



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Оценка индексов неустойчивости и радиолокационных данных
для идентификации и прогноза смерчеопасных ситуаций»

Исполнитель Хайбуллов Михаил Викторович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Топтунова Ольга Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«13» мая 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СМЕРЧЕЙ.....	6
1.1 Типы и основные характеристики смерчей.....	8
1.2 Обнаружение смерчей с помощью радиолокации.....	10
1.3 Особенности формирования смерчей.....	13
1.4 Методы прогноза смерчей	17
2. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ.....	25
2.1 Обоснованность выбора района исследования.....	25
2.2 Краткие физико-географические и климатические особенности ЕТР и Беларуси.....	30
3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ПРОГНОЗ СМЕРЧЕОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЕТР И БЕЛАРУСИ.....	34
3.1 Проблемы идентификации смерчей.....	34
3.2 Отбор исходных данных для оценки возможности прогноза смерчей.....	49
3.3 Систематизация и анализ исходных данных.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	72
Список использованных источников.....	74
Приложение А: архив наличия смерчей по выборке	76
Приложение Б: архив отсутствия смерчей по выборке	77

ВВЕДЕНИЕ

Смерч – сильный вихрь, образующийся под хорошо развитым кучево-дождевым облаком и распространяющийся в виде темного облачного столба или воронки по направлению к поверхности земли или моря [1]. Смерч характеризуется вертикальной или несколько изогнутой осью и диаметром в несколько десятков метров [2,3,4]. Стоит отметить, что кроме вертикального вихря (воронки), имеется и горизонтальная часть – вихревое образование, вращающееся вокруг оси и вытянутое параллельно земле [2,3,4]. Если воронка смерча хорошо наблюдается визуально, то горизонтальная часть обычно скрыта в темной массе грозового облака [2,3,4].

Движение воздуха в смерче направлено по спирали вверх и его скорость может достигать 100 – 200 м/с. Длина пути смерча обычно составляет 15 – 30 км, а время существования – от нескольких минут до получаса, скорость перемещения может достигать 40-60 км/ч, а иногда и более [1].

Прогнозирование смерчей является одной из актуальнейших и сложных задач синоптической практики. Это явление связано с развитием бурной конвективной деятельности и зачастую сопровождается комплексом других опасных явлений погоды, таких как шквалистый ветер, сильные грозы, обильные ливневые осадки, выпадение крупного града. Благоприятные условия формирования смерчей обычно наблюдаются в тёплое полугодие при значительной атмосферной неустойчивости на активных фронтальных волнах и, чаще всего, в синоптических ситуациях, связанных с выходами южных циклонов – в тёплых секторах вблизи точки окклюзии или перед прохождением холодных фронтов.

В настоящее время число случаев возникновения опасных погодных явлений, связанных с конвекцией, в частности смерчей, увеличивается, а их прогнозирование представляет определённые сложности. Дело в том, что все конвективные явления мезомасштабны, а смерчи относятся к особенно

локальным и часто микромасштабным явлениям. Диаметр смерча составляет от десятков и сотен метров до нескольких километров. Для современных прогностических гидродинамических моделей атмосферы эти процессы чаще всего приобретают подсеточный масштаб. Кроме того, большая часть территории по-прежнему не освещена метеорологическими радиолокаторами, но даже при их наличии возникают некоторые сложности, связанные с временным и пространственным разрешением смерчей. Более того, редкая сеть метеорологических станций наряду с кратковременностью этого опасного явления, а также высокой скорости перемещения воронки смерча практически неспособна его отметить, а непосредственный прогноз перемещения смерчей возможен только после их регистрации (при наиболее благоприятном раскладе перед возникновением в случае обнаружения смерчопасной ячейки на экране радиолокатора). Несмотря на сравнительно редкое возникновение смерчей на территории ЕТР и Беларуси, чем, например, в США, прогноз потенциально опасных ситуаций, не говоря уже о заблаговременном обнаружении смерчей, задача необходимая. Однако даже в США, где смерчопасные ситуации случаются гораздо чаще и данная проблема ещё более актуальна, существует достаточно много «ложных тревог», а заблаговременность оповещения перед прохождением смерча через конкретные населённые пункты по-прежнему мала. Явление отличается своей внезапностью и разрушительностью.

Всем вышеизложенным обусловлена актуальность работы, целью которой является оценить основные сложности в прогнозировании и идентификации смерчей на территории ЕТР и Беларуси и выявить предикторы для их прогноза. Для достижения поставленной цели главная задача работы состоит в формировании выборки предикторов для прогноза смерчей на данной территории в виде индексов неустойчивости и параметров состояния атмосферы в различных синоптических ситуациях с развитой конвективной деятельностью на основе разбора смерчопасных ситуаций за период пяти тёплых полугодий (с 2019 по 2023 гг. включительно), систематизировать и оценить полученные данные статистически. В работе к подробному

рассмотрению при помощи комплексной радиолокационной информации, спутниковых ресурсов, синоптических карт и материалов от команды инициативных «охотников за грозами» (англоязычный аналог – «storm chaser») будет приведён один из случаев.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СМЕРЧЕЙ

Смерчи тесно связаны с кучево-дождевыми облаками, образуются в их основании, и в случае отсутствия развития конвекции невозможны, поэтому зачастую отмечаются в комплексе с сильными грозами и явлениями их сопровождающими. Смерчи отличаются исключительной мощностью восходящих токов воздуха, которые настолько сильны, что пронизывают грозовое облако снизу до верху, и наиболее вероятны в ситуациях с благоприятными условиями для подобных мощных кучево-дождевых облаков. Воздух с огромной скоростью вращается вокруг оси вихря, одновременно поднимаясь вверх по мере выталкивания тёплого холодным в мезоциркуляции конвективной ячейки. Приближение смерча почти всегда сопровождается своеобразным гулом, который слышен за многие километры и особенно выражен в момент соприкосновения воронки смерча с поверхностью земли. Разрушительная сила смерча зависит не только от скорости его вращения, но и от величины разницы в атмосферном давлении снаружи и внутри, которая и образует воронку, которая «засасывает» в себя все, что встречается на пути и переносит порой на значительные расстояния. Сила всасывания зависит и от размеров воронки. Сильное понижение давления внутри столба вращающегося воздуха вызывает его охлаждение и приводит к конденсации водяного пара, в результате чего воронка смерча становится видимой. Различные обломки, мусор и пыль, которые вихрь «всасывает» в себя, также постепенно окрашивают смерч в соответствующие цвета по пути его следования.

Кроме смерчей, существуют подобные им визуально, и лишь отчасти по природе:

1. Пыльные вихри. Они меньших масштабов и значительно слабее смерчей, но главное, абсолютно не связаны с деятельностью кучево-дождевых облаков и достаточными условиями может быть неравномерный прогрев

участков подстилающей поверхности при формировании достаточно мощного восходящего потока от поверхности земли жарким днём или исключительно из-за особенностей рельефа и даже расположения городской застройки, обуславливающей вынужденную завихренность при наличии ветра. Высота подобного вихря обычно колеблется в пределах 10-20 м, его диаметр составляет 1-5 м, а время существования от нескольких секунд и редко превышает пару минут. Вихрь способен поднимать в воздух пыль, песок, мелкие камешки и лёгкие предметы, перенося их иногда на довольно значительное расстояние – на сотни метров.

2. Гастнадо - небольшой вертикальный вращающийся столб воздуха, связанный с фронтом порыва перед линией шквала при резком нисходящем потоке из-под грозового облака. Он искажает циркуляцию при соприкосновении с землей, но не у основания кучево-дождевого облака. Гастнадо образуется, когда холодный и, при этом, сравнительно сухой нисходящий воздух вызывает вращение у земли и, если сдвиг ветра в приземном слое достаточно силен, это вращение способно нанести значимый ущерб.

3. Огненный вихрь - вихрь из огня и дыма, образующийся вследствие существенного нагревания воздуха над образовавшимся пожаром, когда его плотность уменьшается и формируется мощный восходящий поток, а снизу место перегретого воздуха заполняет холодный с периферии пожара. Вновь поступающий воздух также нагревается, а подсос холодного продолжается, таким образом формируется своеобразная мезоциркуляция. Подобные вихри наносят ущерб главным образом за счёт стремительного выжигания местности пожаром и с наибольшей вероятностью возникают при ветренной погоде за счёт наличия дополнительной динамики, усиливающей и поддерживающей мезоциркуляцию в зоне пожара. Чем активнее происходит замещение тёплого воздуха холодным, тем сильнее и продолжительнее, как и в случае с любым смерчем, будет вихрь.

1.1 Типы и основные характеристики смерчей

Смерчи в зависимости от первоначального касания их воронки поверхности, над которой они возникают, делятся на сухопутные и водяные. Сухопутные формируются и развиваются над сушей, водяные над акваторией различных водоёмов – от морей и океанов до озёр и рек. Сухопутные смерчи зачастую более мощные и устойчивые. При выходе водяного смерча на берег тот быстро ослабевает и разрушается, теряя связь с необходимыми условиями для своего существования в конкретной ситуации, но иногда при должном развитии в благоприятной для этого ситуации они способны наносить серьёзный ущерб прибрежной территории.

В свою очередь, по природе формирования смерчи бывают мезоциклонного и немезоциклонного происхождения. Этот тип образования определяет их потенциал к интенсивности и длительности своего существования. Смерчи способны существовать от нескольких минут до часов, последнее случается сравнительно редко и, как правило, в случае мезоциклонных. Смерчи мезоциклонного происхождения связаны с мезоциклоном в суперячейковых грозовых облаках, они чаще всего достигают наиболее разрушительной силы и могут существовать длительное время, нанося значительный ущерб на обширной территории. Немезоциклонные смерчи формируются в обычных кучево-дождевых облаках при благоприятных условиях, отличаются кратковременностью и редко приобретают категорию выше F0-F2, однако способны нанести достаточные разрушения.

Визуально различают следующие типы смерчей, рассмотрим самые основные из них:

1. Бичеподобный – воронка такого смерча отличается извилистостью и сравнительно небольшим диаметром, а длина в разы превосходит радиус, в результате чего такой смерч выглядит тонким и гладким. Как правило, характерный вид принимают относительно слабые смерчи.

2. Многовихревой – смерч, состоящий из нескольких вихрей различной мощности вокруг главного осевого. Зачастую подобные вихри формируются в составе хорошо развитого разрушительного смерча и совместно наносят серьёзный ущерб на обширных территориях.

3. Клиновидный – сравнительно значительный по ширине смерч (около и даже более 0,5 км), как правило окружающий себя обширным облаком из пыли и обломков, диаметр которого иногда превосходит их высоту. Это всегда наиболее мощные смерчи, а в их составе могут возникать и побочные вихри, в связи с чем иногда они же одновременно являются и многовихревыми. Серьёзный ущерб такие клиновидные смерчи наносят как из-за высоких скоростей ветра, так и из-за существенных диаметральных размеров.

Таблица 1.1 – Оценка интенсивности смерчей. Шкала Фуджиты.

Шкала Фуджиты		
Категория	Скорость ветра, миль/час	Характеристика ущерба
F0	64-117	Небольшой
F1	73-112	Умеренный
F2	113-157	Большой
F3	158-206	Сильный
F4	207-260	Опустошающий
F5	261-318	Невероятный

В приведённой выше шкале интенсивность смерча классифицируется по последствиям разрушений, которые они оставляют после себя. Скорости ветра здесь приводятся приблизительные наносимому ущербу, поскольку пока ещё ни один метеорологический прибор не в состоянии выдержать разрушительную силу вихря в его воронке. Шкала была разработана метеорологом Чикагского университета, профессором Теодором Фуджитой (1920-1998).

Смерч категории F5 полностью сносит с фундамента крепкие кирпичные и деревянные постройки, вырывает с корнями деревья, срывая с них кору, перемещает автомобили на расстояние свыше 100-500 м, срывает асфальт с дорог, может разрушить бетонные здания, наносит серьезный ущерб небоскрёбам, вплоть до их коллапса, сильно повреждает стальные железобетонные конструкции, может поднять в воздух на сотни метров многотонные прицепы и вагоны.

1.2 Обнаружение смерчей с помощью радиолокации

С точки зрения обнаружения смерченесущих ячеек при помощи Доплеровского метеорологического локатора (далее ДМРЛ), успешно идентифицируются потенциально опасные мезоциклоны по наличию в области классической суперячейки сигнатуры отражаемости в виде гигантской запятой или «крюка». То есть, проще обнаружить более мощные смерчи мезоциклонного происхождения. Крючкообразный элемент суперячейки в англоязычных источниках именуют как «Hook echo» или эхо в виде крючка и в качестве примера приводится на рисунке 1.1 [9]. Данное изображение было получено 3 мая 1999 года в штате Оклахома.

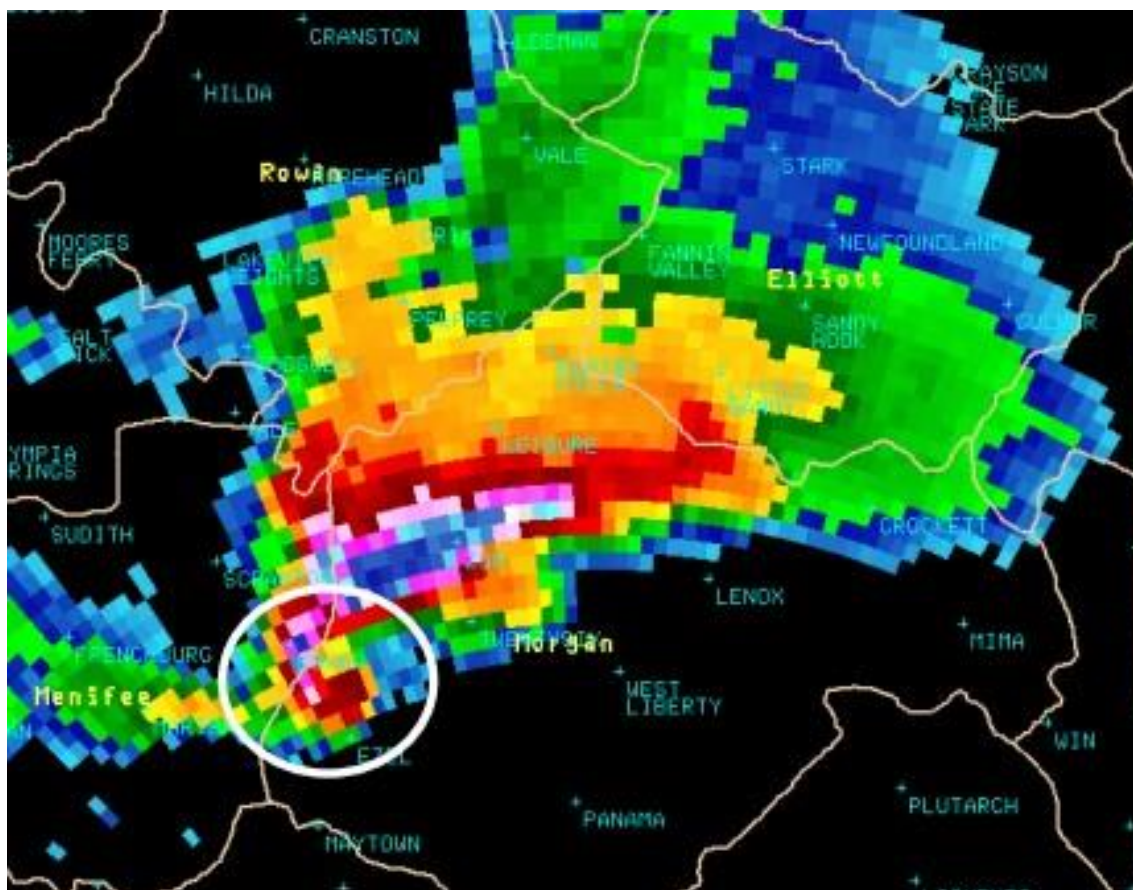


Рисунок 1.1 – Отражение на радаре классической суперячейки с «Hook echo»

Крайне непросто обнаружить смерчи немезоциклонного происхождения из-за отсутствия их связи с мезоциклоном, которые связаны с обычными кучево-дождевыми облаками. Однако далеко не всегда и суперячейки имеют столь чёткую отражаемость элемента характерного крюка. Гораздо чаще, в частности на территории ЕТР, встречаются суперячейки типа НР (high precipitation) – с обильными осадками, где зона, соответствующая мезоциклону в ней, имеет форму обычной фасолины [9]. Смерченесущий мезоциклон в данном случае может быть скрыт в дожде, тем самым, представляя большую опасность. Вид сверху в данном случае не особенно информативен. Подобные случаи требуют привлечения дополнительной радиолокационной информации в виде вертикального и горизонтального сечения интересующей ячейки для идентификации пространственного распределения и максимума радиолокационной отражаемости внутри неё.