потоков, являющихся причиной сильных осадковигроз. В таблице 5 приведены значения индекса L_i и соответствующие им явления погоды, состояние атмосферы и вероятность грозы.

Значения индекса L_i

Значение	Вероятность грозы	Состояние атмосферы и явления погоды
$L_i \geq 4$	0%	абсолютная устойчивость
$L_i = 2-3$	0 – 19%	возможны изолированные Cusong.
$L_i = 1-2$	19 – 32%	слабая конвекция, наблюдаются Cusong.
$L_i = 0-1$	32 – 45%	возможны слабые ливни, наблюдаются отдельные Cб
$L_i = 0-(-1)$	45 – 58%	возможны слабые грозы
$L_i = -1-(-2)$	58 – 71%	слабые грозы почти повсеместно, возможны шквалы
$L_i = -2-(-3)$	71 – 84%	грозы умеренной силы
$L_i = -3-(-4)$	84 – 100%	ожидаются сильные грозы, шквалы, возможен град
$L_i = -4-(-5)$	100%	сильные грозы повсеместно, град, шквалы, глубокая конвекция
$L_i = -5-(-6)$	100%	очень сильные грозы, наблюдается формирование суперъячеек, крупный град, возможны смерчи
$L_i < -6$	100%	«взрывная» конвекция, торнадо, разрушительные шквалы, наводнения, степень угрозы крайне высока

5. SWEAT — комплексный критерий для диагноза и прогноза опасных и стихийных явлений погоды, связанных с конвективной облачностью, разработанный в ВВС США. SWEAT включает в себя влажность нижнего уровня тропосферы, степень неустойчивости, скорость ветра в нижней и средней тропосфере и адвекцию тёплого воздуха. Данный индекс является попыткой совместить кинематические и термодинамические характеристики атмосферы. Рассчитывается по следующей формуле (8):

$$\text{SWEAT} = 12 \cdot Td_{850} + 20 \cdot (TT - 49) + 3,888 \cdot F_{850} + 1,944 \cdot F_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0,2]) \quad (8)$$

где: Td_{850} - температура точки росы на 850 гПа,

TT - TotalTotals индекс,

F850 - скорость ветра на 850 гПа,

F500 - скорость ветра на 500 гПа,

D500 и D850 - направление ветра на 500 гПа и 850 гПа.

Последнее слагаемое в формуле будет равно нулю, если не выполняется любое из следующих условий:

1. D850 в диапазоне от 130 до 250 градусов,
2. D500 в диапазоне от 210 до 310 градусов,
3. Разность в направлении ветра (D500 - D850) положительна,
4. F850 и F500 скорости ветра ≥ 7 м/с.

Значения индекса SWEAT соответствуют следующим погодным условиям, приведенным в таблице 6.

Таблица 6

Значения индекса SWEAT

Значение	Состояние атмосферы и явления погоды
SWEAT < 250	нет условий для возникновения сильных гроз
SWEAT=250-350	есть условия для возникновения сильных гроз, града и шквалов
SWEAT=350-500	есть условия для развития очень сильных гроз, шквалов, крупного града, торнадо
SWEAT \geq 500	есть условия для развития очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, сильных смерчей

6. VerticalTotals (VT) – это статическая устойчивость или вертикальный градиент температуры в слое 850-500 гПа. Утвержден Миллером в 1972 г. Рассчитывается по формуле (11):

$$VT=T850-T500 \quad (9)$$

где: T850 – температура воздуха на уровне 850 гПа,

T500 – температура воздуха на уровне 500 гПа.

Если значения $VT \geq 28$, то атмосфера обладает высокой конвективной неустойчивостью, которая приводит к образованию гроз.

7. CrossTotals (СТ) – содержит точку росы на высоте 850 гПа. Был утвержден Миллером в 1972 г. Рассчитывается по следующей формуле (10):

$$СТ = Td850 - T500 \quad (10)$$

где: $Td850$ – температура точки росы на уровне 850 гПа,

$T500$ – температура воздуха на уровне 500 гПа.

Значения индекса СТ соответствуют следующим погодным условиям, приведенным в таблице 7.

Таблица 7

Значения индекса СТ

Значение	Состояние атмосферы и явления погоды
$СТ < 18$	грозы невозможны
$СТ = 18-19$	умеренная неустойчивость, возможны отдельные грозы
$СТ = 20-25$	высокая неустойчивость, неупорядоченные грозовые облака
$СТ = 26-29$	очень высокая неустойчивость, сильные грозы
$СТ \geq 30$	сильные и многочисленные грозы

8. TotalTotalsIndex (ТТ) (Итоговый индекс) – этот индекс вмещает в себя два показателя: VerticalTotals (VT) и CrossTotals (СТ). Так же был утвержден Миллером в 1972 г. Рассчитывается по формуле (11):

$$ТТ = VT + СТ = T850 + Td850 - 2 \cdot T500 \quad (11)$$

где: VT – индекс Vertical Totals,

СТ – индекс CrossTotals,

$T850$ – температура воздуха на уровне 850 гПа,

$Td850$ – температура точки росы на уровне 850 гПа,

T500 – температура воздуха на уровне 500 гПа.

Значения индекса TT соответствуют следующим погодным условиям, приведенным в таблице 8.

Таблица 8

Значения индекса TT

Значение	Состояние атмосферы и явления погоды
TT < 44	грозы не возможны
TT=44-45	отдельная гроза или несколько гроз
TT=46-47	грозовые очаги рассеяны
TT=48-49	значительное количество гроз, некоторые сильные
TT=50-51	сильные грозовые очаги, отдельные очаги с торнадо
TT=52-55	значительное количество сильных гроз, отдельные очаги торнадо
TT>55	многочисленные сильные грозы с сильными торнадо

В первой главе мы подробно рассмотрели жизненный цикл торнадоопасныхоблаков. Выяснили, что формирование смерча происходит в три этапа. Сначала из материнского облака опускается воронка, затем ей навстречу от земли поднимается еще одна. После их соединения торнадо набирает силу, а через определенное время, зависящее от параметров ячейки и самого вихря, смерч ослабевает и рассеивается.

Во второй главе мы изучили различные системы классификации торнадо, а так же ознакомились с работой Т. Фудзиты, которая и положила начало классификациям и измерениям мощности торнадо.

В третьей главе представлены индексы, используемые для прогноза неустойчивости атмосферы, которая может привести к образованию смерчей. Задачей нашего дальнейшего исследования является на примере реальных случаев возникновения торнадо различных мощностей и в нескольких регионах Земли провести анализ индексов неустойчивости, представленных в третьей главе.

3 Оценка эффективности различных индексов активности конвективных процессов

В рамках данной работы рассмотрим два случая возникновения торнадо разных видов, мощности, продолжительности и произошедших в разных регионах Земли.[14]

3.1 Джоплин, штат Миссури, США, 22 мая 2011 г.

Последовательность вспышек торнадо с 21 по 26 мая 2011 года была одной из крупнейших вспышек торнадо в истории, которая затронула средние западные и южные регионы США. Большинство торнадо развивалось в районе Арканзаса, Канзаса, Миннесоты и Оклахомы. Особенно разрушительный вихрь уничтожил треть города Джоплин, штат Миссури. В результате погибли 158 человек и более 1000 получили ранения. Этот случай торнадо является самым смертоносным в США после случая 9 апреля 1947 года, когда интенсивный торнадо убил 181 человека в городе Вудворд, штат Оклахома. По общим итогам вспышка торнадо 21-26 мая привела к 184 смертям.

Хотя апрель 2011г. был самым активным месяцем для торнадо, увенчанный очень большой вспышкой торнадо, который убил 324 человек, первые три недели мая прошли очень спокойно, наблюдались исключительно единичные смерчи. Однако эта картина резко изменилась, когда сильная зона низкого давления, связанная с сухой линией и холодным фронтом, пошла на восток.

21 мая в округе Браун, штат Канзас, возникла небольшая система гроз, которая сформировала небольшой смерч. Еще одна система образовалась к юго-востоку от Эмпории, штат Канзас, которая стала причиной торнадо

категории EF3. Эти две системы развили несколько других торнадо в течение вечера.

Первые торнадоопасные суперячейки были зафиксированы в середине дня 22 мая над Миннеаполисом и Сан-Пауло и нанесли умеренный ущерб. Вскоре после этого сильный торнадо сформировался в Хармони, штат Миннесота. Во второй половине дня в городе Джоплин, штат Миссури, сильный торнадо с большим количеством воронок категории EF5 оставил катастрофические разрушения. Диаметр превышал 1,6 км.

23 мая в Теннесси и Кентукки наблюдался торнадо категории EF2, который нанес значительный ущерб. 24 мая многочисленные торнадо наблюдались в нескольких регионах, причем первая активность была зафиксирована в Западной Оклахоме во второй половине дня, где развилось несколько очень интенсивных вихрей, включая еще один торнадо категории EF5. Были зарегистрированы 11 смертей среди обширного ущерба только к юго-западу от метро ОКС. Во второй половине дня в Центральном Канзасе и вечером в Метроплексе Даллас-Форт-Уэрт возникли другие системы торнадо.

25 мая широко распространенная активность произошла по всей Центральной и восточной части США. Торнадо категории EF3 разрушил много домов в городе Бедфорд, штат Индиана, и торнадо категории EF2 причинил серьезный ущерб в Седалии, штат Миссури. Активность торнадо продолжалась вплоть до 26 мая, но большинство из них были слабыми. Всего было зафиксирован 241 случай торнадо. [15]

На рисунке 17 представлена карта штормовых явлений, зафиксированных во время вспышки торнадо 22 мая 2011 г. Можно увидеть, что наибольшее число торнадо было зафиксировано на севере страны в штате Миннесота, Иллинойс, Миссури. Высокие скорости ветра отмечались на севере и востоке страны в штате Кентукки, Теннесси, Индиана и Иллинойс.

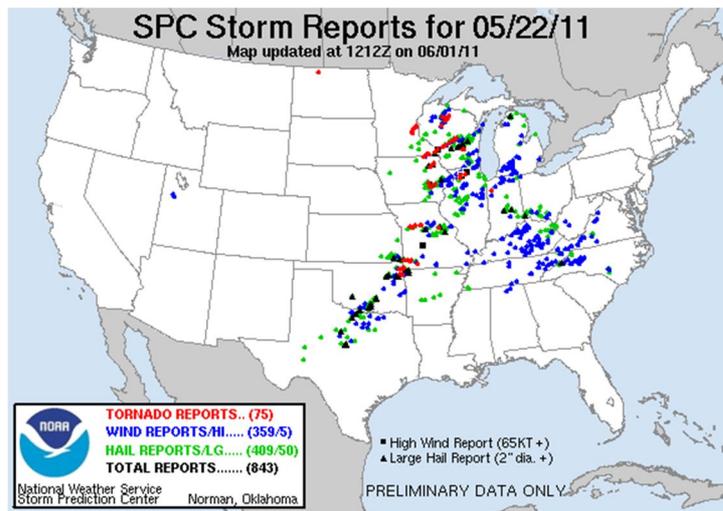


Рисунок 17 – Случаи торнадо, зафиксированные 22 мая 2011 г.

3.2 г. Севастополь и г. Туапсе, Россия, 30 июня 2018 г.

29 июня 2018 г. на севере Крымского полуострова наблюдались сильные ливни с градом, диаметр которых достигал 30 мм.

30 июня 2018 г. в районе 35-й Береговой Батареи был зафиксирован торнадо небольшой мощности (категория EF0). [16] Температура воздуха составляла около 25-27°C, незадолго до появления воронки прошел ливень. Так же на период с 28 июня по 1 июля прогнозировались грозы, ливни, усиление ветра.

Наиболее близкий пункт, проводящий радиозондирование атмосферы, находится в г. Туапсе Краснодарского края. Но так как расстояние между 2 этими пунктами порядка 450 км, то провести качественное исследование по изучению прогностических свойств индексов неустойчивости по отношению к торнадо затруднительно, то проведен дополнительное исследование работы индексов неустойчивости в г. Туапсе.

В первой половине дня 30 июня наблюдалась сплошная облачность, без осадков, температура воздуха составляла порядка 30°C. В ночь с 30 июня на 1 июля была зафиксирована гроза. [17]

3.3 Эль-Рино, штат Оклахома, США, 31 мая 2013 г.

Вспышка торнадо 26–31 мая 2013 г. была длительной и затронула большую часть Соединенных Штатов Америки. Она была результатом медленной, но мощной штормовой системы, которая произвела несколько сильных торнадо в штате Канзас и Оклахома, так же сильные торнадо нанесли серьезный ущерб в штате Небраска, Миссури, Иллинойс и Мичиган. Вспышка распространилась на восток до штата Нью-Йорк. Всего было зарегистрировано 27 смертельных случаев, девять из которых произошли в результате торнадо (восемь в Оклахоме и один в Арканзасе). Всего было зафиксировано 115 торнадо, самый значительный из которых достиг категории EF3 и ударил по районам около города Эль-Рино, штат Оклахома, 31 мая.

Это был самый большой торнадо в истории человечества. Торнадо Эль-Рино был частью более крупной метеорологической системы, которая произвела десятки смерчей за предыдущие дни.

Торнадо коснулся земли в 18:03 по местному времени (23:03 UTC) в 13,4 км от Эль-Рино. Буря быстро увеличивалась в размерах и набирала мощность. Измерения, проведенные на мобильных доплеровских радарх, выявили экстремальные ветры, превышающие скорость в 484 км/ч (134,5 м/с) в пределах торнадо. Максимального размера достиг при пересечении 81-го шоссе, 4,2 км в диаметре. Повернув на северо-восток, торнадо вскоре ослабло. Торнадо рассеялся около 18:43 по местному времени (23:43 UTC). 26,1 км. [15]

На рисунке 18 представлена карта штормовых явлений, зафиксированных во время вспышки торнадо 31 мая 2013 г. Можно увидеть, что наибольшее число торнадо было зафиксировано в штате Иллинойс, Миссури и на границе Канзаса и Оклахомы. Высокие скорости ветра отмечались в штате Индиана, Иллинойс, Оклахома. Выпадение града зафиксировано на севере страны в штатах Айова, Висконсин и Миннесота, а так же в районах появления торнадо.

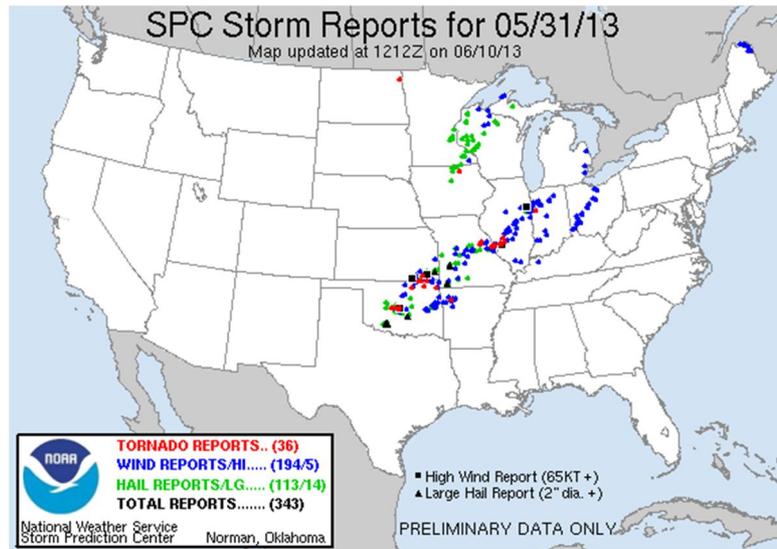


Рисунок 18 – Случаи торнадо, зафиксированные 31 мая 2013 г.

3.4 Пилджер, Небраска, США, 16 июня 2014 г.

Вспышка торнадо 16–18 июня 2014 г. сосредоточена на Великих равнинах и на Среднем Западе США. Два торнадо также были зафиксированы в Онтарио, Канада. Суровые погодные условия наиболее существенно затронули штат Небраска, где два торнадо категорией EF4 убили двух человек в городе Пилджер вечером 16 июня. Вспышка так же вызвала множество других сильных смерчей в течение следующих двух дней. Всего было зафиксировано 76 случаев торнадо.

Система, вызвавшая торнадо в Пилджере, была сформирована мощной суперячейкой, которая затронула пять округов северо-восточной Небраски. Было зафиксированы шесть торнадо, четыре из которых были оценены категории EF4.

Торнадо достиг земли к юго-западу от Пилджера. По мере приближения к городу вихрь набирал силу и достиг категории EF2. Когда смерч ударил по городу, он уже достиг категории EF4. Когда главный торнадо приближался к Пилджеру, к востоку от города возник второй, почти идентичный вихрь,

который проходил параллельно пути основного торнадо, нанося незначительный ущерб деревьям и постройке. Торнадо-близнецы продолжали двигаться на северо-восток, при этом основной торнадо был категории EF3, авторой достигал всего категории EF2. Оба торнадо увеличивались в размерах, поскольку пути повреждения смещались ближе друг к другу. Когда их пути пересеклись, оба торнадо достигли категории EF4. После этого второй смерч повернул на север, а основной торнадо продолжил движение на северо-восток с прежней силой. Со временем он повернул на восток, стал терять силу и рассеялся.[15]

На рисунке XX представлена карта-доклад штормовых явлений, зафиксированных во время вспышки торнадо 16 июня 2014 г. Можно увидеть, что наибольшее число торнадо было зафиксировано в штате Небраска, Айова и Висконсин. Высокие скорости ветра наблюдались в очаге на территории Айовы, Миннесоты и Висконсина, а так же отдельные случаи были зафиксированы на восточном побережье. Очаг выпадения града располагался над Южной Дакотой и Небраской.

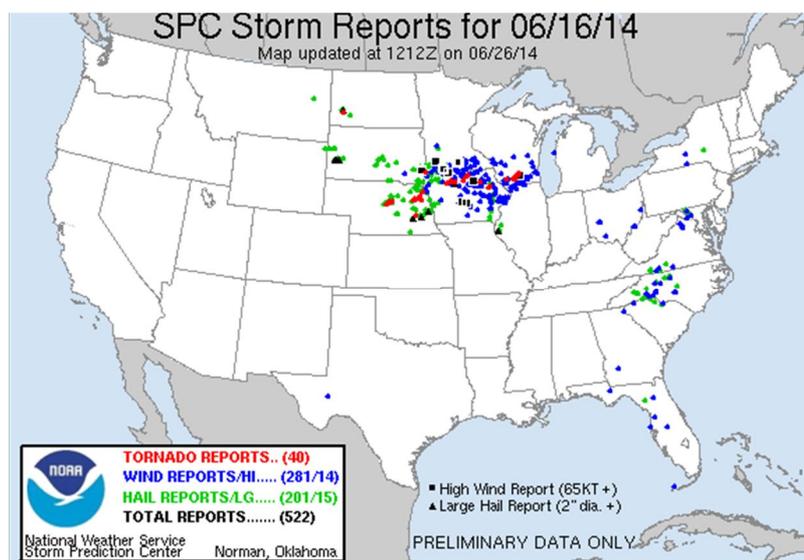


Рисунок 19 – Случаи торнадо, зафиксированные 16 июня 2014 г.

3.5 Анализ индексов неустойчивости атмосферы

Проведем расчет индексов неустойчивости атмосферы по архивным данным радиозондирования для всех рассмотренных случаев. [14] Результаты расчетов представлены в таблице 9.

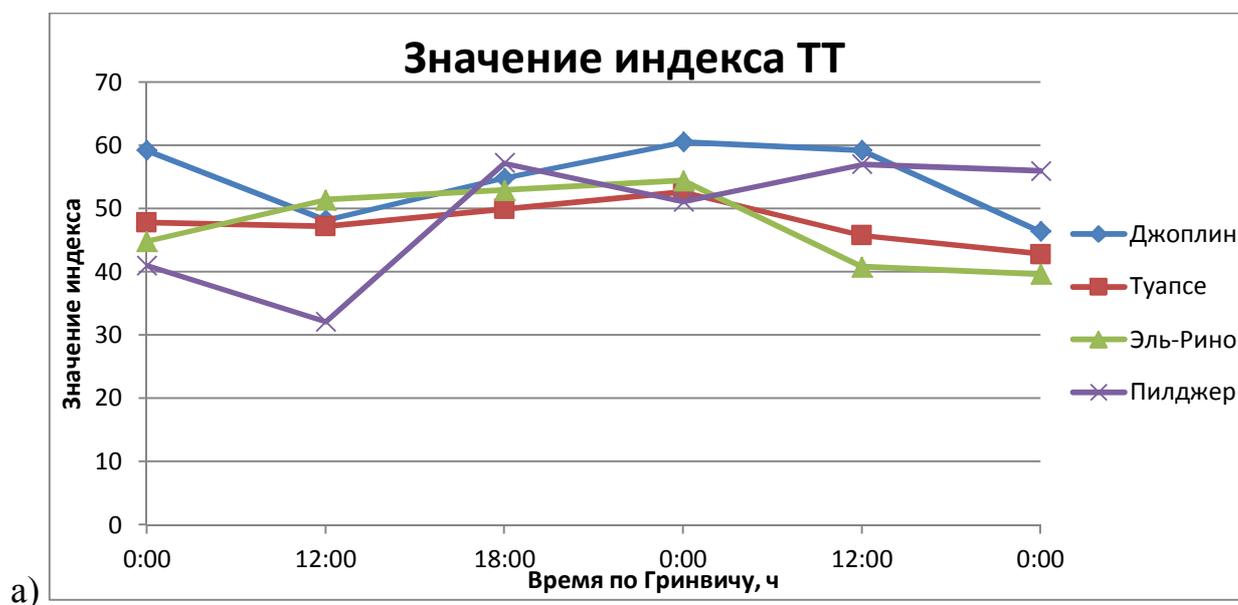
Таблица 9

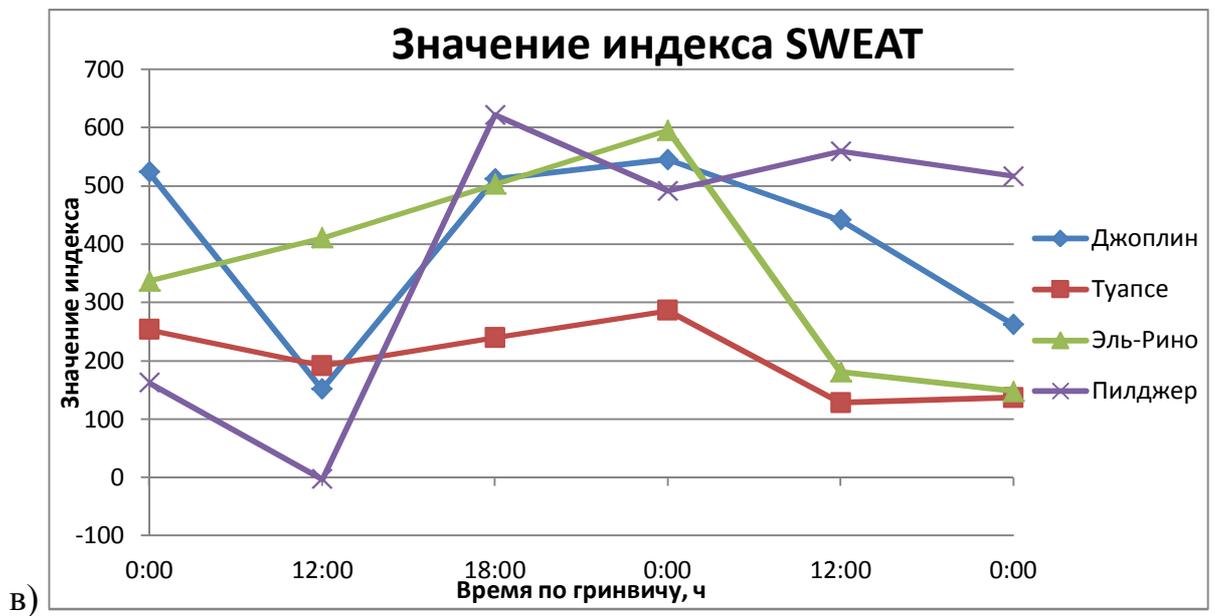
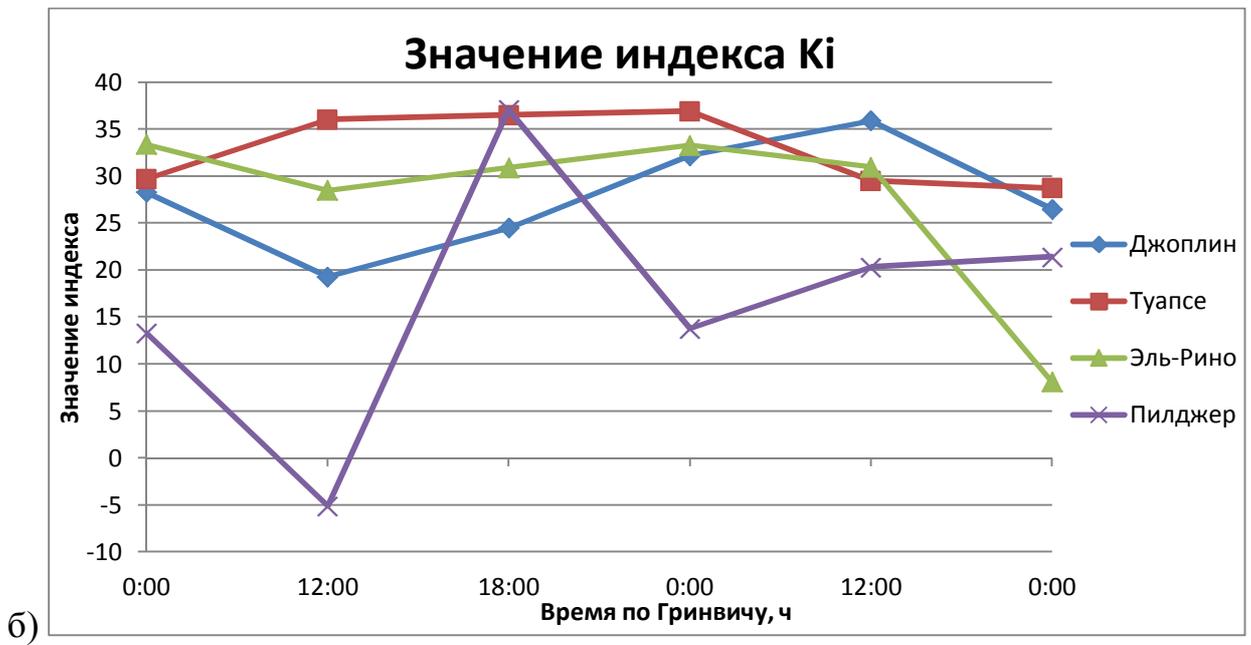
Результаты расчетов индексов неустойчивости

Индекс ТТ				
Время	Джоплин	Туапсе	Эль-Рино	Пилджер
00:00	59,2	47,8	44,8	41,0
12:00	48,2	47,2	51,4	32,1
18:00	54,8	49,9	52,9	57,2
00:00	60,5	52,6	54,4	51,1
12:00	59,2	45,8	40,8	57,0
00:00	46,4	42,8	39,6	55,9
Индекс Кі				
00:00	28,3	29,7	33,4	13,3
12:00	19,3	36,0	28,5	-5,1
18:00	24,5	36,5	30,9	37,1
00:00	32,2	36,9	33,3	13,8
12:00	35,9	29,5	30,9	20,3
00:00	26,5	28,7	8,1	21,4
Индекс SWEAT				
00:00	523,88	253,60	337,34	162,60
12:00	151,84	191,82	410,97	-3,09
18:00	511,84	240,00	503,00	622,29
00:00	545,62	286,58	595,57	491,91
12:00	441,63	128,16	181,40	559,54
00:00	262,00	136,57	147,59	516,81
Индекс Li				
00:00	-6,51	-3,98	-2,75	3,86
12:00	-6,80	-3,11	-5,29	-3,09
18:00	-6,32	-3,50	-6,50	-10,66
00:00	-11,11	-3,87	-7,69	-5,54

12:00	-4,58	-3,57	-2,09	-1,79
00:00	2,37	3,27	5,36	-8,47
Индекс CAPE				
00:00	770,36	1339,52	1099,16	0,00
12:00	2267,30	822,49	2856,93	567,19
18:00	2732,16	1164,01	2937,02	4296,32
00:00	4471,09	1506,57	3018,19	3418,71
12:00	1029,58	359,88	452,58	524,35
00:00	7,11	0,00	0,00	4225,70

Для большей наглядности построим графики изменения значений индекса по времени до, во время и после опасных явлений.





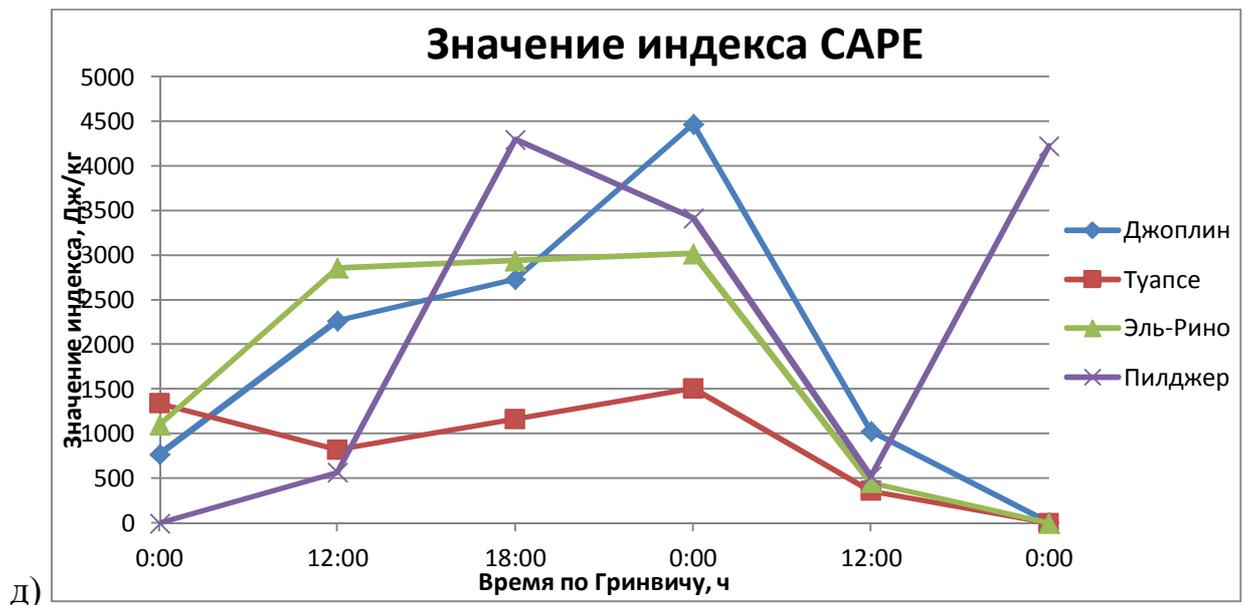
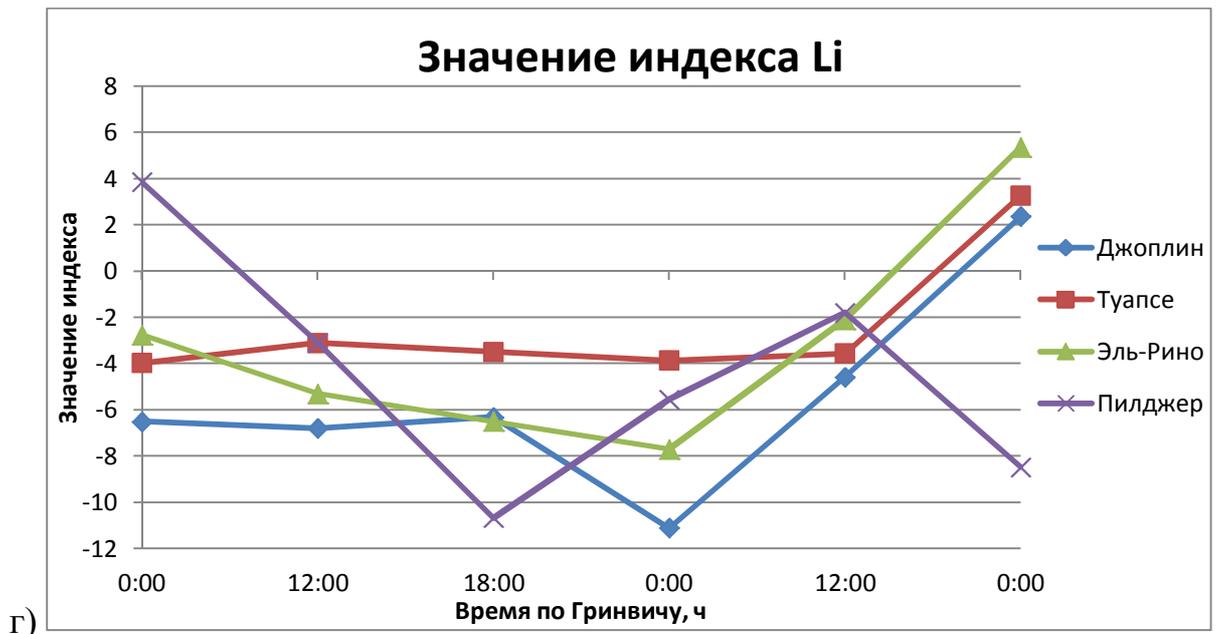


Рисунок 20 – График изменения индекса а)ТТ, б)К_i, в) SWEAT, г)Li, д)CAPE по времени

На рисунке 20 а) представлен график изменения индекса ТТ по времени. Можно заметить, что для всех случаев опасных погодных явлений значение индекса было максимальным. Но при сравнении значений, характерных для торнадо и для гроз, выясняется, что в случаях для грозы в Туапсе и сильных торнадо в Эль-Рино и Пилджере практически равны, а во время торнадо в Джоплине превышает не более чем на 10 единиц. Из этого можно сделать

вывод, что индекс ТТ указывает на неустойчивость атмосферы, приводящую к неблагоприятным погодным условиям, но использовать его для прогноза торнадоопасности нельзя.

На рисунке 20 б) представлен график изменения индекса K_i по времени. Анализируя график можно заметить, что значение индекса возрастало к моменту опасных явлений погоды, а максимальные значения зафиксированы во время наибольших мощностей торнадо и гроз. Но при сравнении значений, характерных для торнадо и для гроз, выясняется, что в случаях для грозы в Туапсе значения индекса K_i были больше, в редких случаях были равны со значениями мощных торнадо. Из этого можно сделать вывод, что индекс K_i указывает на неустойчивость атмосферы, приводящую к неблагоприятным погодным условиям, но использовать его для прогноза торнадоопасности нельзя.

На рисунке 20 в) представлен график изменения индекса SWEAT по времени. Анализируя график можно заметить, что значение индекса возрастало к моменту опасных явлений погоды, а максимальные значения зафиксированы во время наибольших мощностей торнадо и гроз. Для грозы в Туапсе характерны значения в пределах 200-300 единиц во время грозы и меньше 200 единиц при ее отсутствии. Для случаев торнадо значения превышали значения во время гроз в 3 раза (были в пределах 500-600 единиц), а во время их отсутствия приближались к значениям во время отсутствия гроз. Из этого можно сделать вывод, что индекс SWEAT указывает на неустойчивость атмосферы, приводящую к неблагоприятным погодным условиям, причем для случаев возникновения торнадо эти значения превышали значения для гроз в 3 раза, поэтому индекс SWEAT можно использовать для прогноза торнадоопасной ситуации.

На рисунке 20 г) представлен график изменения индекса L_i по времени. Анализируя график можно заметить, что значение индекса уменьшалось к моменту опасных явлений погоды, а минимальные значения зафиксированы во время наибольших мощностей торнадо и гроз. Для грозы в Туапсе характерны

значения в пределах от -2 до -4 единиц во время грозы и больше 0 при ее отсутствии. Для случаев торнадо значения были меньше значений во время гроз в 2-3 раза (были в пределах от -6 до -12 едини), а во время их отсутствия приближались к значениям во время отсутствия гроз. Из этого можно сделать вывод, что индекс L_i указывает на неустойчивость атмосферы, приводящую к неблагоприятным погодным условиям, причем для случаев возникновения торнадо эти значения были меньше значений для гроз в 2-3 раза, поэтому индекс L_i можно использовать для прогноза торнадоопасной ситуации.

На рисунке 20 д) представлен график изменения индекса $CAPE_{\text{по}}$ времени. При анализе графика можно заметить, что значение индекса возрастало к моменту опасных явлений погоды, а максимальные значения зафиксированы во время наибольших мощностей торнадо и гроз. Для грозы в Туапсе характерны значения в пределах 800-1500 Дж/кг во время грозы и меньше 500 при ее отсутствии. Для случаев торнадо значения превышали значения во время гроз в 3-4 раза (были в пределах 2500-4500 Дж/кг), а во время их отсутствия приближались к значениям во время отсутствия гроз. Из этого можно сделать вывод, что индекс $CAPE$ указывает на неустойчивость атмосферы, приводящую к неблагоприятным погодным условиям, причем для случаев возникновения торнадо эти значения превышали значения для гроз в 3-4 раза, поэтому индекс $CAPE$ можно использовать для прогноза торнадоопасной ситуации.

Заключение

Торнадо образуется под особо мощными кучево-дождевыми облаками (суперячейковыми), которые обладают значительной неоднородностью и турбулентностью. Процесс эволюции торнадоопасного облака можно представить в три этапа: зарождение и усиление, этап максимальной мощности и этап разрушения. В процессе изучения этого опасного явления погоды были созданы различные системы классификации мощности смерчей и индексы, способные его прогнозировать.

В результате проделанной работы можно представить следующие выводы:

1. Торнадо чаще всего образуется во второй половине дня, когда температура воздуха составляет 25-30°C, в сильно неустойчивой воздушной массе с большим содержанием водяного пара.

2. Вертикальные движения способствуют энергообмену суперячейки с подоблачным слоем, что приводит к концентрации в торнадо больших запасов кинетической энергии.

3. По статистическим данным наиболее часто встречаются торнадо категории F0, F1 и F2 по шкале Фудзиты и EF0, EF1 и EF2 по улучшенной шкале Фудзиты. Вихри более высоких категорий фиксируются намного реже.

4. Для прогноза торнадо был разработан целый комплекс методов прогнозирования. В данной работе мы использовали пять индексов, которые входят в комплекс прогнозирования. С помощью индексов TT, Ki, SWEAT, Lii и CAPE составили прогноз торнадоопасности для четырех случаев, в которых наблюдались торнадо и грозы в различных регионах.

После анализа полученных результатов можно сделать вывод, что все из использованных индексов показывали неустойчивость атмосферы, которая приводит к опасным явлениям погоды, но два из пяти индексов (TT и Ki) показывали результаты для гроз сравнимые со значениями для мощных

торнадо, что указывает на то, что использовать данные индексы для прогноза торнадоопасности нельзя. Три из пяти (SWEAT, Li и CAPE) показали результаты, различающиеся для гроз и торнадо в 3-4 раза. Это указывает на то, что эти индексы можно использовать для прогноза торнадо и на Североамериканском континенте, и на территории России. Все из используемых индексов показали увеличение неустойчивости атмосферы с приближением торнадо и гроз. Наиболее точно можно составить прогноз, пользуясь полным комплексом прогностических методов, имея обширную сеть метеорологических станций, покрывающих всю территорию страны и регулярные данные радиозондирования состояния атмосферы.

В дальнейшем необходимо рассмотреть влияние климатических факторов на формирование торнадоопасных облаков в различных регионах и особенностей прогнозирования опасных явлений погоды и сопровождающих их явлений погоды.

Список использованной литературы

1. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеониздат, 1965, 533-577 с.
2. Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005 – 136-140 с.
3. Тарасов Л. В. Атмосфера нашей планеты. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012 – 301-306 с.
4. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология. – М.: Колосс, 2004 – 330-335 с.
5. Зораб Р. Статья в научно-популярном журнале «Naked Science». Суперячейка, или в шаге от торнадо. <https://naked-science.ru/article/nakedscience/16-09-2013-534>
6. Богаткин О. Г. Авиационные прогнозы погоды. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010 – 233-238 с.
7. Зуев В.В., Павлов Н.Н. Смерчи: образование, строение, моделирование. – Труды дальневосточного государственного технического университета, 2006, №142, с.207-217.
8. T. Fujita. Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales. – Journal of the atmospheric sciences, 1981, vol. 38 №8 – 1511-1526 с.
9. Статья в Большой российской энциклопедии, [электронный ресурс] <https://bigenc.ru/geography/text/5228125>
10. Статья в NOAA's National Weather Service, [электронный ресурс] <https://www.spc.noaa.gov/efscale/>
11. H. Brooks, C. A. Doswell III. Some aspects of the international climatology of tornadoes by damage classification. NOAA/National Severe Storms Laboratory, [электронный ресурс] https://www.nssl.noaa.gov/users/brooks/public_html/toulclim.html
12. Convective Available Potential Energy (CAPE), [электронный ресурс] <https://poisk-ru.ru/s13961t4.html>

13. Индексы неустойчивости атмосферы, [электронный ресурс] <http://flymeteo.org/stat/indexneust.php>
14. Архив данных радиозондирования атмосферы, University of Wyoming, College of Engineering, [электронный ресурс] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
15. National Weather Service. National Oceanic and Atmospheric Administration, [электронный ресурс] https://www.weather.gov/sgf/news_events_2011may22
16. <https://riafan.ru/1072624-smerch-pronessya-nad-sevastopolem-fan-publikuet-video> [электронный ресурс]
17. Архив погоды в Туапсе, 2018 г., [электронный ресурс] <https://www.meteoservice.ru/archive/tuapse/2018>