



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 развития облаков с водяным смерчем»

Исполнитель Мальцева Ольга Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Михайловский Юрий Павлович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

«08» _____ 06 _____ 2020 г.

Санкт-Петербург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Понятие о смерче. Методы прогноза и диагноза. Связи с грозовыми явлениями.....	5
1.1 Понятие о смерче.....	5
1.2 Методы прогноза и диагноза.....	6
1.3 Связи с грозовыми явлениями	15
Глава 2. Физико-географическое и климатическое описание Ленинградской... Области.....	21
Глава 3. Состав и принципы работы технических систем контроля облаков ...	28
Глава 4. Анализ особенностей развития радиолокационной и электрической структуры облака с водяным смерчем	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

Каждый год на нашей планете регистрируется более тысячи смерчей. Также велико и количество смерчевых облаков. Это грозовые, кучево-дождевые облака. Зачастую они сопровождаются грозами, градом и ливнями, отличающимися по своей силе. Особая категория смерчей – это водяные смерчи.

Водяной смерч — воронкообразный вихрь воздуха и воды, образующийся над поверхностью большого водоема и соединённый с кучевым облаком. По своей природе подобен обычному смерчу. Водяной смерч может образоваться в случае прохождения обычного смерча над водной поверхностью. Обычно встречается в тропических широтах. В отличие от классического смерча, водяной смерч существует до 30 минут, намного меньше в диаметре (от 5 до 200 м), скорость движения и вращения ниже в два-три раза, не обязан сопровождаться ураганным ветром.

Водяной смерч способен нанести ущерб отраслям, связанным с водным транспортом, различным береговым постройкам. Жизни людей, оказавшихся рядом со стихией, также подвергаются значительной опасности.

Несмотря на то, что в основном водяные смерчи рождаются в тропических широтах, они могут появиться и в умеренных. Их можно часто наблюдать на западном побережье Европы, на Британских островах и в некоторых районах средиземноморья. На территории нашей страны не единожды фиксировали смерчи в разных регионах. В частности, в Ленинградской области регистрировали смерчи над Ладожским озером и Финским заливом.

Актуальность и практическая значимость работы.

Исследование развития облаков с водяным смерчем **актуально** на сегодняшний день, т.к. водяной смерч представляет собой не частое, но разрушительное явление. Опасность для людей при таких природных явлениях заключается в разрушении дорожных и мостовых покрытий, сооружений, воздушных линий электропередачи и связи, наземных трубопроводов, а также поражении

людей обломками разрушенных сооружений, осколками стекол, летящими с большой скоростью. Работа имеет **практическую значимость**, т.к. прогноз смерчей пока не совершенен. Методы прогноза и диагноза данного явления требуют дальнейшего исследования для повышения точности локализации смерча и сокращения времени оповещения.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ особенностей развития радиолокационной и электрической структуры облака с водяным смерчем на примере смерча над Финским заливом 12 августа 2018 года.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Изучить научную литературу по теме работы.
2. Провести анализ экспериментальных данных от 12 августа 2018г.
3. Сделать обобщение и заключение об особенностях развития радиолокационной и электрической структуры облака с водяным смерчем.

1.1 Понятие о смерче

Смерч - восходящий вихрь из чрезвычайно быстро вращающегося в виде воронки воздуха огромной разрушительной силы, в котором присутствуют влага, песок и другие взвеси. Восходящие вихри быстро вращающегося воздуха, имеющие вид темного столба диаметром от несколько десятков до сотен метров с вертикальной, иногда и загнутой осью вращения. Средняя скорость ветра от 15 - 18 м/с, до 50 м/с, ширина фронта 350 - 400 м. Длина пути - от сотен метров до десятков и сотен километров. Смерч может сопровождаться осадками в виде града, проливного дождя [12].

Форма смерчей может быть многообразной – колонна, конус, бокал, бочка, бичеподобная веревка, песочные часы, рога «дьявола» и т.п., но чаще всего смерчи имеют форму вращающегося хобота, трубы или воронки, свисающей из материнского облака (отсюда и их названия: trombe- по французски труба и tornado – по испански вращающийся).

Движение воздуха в системе смерчей и торнадо обычно происходит против часовой стрелки, но не исключены и движения по часовой стрелке. Одновременно совершается подъем воздуха по спирали. На соседних участках происходит опускание воздуха, в результате чего вихрь замыкается. Под влиянием большой скорости вращения внутри вихря развивается центробежная сила, вследствие которой давление в нем понижается. Это приводит к тому, что при перемещении вихря в его систему всасывается все, что встречается на пути (вода, песок или различные предметы: камни, доски, крыши домов и т. п.), которые затем выпадают из облаков иногда на значительном расстоянии. Именно с этим связаны так называемые цветные, или «красные» дожди, которые образуются благодаря втягиванию в систему вихря окрашенных частичек породы и смешиванию их с каплями дождя. Если вихрь возникает на море или озере, то

его называют водяным смерчем. Смерчи часто вместе с водой всасывают в свою систему рыбу, которую облако может выбросить уже на берегу.

Т.к. радиус воронки смерча у земли уменьшается, то скорость у поверхности земли достигает сверхзвуковых величин [4].

Смерчи редко возникают по одному – в основном "семьями", по несколько вихрей одновременно. В отдельных случаях создаются "семьи" из нескольких десятков вихрей, удаленных друг от друга на сотни метров или даже десятки километров. Путь смерча бывает прерывистым: это случается, когда "хобот" вихря отрывается от земли, чтобы обрушиться на нее с новой силой.

1.2 Методы прогноза и диагноза

Синоптические условия образования смерчей

Смерчи возникают в циклонах, в циркуляцию которых вовлечен воздух с высоким содержанием влаги. В нашей стране это особенно характерно для южных циклонов, формирующихся над Средиземным и Черным морями, затем перемещающихся на северо-восток.

Смерч - явление локальное. Однако возникновение смерча в первую очередь определяется макромасштабными атмосферными процессами. Кроме того, необходимо, чтобы в атмосфере имелся еще ряд благоприятных условий для их возникновения.

Смерчи возникают вблизи атмосферных фронтов. Неподалеку от центра циклона или волнового возмущения. В 70% случаев смерчи возникают в теплом секторе циклона в 50 – 100 км впереди холодного фронта; в 20% случаев вблизи точки окклюзии; в 5% случаев впереди линии теплого фронта, но не далее 100 км от него; в 5% случаев в однородной воздушной массе.

В воздушной массе, в которой возможно развитие смерча, часто на высоте 2000 – 2500 метров имеется слой сухого воздуха с дефицитом точки росы более 10°C, ниже которого существует задерживающий слой. Наличие слоя сухого воздуха при прочих благоприятных условиях способствует образованию

смерчей. Когда нисходящий поток в кучево-дождевом облаке достигает сухого слоя, то температура воздуха в нем вследствие испарения начинает быстро понижаться. Тогда на небольшом расстоянии возникают большие температурные контрасты и большие градиенты давления, В этой области низкого давления вероятно возникновение смерчей [15].

Сильные смерчи возникают в сверхмощных кучево-дождевых облаках высотой 12—14 км, вершины которых превышают тропопаузу на 1—3 км. Необходимым условием образования таких облаков является быстрый подъем теплого и влажного воздуха вдоль фронтальной поверхности и в результате окклюдирования. Процесс окклюдирования и неравномерная из-за больших скоростей ветра адвекция температуры создают в течение короткого во времени сверх сухоадиабатические вертикальные градиенты температуры в нижних слоях тропосферы, приводят к разрушению задерживающего слоя и возникновению очень мощных кучево-дождевых облаков.

Более слабые смерчи 0 и 1 классов могут возникать и в несколько других синоптических ситуациях, вдали от центров циклонов, волновых участков холодных фронтов или вблизи фронтов окклюзии. Однако и в этом случае фронты перемещаются с большими скоростями, что способствует образованию высоких облаков. Совсем слабые смерчи, диаметром до 10 — 20 м, встречаются в однородной воздушной массе — под заполняющимися обширными высотными циклонами. В таких ситуациях основная роль в образовании мощных облаков принадлежит термической конвекции.

Особое место занимают смерчи, наблюдающиеся у Черноморского побережья Кавказа. Эти смерчи возникают в результате мощных вторжений холода на Кавказ при температуре морской воды более 20°C. При этом синоптическая ситуация у земли характеризуется погодой, присущей тыловым частям циклонов, в средней тропосфере наблюдается устойчивый западно-восточный перенос воздушных масс со скоростью около 20 м/с [12].

Атмосферные процессы, при которых возможно образование смерчей различной интенсивности, в целом характеризуются перемещением с юга и

юго-запада на север и северо-восток циклонов и активных волновых возмущений, и их можно разделить на четыре типа (рис.1), Для всех четырех типов атмосферных процессов отличительными особенностями являются:

- быстрое окклюдирование полярной фронтальной системы;
- наличие в теплом секторе циклонов влажного воздуха морского происхождения.

1 тип (рис. 1а) характеризуется быстрым, со скоростью 40 — 60 км/ч. перемещением южного углубляющегося (падение давления более 3 - 4 гПа/3 ч) циклона на северо-восток (север или северо-запад) вдоль передней части высотной барической ложбины на поверхности 500 гПа. В то же время в верхней тропосфере существует струйное течение, направленное с юго-запада на северо-восток, со скоростями ветра на оси 40 - 50 м/с, а в пограничном слое атмосферы — струйное течение нижних уровней, направленное с юго-востока или с юга на северо-запад или север, со скоростями на оси 12- 18 м/с и более. При первом типе атмосферных процессов вероятно возникновение вблизи центра циклона (и впереди теплого фронта, у точки окклюзии и впереди холодного фронта) наиболее сильных смерчей интенсивностью 2 — 4 балла. Такая ситуация часто обуславливает смерчи в Центральном, Центрально-Черноземном, Волго-Вятском, Северном районах и на Урале [12].

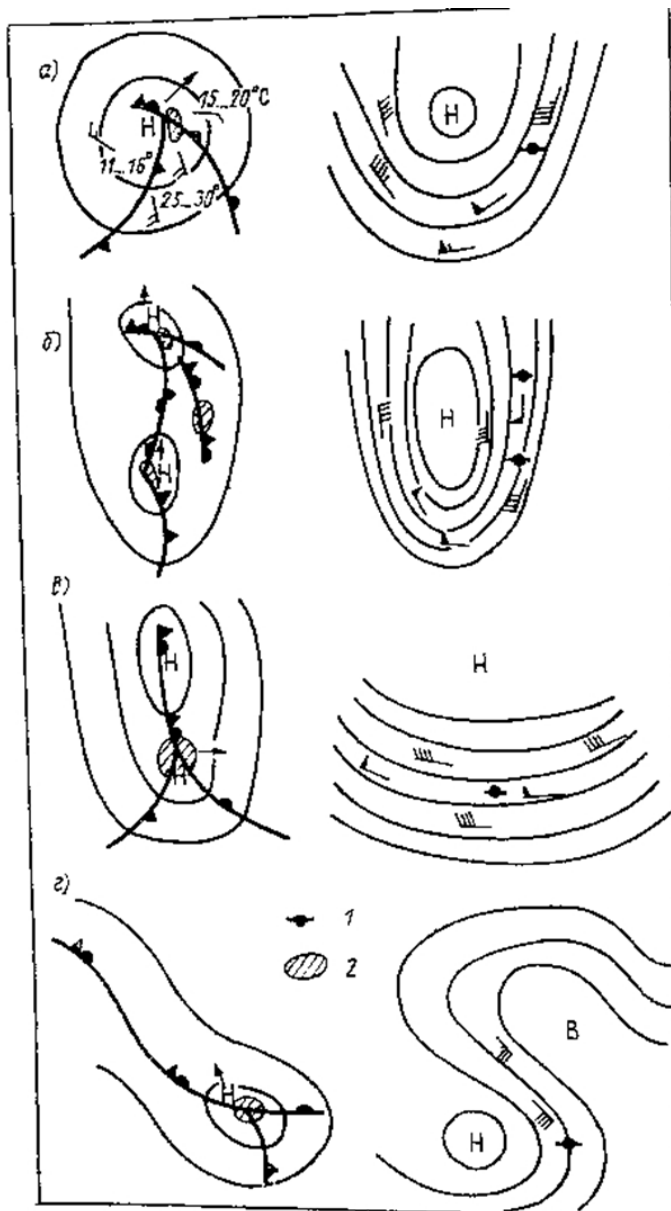


Рис. 1 - Схема процессов, при которых возможно образование смерчей.

Слева - приземная карта погоды, справа - карта АТ500

1 - местоположение циклона у земли

2 - район наиболее вероятного образования смерчей.

2 тип (рис. 1б) отличается хорошо выраженной меридиональностью процессов. Вследствие этого южные циклоны и активные волновые возмущения перемещаются на север со скоростью 50-80 км/ч. Часто в теплом секторе этих циклонов имеется фронт окклюзии тропической фронтальной системы. Образование смерчей интенсивностью 1—2 балла вероятно вблизи центра волновых

возмущений и на фронте окклюзии. Такой тип процессов приводит к смерчам, чаще наблюдающимся в Прибалтике и Белоруссии [12].

3 тип (рис. 1в) характеризуется большой скоростью перемещения воздушных масс в зональном направлении. По этой причине происходит быстрое окклюдирование полярной фронтальной системы. У точки окклюзии образуется небольшой по площади, но активный циклон быстро движущийся на восток. Вблизи центра циклона вероятно образование смерчей интенсивностью 0—2 балла. Этот тип процессов вызывает смерчи чаще в Молдавии, на юге Украины на Северном Кавказе [12].

4 тип (рис. 1г) отличается тем, что на периферии обширной барической ложбины у поверхности земли у точки окклюзии большой протяженности фронта окклюзии образуется циклон.

Этот циклон движется на северо-запад (северо-восток или юго-восток) в зависимости от направления ведущего потока. Вблизи центра циклона возможны смерчи интенсивностью 0—1 балл. Такие ситуации чаще приводят к возникновению смерчей на Украине, Северном Кавказе, востоке Центрально-Черноземного района и на западе Поволжья.

Таким образом, возникновение смерчей наблюдается тогда, когда происходит взаимодействие атмосферных процессов различных масштабов. При этом: — макромасштабные процессы (эволюция циклопов и атмосферных фронтов) создают на больших пространствах благоприятные условия для возникновения конвективной неустойчивости;

— мезо масштабные процессы (неравномерная адвекция по высотам, наличие задерживающего и сухого слоев) обуславливают возникновение облачных массивов и среди них отдельных сверхмощных кучево-дождевых облаков;

— микромасштабные процессы (понижение вследствие испарения температуры воздуха в нисходящем потоке кучево-дождевого облака) приводят к возникновению в сверхмощных облаках смерчей [12].

Для прогноза метеорологических параметров также пользуются численными моделями. Численная модель прогнозирования погоды — компьютерная программа, построенная на основе физической системы уравнений и составляющая на основе текущих данных метеорологический прогноз.

Для прогнозирования сильных штормов начали применять некоторые системы моделирования атмосферных процессов.

Сообщество моделирования США разработало модель мезомасштабного моделирования следующего поколения, известную как модель WRF. Цели проекта WRF заключаются в разработке передовой мезомасштабной системы прогнозирования и сбора данных и ускорении научно-исследовательских достижений в операциях. Модель предназначена для повышения точности прогноза в масштабах от облачного до синоптического, с приоритетным акцентом на разрешения горизонтальной сетки 1-10 километров [4]. В настоящее время проводятся многочисленные эксперименты по прогнозированию в реальном времени для оценки эффективности WRF в различных прогнозируемых приложениях.

Со времени своего первого публичного выпуска в 2000 году WRF стала, вероятно, самой используемой в мире моделью атмосферы.

Радиолокационные методы

На сегодняшний день основным источником получения информации о пространственном распределении конвективных явлений служит метеорологический радиолокатор (МРЛ), позволяющий обнаруживать эти явления в радиусе 200 км от локатора. Данные радиолокационных наблюдений одного МРЛ предупреждают о появлении конвективного явления с заблаговременностью 1-3 ч, а несколько МРЛ, обзор которых перекрывает друг друга, дают возможность прогнозировать такие явления на срок до 12 ч.

В основе МРЛ лежит принцип радиолокации. Радиолокация - это область радиотехники, которая использует излучение и отражение электромагнитных волн для обнаружения объектов и получения их характеристик путем преобразования отраженного сигнала (радио-эха) [6].

В настоящее время МРЛ имеют широкое применение во всем мире. Они обладают обширным диапазоном возможностей и приспособлены к нуждам конкретной страны.

Распознавание форм облачности, интенсивности осадков и опасных метеорологических явлений является одной из задач вторичной обработки радиолокационных данных в ПО «ГИМЕТ-2010» [9].

Распознавание метеоявлений основано на применении комплексных критериев, учитывающих, в общем случае, высоту верхней границы облаков, профиль радиолокационной отражаемости и аэрологическую информацию.

Радиолокационной отражаемостью Z называют величину, характеризующую отражающие свойства единичного объема гидрометеоров.

Отражаемость является специфической метеорологической характеристикой интегральной микроструктуры облаков и осадков.

Связь между установленными критериями ОЯ с используемыми в ПО вторичной обработки ДМРЛ-С:

$$Z_b = 10 \cdot \lg Z a + 18$$

Получение значений радиолокационной отражаемости в ДМРЛ-С реализовано по 360 дискретным значениям азимута, 400 ячейкам дальности и 24 углам места.

Диапазон шкалы отражаемости в ДМРЛ-С от -30 до 70 dBZ. В зависимости от измеренной величины Z и от вертикальной протяженности поля отражаемости делается вывод о степени опасности наблюдаемого процесса [9].

Наряду с получением информации о радиолокационной отражаемости доплеровский МРЛ способен измерять составляющую компоненту скорости движения метеообъекта вдоль линии (луча), проведенной в направлении от радиолокатора к метеоцели. Измеренная радиальная скорость совокупности метеоцелей может при этом быть положительной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена к локатору), или отрицательной (если проекция скорости рассеивающих целей на луч направлена от локатора) (рис.2). Скорость движения метеоцелей, направление которой перпендикулярно радио-

локационному лучу, не может быть оценена радиолокатором, т.к. в этом случае проекция радиальной скорости на направление визирования равна нулю.

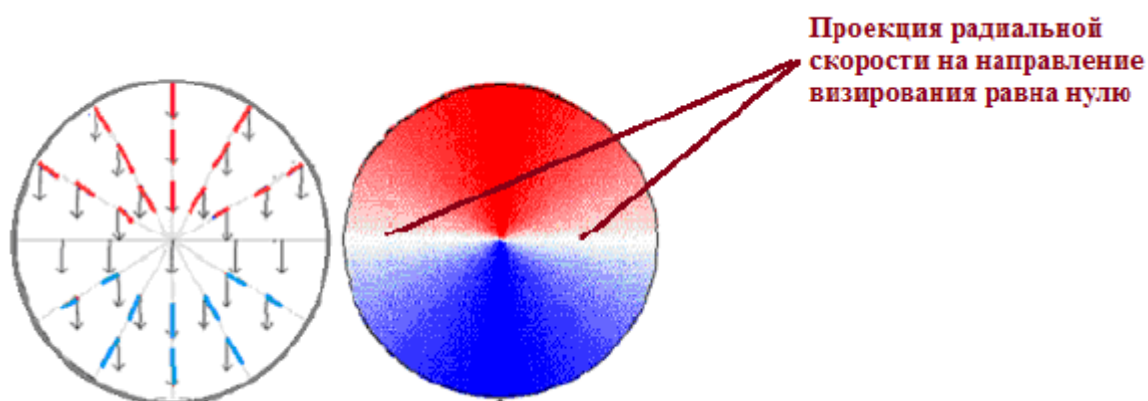


Рис. 2 – Радиальные компоненты скорости ветра, измеренной *в направлении* (красным цветом) радиолокатора и *от него* (синим цветом)

Измеренная величина скорости V_r характеризует, как и в случае отражаемости Z , среднее значение для всего импульсного объема, определяющего характеристики отраженного сигнала. Импульсный объем ограничен эффективной длительностью зондирующего импульса и шириной диаграммы направленности антенны. То есть, если в импульсном объеме есть частицы, движущиеся с разными скоростями, измеренная скорость будет соответствовать среднему значению в импульсном объеме. Кроме скорости V , доплеровский радиолокатор позволяет измерить и ширину доплеровского спектра W отраженного сигнала, характеризующего величину разброса скоростей в импульсном объеме. Ширина спектра позволяет оценить величину турбулентных пульсаций в импульсном объеме, однако нужно иметь в виду, что по мере удаления импульсный объем растет, что может приводить к увеличению W не только за счет влияния турбулентности [3].

По доплеровским характеристикам V и W в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» рассчитываются следующие вторичные продукты - горизонтальный ветер (HV), вертикальный профиль ветра (VW), временная диаграмма изменения верти-

кального профиля ветра VWP, турбулентность, вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра.

Пороговые значения критериев, используемые в алгоритмах вторичной обработки ДМРЛ-С для распознавания различных типов облачности и явлений, устанавливаются разработчиком и используются (отдельно или комплексно) в алгоритмах вторичной обработки информации. К ним относятся:

- высота верхней (Нвг) и нижней (Ннг) границы облаков;
- отражаемость хотя бы на одном из трех стандартных уровней Z1, Z2 и Z3 (Z1 - отражаемость в слое от 0 до 2 км, середина слоя 1 км; Z2 - отражаемость в слое от 2 до 4 км, середина слоя 3 км, Z3 - отражаемость в слое от 4 до 6 км, середина слоя 5 км);
- комплексные У-критерии распознавания грозы и града; пороговые значения этих критериев определяются эмпирическим путем [9] .

Для идентификации шквалов (слабый, умеренный, сильный), связанных с грозовым облаком, в соответствии с методикой, разработанной под руководством Б.Е. Пескова, используются три параметра:

- ΔH - превышение верхней границей Св уровня тропопаузы (верхняя граница облачности должна превышать высоту тропопаузы на $dh = H_{вг} - H_{tr}$ более, чем указано на рисунке 3);
- Z должно быть превышено значение максимальной отражаемости Zmax для любого слоя (Z3 - значение отражаемости на специальном высотном уровне, высота которого превышает нулевую изотерму на 2,0-2,5 км);
- изменение скорости ветра должно быть более, чем dV между соседними значениями скорости.

Для идентификации смерчей используются значения Z3 и Zmax (максимальной отражаемости в слое выше 1 км) и ΔH (превышения верхней границей Св уровня тропопаузы)

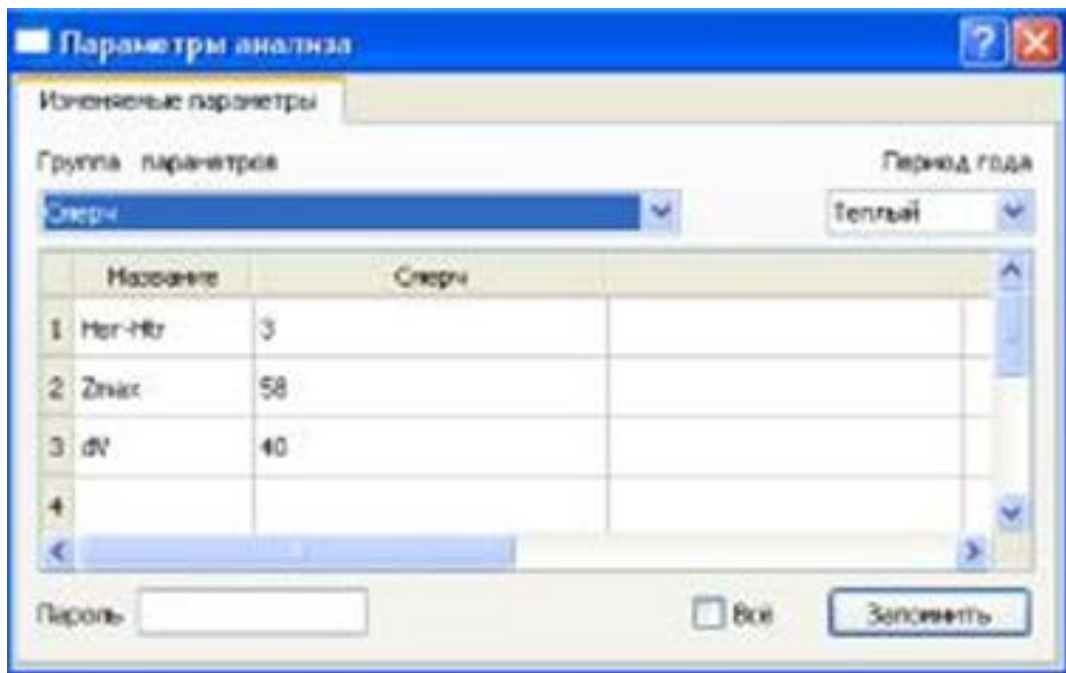


Рис. 3 - Пороговые значения Нвг- Нтр, Zmax, dV для обнаружения смерча в теплый период

1.3 Связи с грозовыми явлениями

Связь смерча и грозовых явлений очевидна, т. к. эти явления связаны с развитием облаков вертикального развития, или конвективных облаков.

Конвекция развивается в неустойчивой атмосфере, когда воздушные массы у поверхности земли, оказываются легче, чем воздух, расположенный в более высоких слоях - начинается интенсивное перемешивание воздуха по вертикали. Подъем воздушных масс вызывает их охлаждение, происходит конденсация водяного пара с выделением огромного количества скрытого тепла. Чем больше относительная влажность и чем выше температура в нижележащих слоях, тем больше неустойчивость, тем выше могут быть развивающиеся облака. Ливни, выпадающие из них, сопровождаются молниевыми разрядами, громом, градом, при этом отмечаются шквалы, иногда образуются смерчи [1].

Сб состоят из одной или нескольких конвективных ячеек, каждая из которых на протяжении жизни облака проходит через три стадии эволюции (рис. 4)

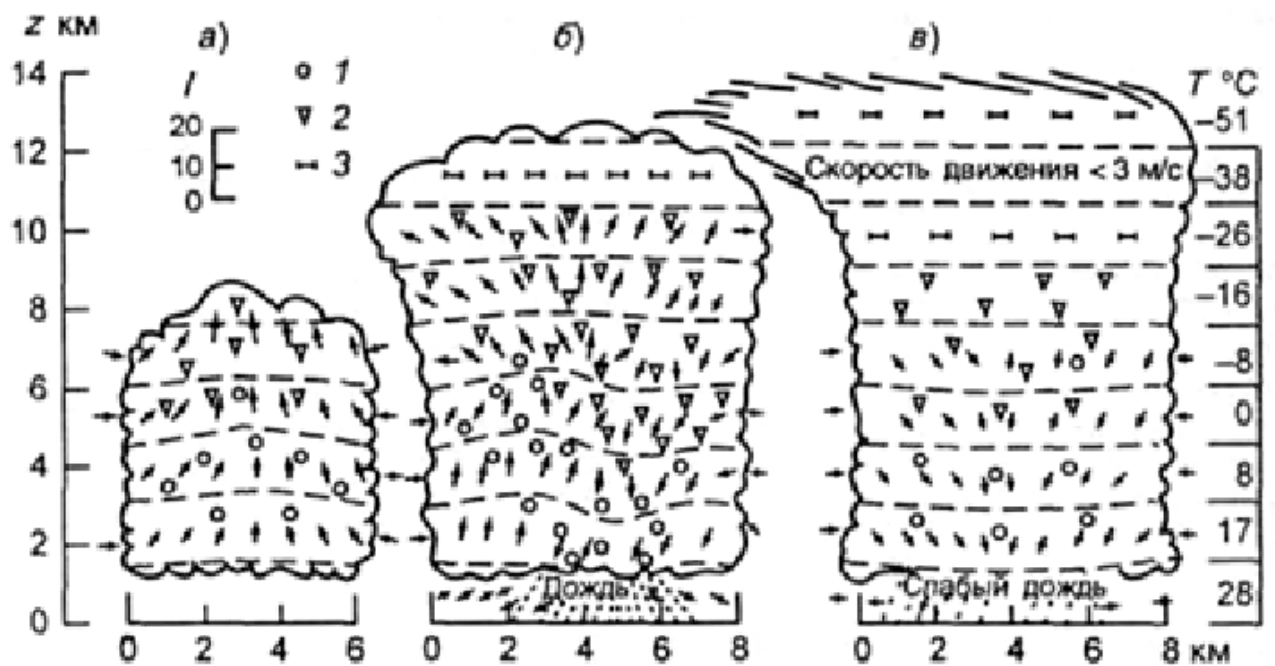


Рис. 4 – Модель строения грозовой ячейки в разных стадиях развития: начальной (а), зрелости (б), распада (в). I – масштаб скорости (м/с); 1 – капли, 2 - частицы крупы и града, 3 – кристаллы.

Начальная стадия С_б охватывает период роста ячейки и характеризуется преобладанием во всей ее толще восходящих движений, благодаря чему активно идет процесс формирования частиц осадков. Продолжительность стадии роста - 10-20 мин. Напряженность электрического поля в этих облаках очень велика, но, как правило, недостаточна для перехода их в грозовые [8].

Следующая стадия - стадия зрелости. Вершиной зрелого облака является кристаллическая «наковальня», над которой возвышается один или несколько округлых куполов. Температура воздуха у вершины облаков понижается ниже - 22 °С. На этой стадии в облаке уже есть зона осадков; при этом размеры частиц осадков таковы, что скорость их падения превосходит скорость восходящих потоков в облаке. В результате в зрелых ячейках рядом с относительно теплым восходящим потоком возникает холодный нисходящий, который интенсифицируется увлечением воздуха частицами осадков. Такая циркуляция воздушных потоков является довольно устойчивой. Зрелые С_б имеют наибольшие вертикальные и горизонтальные размеры и из них выпадают самые сильные осадки.

С ними связано большинство гроз и градобитий. Скорости вертикальных потоков, а также амплитуды и линейные размеры возмущений полей температуры и ветра в них максимальны, а изменения во времени - наименьшие. Поэтому поля метеорологических величин в зоне зрелых Сб для промежутков времени до 30-40 мин (иногда и более) часто можно считать квазистационарными [8] .

Заключительной стадией развития Сб является стадия диссипации (разрушения) облака. Вначале разрушается нижняя (капельная) часть облака и уменьшается высота его верхней кромки. Вследствие малых скоростей оседания и испарения кристаллов остатки наковален в форме перистых облаков могут после разрушения существовать часами.

Каждой стадии эволюции Сб соответствует характерная циркуляция воздуха в подоблачном слое. В слой под растущими Сб происходит циклоническое вытекание воздуха. В стадии зрелости под восходящим потоком наблюдается та же картина, тогда как под нисходящим происходит антициклоническое вытекание, которое преобладает под диссипирующим Сб.

Рассмотрим подробнее классификацию грозовых облаков.

- Одноячейковое грозовое облако

Одноячейковые кучево-дождевые (*Cumulonimbus*, Сb) облака развиваются в дни со слабым ветром в малоградиентном барическом поле. Их называют ещё внутримассовыми или локальными. Они состоят из конвективной ячейки с восходящим потоком в центральной своей части, могут достигать грозовой и градовой активности и быстро разрушаться с выпадением осадков. Размеры такого облака: поперечный — 5-20 км, вертикальный — 8-12 км, продолжительность жизни около 30 минут, иногда — до 1 часа. Серьёзных изменений погоды после грозы не происходит [5].

Сначала возникают кучевые облака хорошей погоды (*Cumulus humilis*). При благоприятных условиях возникшие кучевые облака быстро растут как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, при этом восходящие потоки находятся почти по всему объёму облака и увеличиваются от 5 м/с до 15-20 м/с. Нисходящие потоки очень слабы. Окружающий воздух активно прони-

кает внутрь облака за счёт смешения на границе и вершине облака. Облако переходит в стадию средних кучевых (*Cumulus mediocris*). Образующиеся в результате конденсации мельчайшие водяные капли в таком облаке сливаются в более крупные, которые уносятся мощными восходящими потоками вверх. Облако ещё однородное, состоит из капель воды, удерживаемых восходящим потоком, — осадки не выпадают. В верхней части облака при попадании частиц воды в зону отрицательных температур капли постепенно начинают превращаться в кристаллы льда. Облако переходит в стадию мощного кучевого облака (*Cumulus congestus*). Смешанный состав облака приводит к укрупнению облачных элементов и созданию условий для выпадения осадков и образования грозовых разрядов. Такое облако называют кучево-дождевым (*Cumulonimbus*) или (в частном случае) кучево-дождевым лысым (*Cumulonimbus calvus*). Вертикальные потоки в нём достигают 25 м/с, а уровень вершины достигает высоты 7—8 км.

Испаряющиеся частицы осадков охлаждают окружающий воздух, что приводит к дальнейшему усилению нисходящих потоков. На стадии зрелости в облаке одновременно присутствуют и восходящие, и нисходящие воздушные потоки.

На стадии распада в облаке преобладают нисходящие потоки, которые постепенно охватывают все облако.

- Многоячейковые кластерные грозы

Это наиболее распространённый тип гроз, связанный с мезомасштабными (имеющими масштаб от 10 до 1000 км) возмущениями. Многоячейковый кластер состоит из группы грозовых ячеек,двигающихся как единое целое, хотя каждая ячейка в кластере находится на разных стадиях развития грозового облака. Грозовые ячейки, находящиеся в стадии зрелости, обычно располагаются в центральной части кластера, а распадающиеся ячейки — с подветренной стороны кластера. Они имеют поперечные размеры 20-40 км, их вершины нередко поднимаются до тропопаузы и проникают в стратосферу. Многоячейковые кластерные грозы могут давать град, ливневые дожди и относительно слабые

шквальные порывы ветра. Каждая отдельная ячейка в многоячейковом кластере находится в зрелом состоянии около 20 минут; сам многоячейковый кластер может существовать в течение нескольких часов. Данный тип грозы обычно более интенсивен, чем одноячейковая гроза, но слабее суперъячейковой грозы [5].

- Многоячейковые линейные грозы (линии шквалов)

Многоячейковые линейные грозы представляют собой линию гроз с продолжительным, хорошо развитым фронтом порывов ветра в передней части. Линия шквалов может быть сплошной или содержать бреши. Приближающаяся многоячейковая линия выглядит как тёмная стена облаков, обычно покрывающая горизонт с западной стороны (в северном полушарии). Большое число близко расположенных восходящих/нисходящих потоков воздуха позволяет квалифицировать данный комплекс гроз как многоячеечный, хотя его грозовая структура резко отличается от многоячейковой кластерной грозы. Линии шквалов могут давать крупный град (диаметром более 2 см) и интенсивные ливни, но больше они известны как системы, создающие сильные нисходящие потоки и сдвиги ветра, опасные для авиации. Линия шквалов близка по свойствам к холодному фронту, но является локальным результатом грозовой деятельности. Часто линия шквалов возникает впереди холодного фронта. На радарных снимках эта система напоминает изогнутый лук. Данное явление характерно для Северной Америки, на территории Европы и Европейской территории России наблюдается реже [8].

- Суперъячейковые грозы

Суперъячейка — наиболее высокоорганизованное грозовое облако. Такие облака относительно редки, но представляют наибольшую угрозу для здоровья и жизни человека и его имущества. Суперъячейковое облако схоже с одноячейковым тем, что оба имеют одну зону восходящего потока. Различие состоит в размере суперъячейки: диаметр порядка 50 км, высота — 10—15 км (нередко верхняя граница проникает в стратосферу) с единой полукруглой наковальной. Скорость восходящего потока в суперъячейковом облаке значительно выше,

чем в других типах грозовых облаков: до 40—60 м/с. Основной особенностью этого облака является наличие вращения. Вращающийся восходящий поток в суперъячейковом облаке (в радарной терминологии называемый мезоциклоном), создаёт экстремальные по силе погодные явления, такие, как крупный град (диаметром 2—5 см, иногда и более), шквалы со скоростью до 40 м/с и сильные разрушительные смерчи. Окружающие условия являются основным фактором в образовании суперъячейкового облака. Необходима очень сильная конвективная неустойчивость воздуха. Температура воздуха у земли (до грозы) должна быть +27...+30°C и выше, но главным необходимым условием является ветер переменного направления, вызывающий вращение. Такие условия достигаются при сдвиге ветра в средней тропосфере. Осадки, образующиеся в восходящем потоке, переносятся по верхнему уровню облака сильным потоком в зону нисходящего потока. Таким образом, зоны восходящего и нисходящего потоков оказываются разделёнными в пространстве, что обеспечивает жизнь облака в течение длительного периода времени. Обычно на передней кромке суперъячейкового облака наблюдается слабый дождь. Ливневые осадки выпадают вблизи зоны восходящего потока, а наиболее сильные осадки и крупный град выпадают к северо-востоку от зоны основного восходящего потока (в Северном полушарии). Наиболее опасные условия наблюдаются вблизи зоны основного восходящего потока [5]

Глава 2. Физико-географическое и климатическое описание Ленинградской Области

Географическое положение Ленинградской области: регион расположен на северо-западе России (Восточно-Европейской равнины), ближе к Финскому заливу Балтийского моря.

Ленинградская область с запада граничит с соседним государством — Эстонией, на северо-западе Ленобласть граничит с Финляндией, а с северной стороны с другим регионом России — с Карелией. На востоке Ленобласть граничит с Вологодской областью. На юге и юго-востоке регион граничит с Псковской и Новгородской областями [19].

Ленобласть расположена в лесной зоне. Здесь представлены тайга и смешанные лиственные и хвойные леса, озера и реки, живописные поля и луга.

Область целиком расположена на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины. Этим объясняется равнинный характер рельефа с незначительными абсолютными высотами (в основном, 50—150 метров над уровнем моря). Территория Карельского перешейка (а особенно его северо-западной части) отличается пересечённым рельефом, многочисленными скальными выходами и большим количеством озёр. Физическая карта Ленинградской области представлена на рисунке 5.

Более 19500 рек и 1800 озер (крупнейшие - Ладожское и Онежское) образуют гидрологическую сеть Ленинградской области. Карельский перешеек является частью Балтийского кристаллического щита. Высочайшая точка Карельского перешейка — гора Кивисюръя высотой 203 м над уровнем моря (по данным финских довоенных топографов — 205 м), расположена неподалеку от посёлка Новожилово, в урочище Каменная гора [19].

Низменности в основном расположены по берегам Финского залива и Ладожского озера, а также в долинах крупных рек. Основными из них являются Выборгская, Приозерская, Приладожская, Предглинтовая (Приморская), Плюсская, Лужская, Волховская, Свирская и Тихвинская.

Крупнейшими возвышенностями являются Лемболовская, Ижорская, Лодейнопольская, Вепсовская возвышенности и Тихвинская гряда. Наивысшая точка области — гора Гапсельга (291 метр над уровнем моря) — находится на Вепсовской возвышенности. Интересным географическим объектом является Балтийско-Ладожский глинт — высокий (до 40—60 метров) обрыв, протянувшийся более чем на 200 км с запада на восток области. Он является берегом древнего моря.

Территория области находится на стыке двух крупнейших тектонических структур.

Северо-запад области расположен на Балтийском кристаллическом щите, где выходят на поверхность архейские и раннепротерозойские породы. Они образовались более 600 миллионов лет назад в результате мощных вулканических извержений [19].

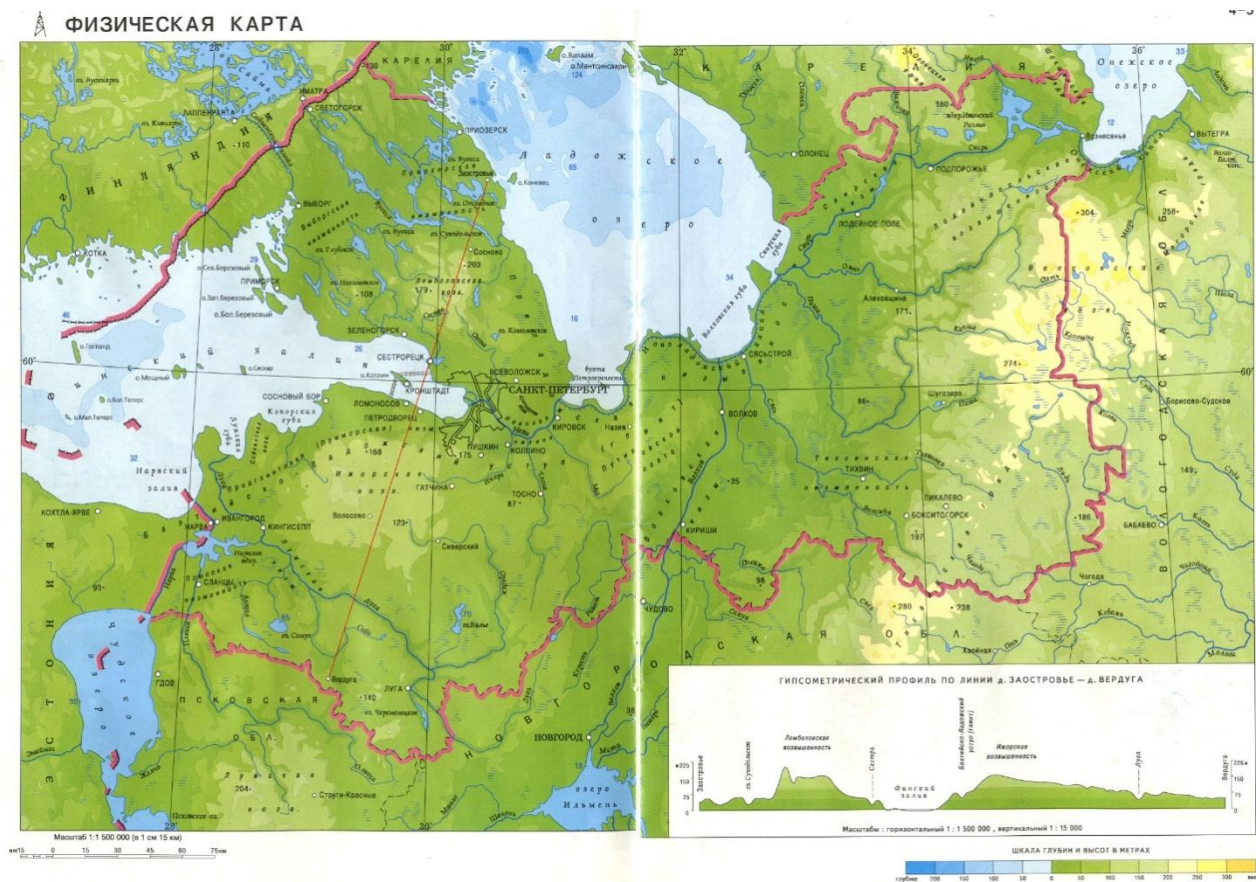


Рис.5 - Физическая карта Ленинградской области

Климатическая характеристика

Ленинградская область относится к зоне умеренного климата, переходного от океанического к континентальному, с умеренно мягкой зимой и умеренно теплым летом.

Основной особенностью климата здесь является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс, которые, в зависимости от района формирования, подразделяются на морские, континентальные и арктические. Морские воздушные массы поступают с запада, юго-запада или северо-запада при перемещении через северо-западные районы России атлантических циклонов. Перепады температуры воздуха, обусловленные сменой воздушных масс, могут значительно превышать амплитуду суточных колебаний и нередко достигают $\pm 20^\circ$ и более [13].

Кроме резких изменений погоды, которые сами по себе являются неблагоприятными факторами, на территории области наблюдаются практически все опасные метеорологические явления: сильные ветры, в т. ч. шквалы и смерчи, снегопады и метели, гололед, туман, сильные морозы и жара, кратковременные интенсивные ливни и продолжительные дожди, грозы, град, лесные пожары, засуха и наводнения.

Среднемесячные и годовые значения метеорологических параметров по данным за период 1961-1990 гг.

- ❖ Среднегодовая температура воздуха в Санкт-Петербурге составляет 5°C , в западных районах области $3,8-5^\circ\text{C}$, в восточных районах $2,7-3,5^\circ\text{C}$;
- ❖ Среднее многолетнее число дней в году со среднесуточной температурой выше 0°C в Санкт-Петербурге составляет 232 дня;
- ❖ Средняя дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону положительных значений весной – 29 марта (по об-

ласти 4-9 апреля), в сторону отрицательных значений осенью – 17 ноября (по области 12-14 ноября);

- ❖ Самый холодный месяц – февраль со средней температурой от -8,0°C до -8,5°C;
- ❖ Самый теплый месяц – июль со средней температурой от 17,4°C до 18,0°C;
- ❖ Годовое количество осадков – 517-557 мм (с поправками на смачивание и ветровой недоучет 637-666 мм);
- ❖ Суточный максимум осадков – 58 мм [20]

Больше всего осадков выпадает на западных и юго-западных (наветренных) склонах возвышенностей и гряд, и наименьшее их количество приходится на побережья водоемов (Ладожского, Онежского озер, Финского залива). Годовое количество осадков составляет 550-850 мм. В годовом ходе минимум осадков наблюдается, как правило, в марте - мае, максимум - в августе.

Средняя годовая температура воздуха на территории Северо - Запада колеблется от 2°C (северо-восточной части) до 4,5°C (в южной). Определяющим фактором в распределении температуры и других характеристик термического режима в холодную половину года является циркуляция атмосферы. В этот период территория области испытывает наибольшее влияние Атлантики [11].

За год в Санкт-Петербурге бывает в среднем 62 солнечных дня. Поэтому, на протяжении большей части года преобладают дни с облачной, пасмурной погодой, рассеянным освещением. Продолжительность дня в Санкт-Петербурге меняется от 5 часов 51 минуты 22 декабря до 18 часов 50 минут 22 июня.

Радиационные условия определяются положением области в северных широтах и, следовательно, большой изменчивостью в течение года высоты стояния солнца над горизонтом и продолжительности дня. В целом, за год радиационный баланс (количество тепла, которое остаётся от суммарной радиации после отражения и излучения) положителен (порядка 30 ккал/см год).

Большая часть этого тепла (до 75%) расходуется на испарение, а остальное - на таяние снега и льда и на нагревание почвы и воздуха [11].

Период с положительным радиационным балансом длится от третьей декады марта до начала ноября. Наибольших значений радиационный баланс достигает в мае, июле, составляя $7,0 - 8,5$ ккал/см², то есть 50 - 60 % суммарной радиации, наименьших - в декабре - январе - $0,5 - 1,2$ ккал/см². (Сумма отрицательного радиационного баланса в среднем равна $2 - 3$ ккал/см²). Годовой радиационный баланс области положителен, но тепла недостаточно для активного испарения, нагревания воздуха, почвы.

По характеру преобладающих ветров в течение года над территорией города можно сделать вывод о преобладании зонального переноса (западно-восточный перенос). Считается, что на территории Ленинградской области в течение всего года преобладают ветры южного, юго-западного, северо-западного и западного направлений, так как повторяемость этих направлений, как правило, превышает 50%, что можно увидеть на примере составленных роз ветров для Ленинградской области. При этом, наиболее часто они отмечаются в холодный период года. В летние месяцы повторяемость ветров юго-западной четверти несколько уменьшается, северной - увеличивается. В холодный период, вследствие близкого расположения областей высокого и низкого давлений, возникают большие горизонтальные градиенты давления. Поэтому в это время ветры наиболее устойчивы по направлению и наибольшие по силе.

Летом, в связи с уменьшением термических контрастов, барическое поле выражено менее чётко, а градиенты давления незначительны. Ветры у поверхности земли ослабевают и становятся менее устойчивыми по направлению [13].

На рассматриваемой территории число дней с грозой колеблется от 10 до 30 за год. Грозовая деятельность наиболее развита с мая по август. На западной территории Ленинградской области грозы могут быть уже в апреле. Но наиболее часто в этой области грозы наблюдаются в июле. В этот месяц отмечается 5 – 7 дней с грозами, а в заболоченных низинах и на наветренных склонах Валдайской возвышенности число их увеличивается до 9. Осенью грозовая дея-

тельность прекращается. В сентябре в Ленинградской области грозы наблюдаются 1 – 2 дня в месяц. В октябре грозы – редкое явление, на территории области отмечаются 1 раз в 10 лет. Зимой они представляют исключительно редкое явление.

По данным аэропорта Пулково среднее число дней с грозой по месяцам представлено на диаграмме (рис. 6,7):

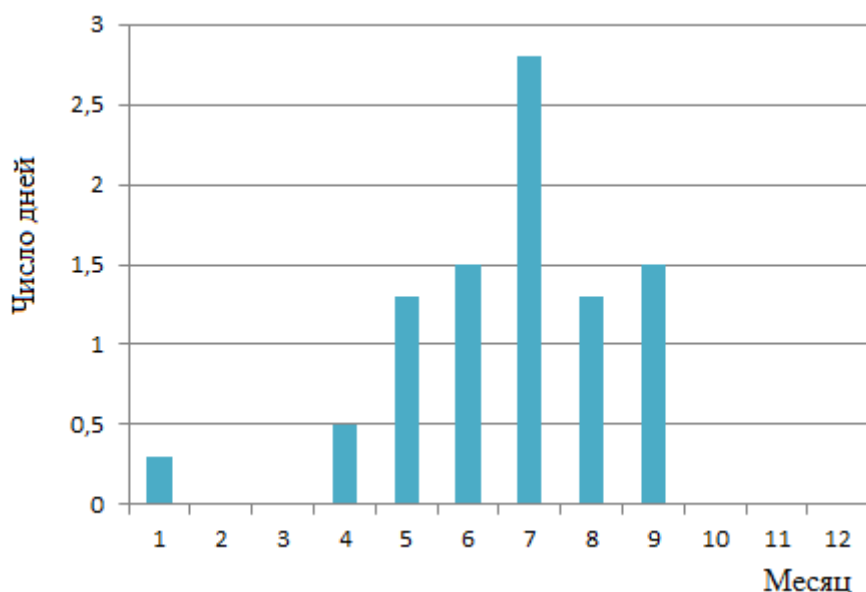


Рис. 6 - Гроза над аэропортом (R=8 км)

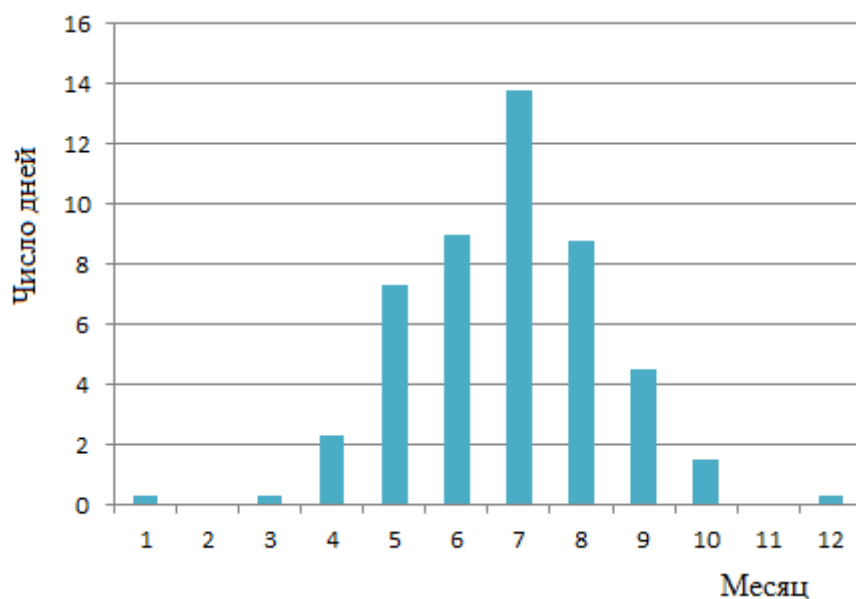


Рис. 7 - Гроза в ближней зоне от аэропорта (R=50 км)

Средняя продолжительность гроз в месяц по данным аэропорта Пулково (рис. 8,9):

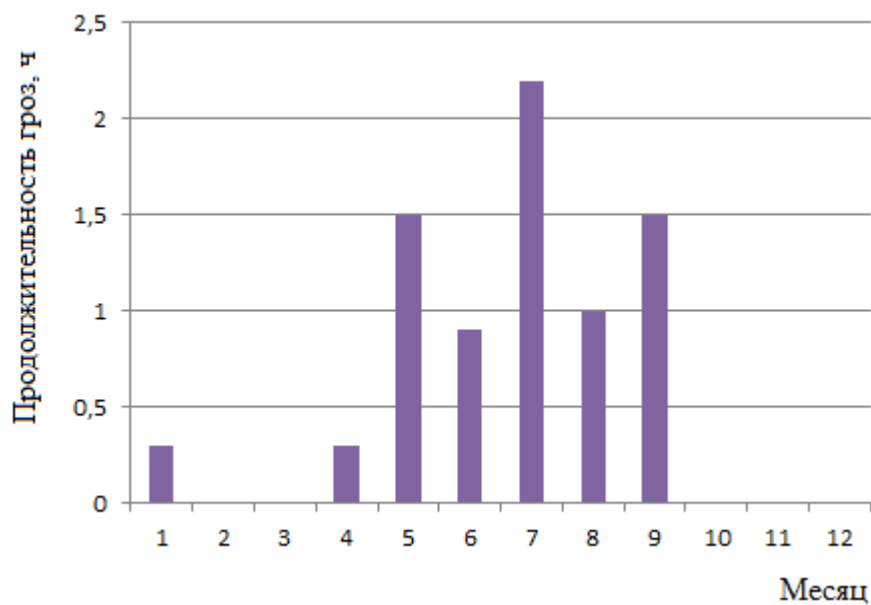


Рис.8 - Продолжительность грозы над аэропортом (R=8 км)

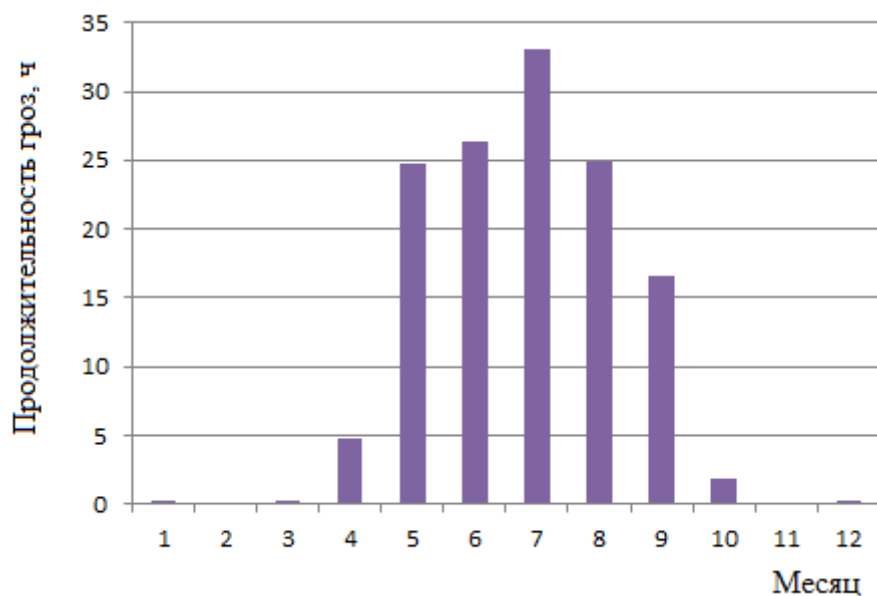


Рис.9 - Продолжительность грозы в ближней зоне от аэропорта (R=50 км)

Глава 3. Состав и принципы работы технических систем контроля облаков

В настоящее время для зондирования атмосферы достаточно широко используются метеорологические радиолокаторы. Рассмотрим работу локатора на примере ДМРЛ-С.

При введении в МРЛ доплеровского режима работы частота радиолокационных сигналов, отраженных от перемещающихся объектов (облаков, осадков), отличается от частоты сигнала, излучаемого РЛС, на величину, пропорциональную радиальной составляющей скорости перемещения, то есть имеет место доплеровский сдвиг частоты. На существовании доплеровского сдвига частоты основан принцип работы доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ) [6].

ДМРЛ способен проводить наблюдения как в некогерентном режиме - режим «Отражаемость», так и в когерентном - режим «Скорость». В режиме «Отражаемость» принцип действия ДМРЛ и локатора типа МРЛ-5 совпадают. При этом радиус обнаружения опасных явлений погоды близок к аналогичному радиусу некогерентного МРЛ-5 и составляет 250 км. Одинаков также и перечень конечных радиолокационных продуктов, получаемых в этом режиме.

Когерентные метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) в сравнении с некогерентными (МРЛ-5 и МРЛ-2) обладают рядом дополнительных возможностей. Когерентность - свойство случайных процессов, которое характеризует их способность взаимно усиливать или ослаблять друг друга при сложении. Случайные процессы некогерентны, если функция их взаимной корреляции равна нулю, и когерентны, если она отлична от нуля. При проведении точных доплеровских измерений требуется обеспечить когерентность принимаемых отраженных сигналов.

Введение когерентного режима в радиолокаторе позволяет измерять дополнительную информацию - радиальную составляющую скорости гидрометеоров. За счет такой информации становится возможным решение принципиально иных, чем в некогерентных МРЛ, задач [9].

В режиме наблюдений «Скорость» ДМРЛ-С функционирует в радиусе 125 км и позволяет при наличии радиоэха:

- выявлять зоны сильного ветра, их временные и пространственные градиенты;
- обнаруживать сдвиги ветра в тропосфере и ее приземном слое
- определять мезомасштабные движения, т.е. локальные вращения масс воздуха;
- обнаруживать фронты порывов, т.е. вытекающие из облака потоки холодного воздуха, движущегося с большой скоростью;
- вычислять дивергенцию ветра, указывающую на сильные нисходящие потоки;
- проводить идентификацию микрошквалов - резких нисходящих движений воздуха в облаке.

Чаще всего перечисленные выше метеорологические явления сопровождаются кучево-дождевой облачностью. Это и доказывает неоспоримую ценность информации, получаемой с помощью доплеровских МРЛ [7].

Технические характеристики прибора указаны в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики ДМРЛ-С.

Наименование		Значение
1	Рабочий диапазон частот, МГц	от 5600 до 5650
2	Зона обзора	
	Инструментальная дальность обнаружения (км)	250
	Минимальная дальность (км), не более	1
	Угол места, град	от -2 до + 91
3	Антенна	
	Тип	зеркальная параболическая
	Ширина ДН в двух плоскостях по уровню 3 дБ на каждой поляризации, град	1,0
	Коэффициент усиления, дБ, не менее	45
	Боковые лепестки, дБ, не более	минус 29
	Поляризация	линейная; ГП / ГП+ВП.

4	Передатчик	
	Тип	Клистронный
	Импульсная мощность, кВт, не менее	15
	Длительность импульса, мкс	1,0; от 25 60 мкс
	Средняя частота зондирования, Гц	509
	Тип модуляции	МОНО/НЧМ
5	Приемник	
	Коэффициент шума, ед, не более	2,5
	Промежуточная частота, МГц	60
	Стабильность зондирующего сигнала, дБ, не менее	50
6	Темп обзора, мин, не более	10
7	Наличие АСКУ	Имеется
8	Надежность	
	Наработка на отказ, ч	3000
	Среднее время восстановления, ч, не более	0,5
9	Обработка	
	АЦП, бит	16
	Опорная частота, МГц	80
	Наличие АПОИ и АВОИ	АПОИ+АВОИ
10	Энергопитание	
	Напряжение, В	3 X 220/380-10%%
	Частота, Гц	50±2%
	Мощность, потребляемая аппаратурой с учетом СОРТ, кВт	не более 10

Доплеровский метеолокатор является высокостабильным радиолокатором, построенным по принципу внутренней когерентности.

Большинство операций по обработке сигнала осуществляется программными способами на ЭВМ.

Упрощенная структурная схема ДМРЛ-С представлена на рисунке 10:



Рис. 10- Структурная схема ДМРЛ-С

В отличие от метеорологических радиолокаторов семейства МРЛ-1,2,5, радиолокатор ДМРЛ-С является доплеровским. Это означает, что клистронный передатчик ДМРЛ-С обеспечивает излучение зондирующего импульса со строго фиксированной фазой, а цифровой приемник ДМРЛ-С позволяет точно измерять фазовый сдвиг Φ_T принятого сигнала на длине волны λ , связанный с доплеровским сдвигом частоты F_D , обусловленным движениями источника радиосигнала со скоростью V_r в направлении на радиолокатор [3]:

$$\Phi_T = 2\pi \times F_D \times T, \quad F_D = -2V_r/\lambda,$$

где V_r – радиальная составляющая скорости источника радиосигнала, λ – длина волны радиоизлучения, $T=1/PRF$ – период зондирования. Множитель 2 в формуле появляется оттого, что увеличение частоты происходит в два этапа: сначала на V_r/λ возрастает частота электрических колебаний в метеоцели, а затем на эту же величину возрастает частота поля отраженного назад сигнала.

Доплеровский метеорологический радиолокатор позволяет измерять радиальную компоненту скорости перемещения гидрометеоров, скорости движения в перпендикулярной по отношению к направлению на радиолокатор плоскости измерены быть не могут.

Радиолокатор, излучающий импульсы с одной частотой PRF, может однозначно измерить скорость, определяемую т.н. «частотой Найквиста» -

$$V_{\max} = PRF \times \lambda/4,$$

Для PRF=1 кГц на $\lambda=5,3$ см «скорость Найквиста» ~ 13,3 м/с, расширение диапазона измеряемых скоростей возможно при использовании нескольких (двух) частот PRF, что используется в ДМРЛ-С.

Программное обеспечение вторичной обработки информации «ГИМЕТ-2010» специально разработано для метеорологической обработки данных радиолокатора ДМРЛ-С по техническому заданию Росгидромета.

В автоматическом режиме строятся р/л карты на высотах от 1 до 15 км над уровнем моря через 1 км, однако можно построить сечение перечисленных параметров на любой высоте до 20 км. Кроме того, в автоматическом режиме строятся карты на трех специальных высотных уровнях:

- 1)- высоте измерения осадков (600 м над ДМРЛ-С),
- 2)- высоте нулевой изотермы,
- 3)- высоте изотермы -22°C .

Самостоятельного метеорологического значения ширина доплеровского спектра W , дифференциальная отражаемость Z_{dr} ; коэффициент кросскорреляции r_{HV} , дифференциальная фаза F_{dp} не имеют. В ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» они используются при расчете метеорологических характеристик (карты метеоявлений, карты распределения фазы гидрометеоров), для уточнения интенсивности осадков [9].

В прогнозировании карты метеоявлений являются наиболее востребованными. Они дают возможность оценить обстановку, соотнеся метеоявления на карте с синоптической ситуацией, и следить в режиме реального времени за развитием ситуации: фиксировать возникновение зон опасных явлений, следить за их развитием и перемещением. Есть режим карты метеоявлений, на которой отображаются все идентифицированные для данных условий метеорологические явления, в то время как на карте опасных метеоявлений (рис.11) отображаются только опасные из них (начиная с “сильных осадков”).

Идентификация грозовой активности радиолокационным методом достигается посредством оценки величины радиолокационной отражаемости и дополнительно привлекаемой метеоинформации. Существует практика увеличения вероятности идентификации гроз за счет привлечения информации с грозо-регистрационных систем. По данным исследований так для МРЛ достигается улучшение вероятности распознавания гроз до 30 % [6].

Совместное применение локаторов и грозопеленгаторов эффективно, т. к. грозопеленгационные системы фиксируют любые электрические разряды, даже не имеющие отношения к грозовым явлениям. Чем многочисленнее (кучнее) на картах расположены фиксируемые грозопеленгационными системами электрические разряды, тем больше вероятность обнаруживаемых гроз на данной территории.

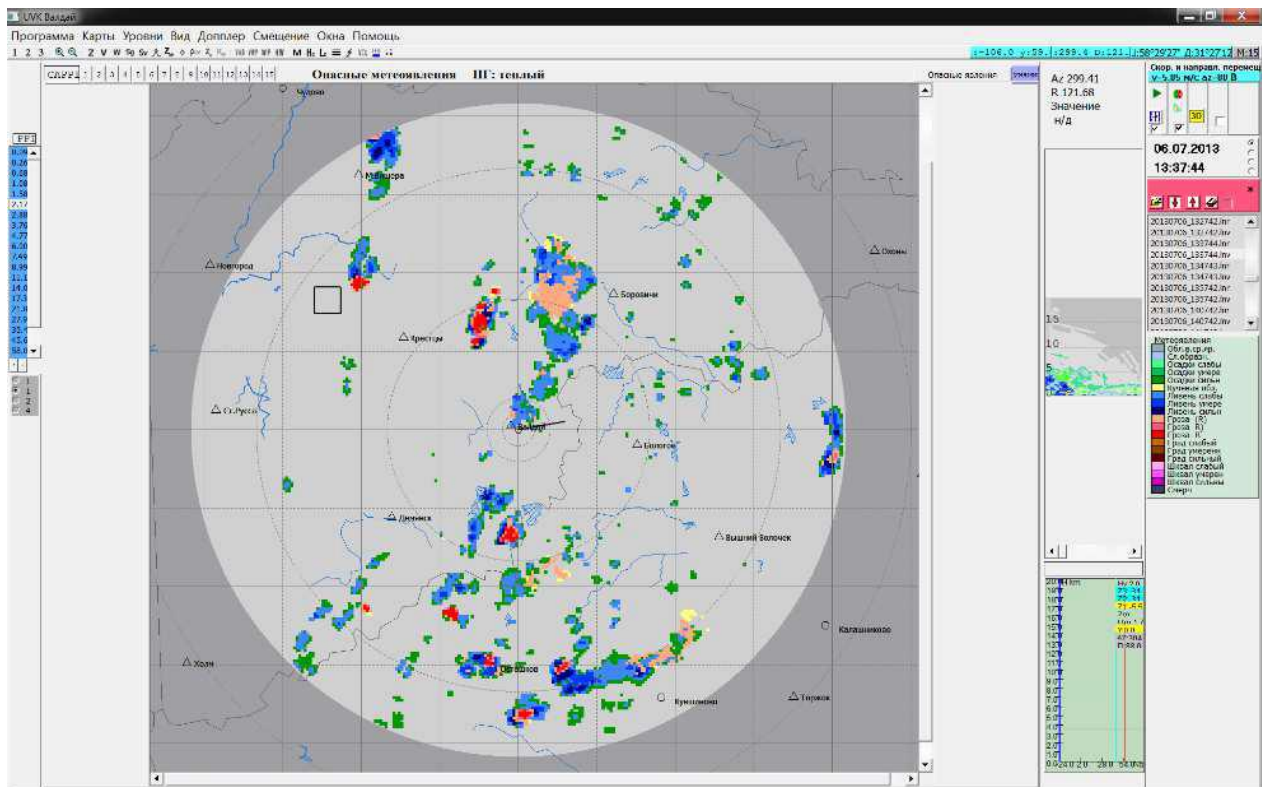


Рис. 11 – Карта опасных метеоявлений в ПО «ГИМЕТ-2010»

Разработаны веб-сервисы, предоставляющие возможность комплексного отображения грозо-регистрационной информации и данных с радиолокаторов.

В рамках грозорегистрационной компоненты доступна информация системы грозопеленгации LS 8000, международной сети WWLLN, а также сети Главной геофизической обсерватории (ГГО) «Алвес».

В настоящее время основой грозопеленгационной сетью (ГПС) в России является разработанная в нашей стране ГПС «Алвес» (разработана в ГГО им. А.И. Воейкова). Пункты сети располагаются на Европейской территории страны и на Урале [21].

Принцип действия регистраторов основан на измерении времени прихода электрической компоненты сигнала от источника ЭМИ по отношению к секундной отметке сигналов точного времени систем GPS.

При работе в составе многопунктовых пеленгационных сетей местоопределения гроз (ПСМГ), определение местоположения молниевых разрядов происходит путём измерения моментов времени приема сигнала сетью регистраторов (не менее четырех). Зафиксированные моменты времени передаются от регистраторов на сервер отображения информации, где производится вычисление координаты молниевых разрядов разностно-дальномерным методом.

Информация грозорегистрационной сети ГГО «Алвес» поступает в организацию по каналу ведомственной сети связи в виде текстовых файлов, содержащих координаты, время начала и конца измерений, а также количество грозозовых событий за указанный промежуток времени. Полученные данные в автоматическом режиме помещаются в базу данных долговременного хранения, размещенную на центральном сервере архивации [21].

Глава 4. Анализ особенностей развития радиолокационной и электрической структуры облака с водяным смерчем

12 августа 2018 г. жители Ленинградской области могли наблюдать редкое явление — водяной смерч. Вихрь прошел по Финскому заливу неподалеку

от поселка Лебяжье под Санкт-Петербургом. Кадр, сделанный очевидцами (рис.12):



Рис. 12 - Кадр видеосъемки с водяным смерчем над Финским заливом 12.08.2018 г.

В работе анализируются данные, полученные с помощью радиолокатора ДМРЛ-С (рис.13), грозопеленгационной сети, а также аэрологических наблюдений кучево-дождевого облака над Финским заливом 12 августа 2018 года для периода с 14:00 по 16:00 ВСВ. В ходе эволюции грозового облака над водой сформировались два смерча, наблюдались ливневые осадки.

Состояние атмосферы в момент наблюдения явления

Район возникновения смерча находился в области действия циклона, который был в стадии заполнения, при этом центр циклона располагался в непосредственной близости от места исследования. Также возникшим условиям неустойчивости поспособствовало прохождения фронта окклюзии в момент наблюдения явления. Облако являлось частью грозового фронта, который двигался в северо-восточном направлении. По спутниковым наблюдениям можно определить, что исследуемое облако находилось в облачном вихре циклона и

Анализ данных аэрологических наблюдений на станции Воейково представлен в таблице 2.

Таблица 2

Данные аэрологических наблюдений.

<i>Рассчитываемый параметр</i>	<i>Значение</i>
Устойчивость атмосферы	Неустойчивая
Температурная инверсия	Пограничный слой; слой 4 км; слой 4,6 км
Общая энергия неустойчивости (CAPE)	1542 Дж/кг
Энергия неустойчивости в слое 0-3 км	459 Дж/кг
Уровень свободной конвекции	На высоте 989 гПа
Температура точки росы над водной поверхностью	18,1 °С
Индекс смерчегенеза	16,2 °С*
Параметр завихренности атмосферы VGP	0,48 - указывает на возможность формирования смерчей
Высота уровня конденсации LCL по расчетным данным	59 м
Высота конвективного уровня конденсации CCL	505 м

Уровень конвекции EQLV	8831 м
Влагосодержание атмосферы	27,1 мм
Разность температуры воды и температуры на высоте 850 гПа	13,0 °С
Глубина конвекции (разность между уровнем конвекции и конденсации, $\Delta Z = EQLV - LCL$)	8772 м

* - По данным [15] подавляющее число смерчей на территории Северной Евразии характеризуется достаточно высокими значениями $3D (>12^\circ\text{C})$. Более 2/3 смерчей характеризуются закритическими значениями $3D > 15,5^\circ\text{C}$.

Развитие облака

В 14 ч 00 мин ВСВ впервые появилось радиоэхо по данным ДМРЛ-С. Исследуемое облако образовалось над Финским заливом и просуществовало до 120-ой минуты, после чего слилось с несколькими конвективными ячейками. Большую часть жизни облако находилось над водной поверхностью. Начиная с 70-ой минуты, облако начало переходить на сушу. Когда в облаке наблюдался смерч (80-ая минута), большая часть C_b располагалась над заливом.

В ходе развития рассматриваемого C_b можно выделить несколько особых моментов (таблица 3).

Таблица 3

Развитие облака во времени.

Время наблюдения	14:00 (0 минута)	14: 20 (20 минута)	15:00 (60минута)	15:10 (70 минута)	15:20 (80 минута)	16:00 (120 минута)
Стадия явления	Начало наблюдения	Первые разряды молнии	Макс. частота разрядов молнии	Слияние облаков	Появление водяного смерча	Конец наблюдения

Данные отражаемости облака по ходу его развития на диаграмме (рис 14).

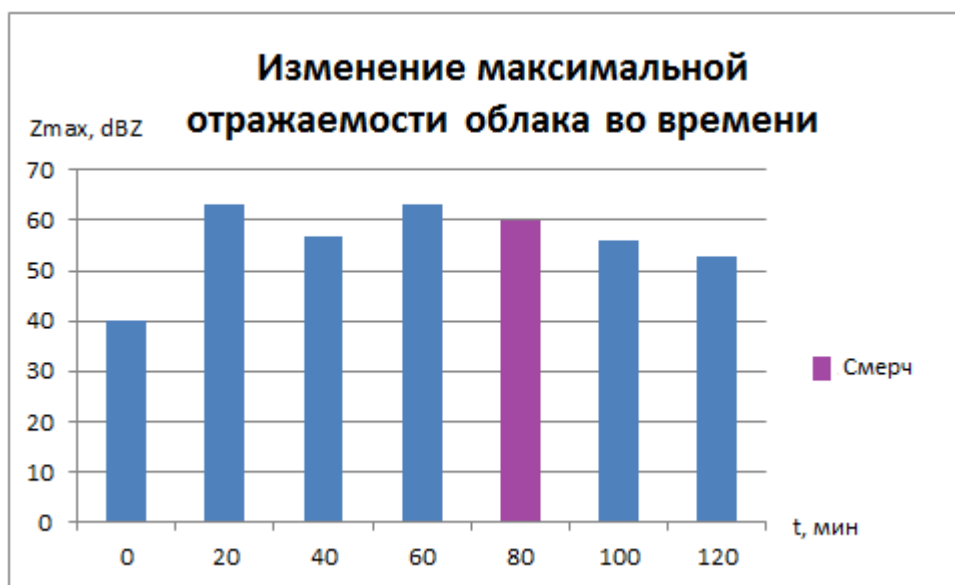


Рис. 14 - Зависимость отражаемости облака от стадии развития (времени)

На рисунке 15 показан ход во времени высоты верхней границы исследуемого облака Нвго по измерениям радиолокатора ДМРЛ-С и приводится также частота молний по данным грозопеленгационной системы «Алвес».

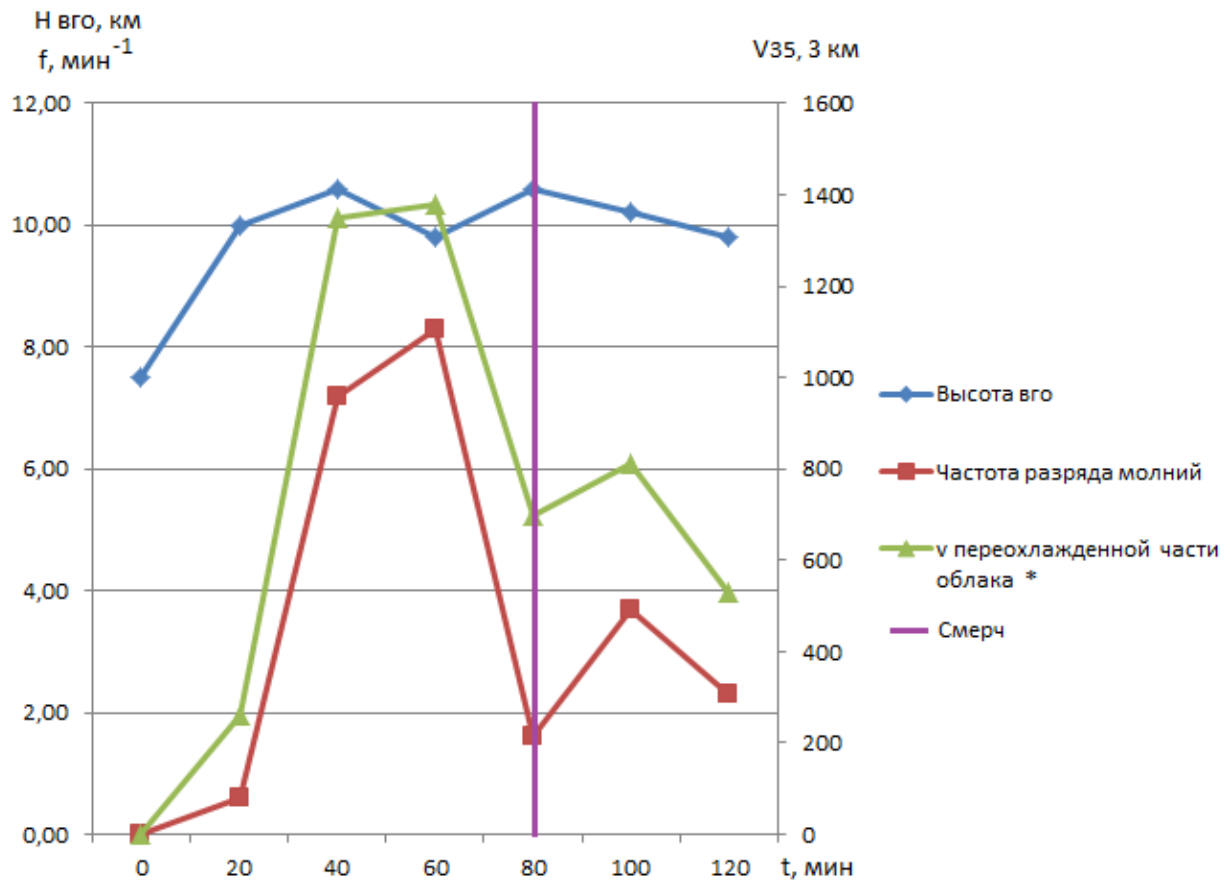


Рис. 15 - Временной ход частоты молниевых разрядов, переохлаждённой части облака и высоты верхней границы облака

* - Объём облака выше нулевой изотермы с отражаемостью более 35 dBZ (V35)

До начала грозовой активности (0-ая и 10-ая минуты) высота верхней границы Нвг не превышала 7.5 км, максимальная отражаемость Z_{max} была менее 50 dBZ. На 10-ой минуте начинают выпадать ливневые осадки с максимальной интенсивностью около 30 мм/ч. В момент появления первых разрядов (20 мин) Нвг достигает 10 км, Z_{max} превышает 60 dBZ. частота молний F составила 0,6 мин⁻¹. Начиная с этого момента, S_b достигает максимума в своем развитии и переходит в стадию зрелости, находясь в ней все оставшееся наблюдаемое время жизни. На этом временном промежутке максимальная радиолокационная отражаемость составила 53–63 dBZ, Нвг по данным ДМРЛ была в

пределах от 9.9 до 10.8 км. Облако находилось на расстоянии около 90 км от ДМРЛ. На таком расстоянии определение Нвго радиолокационным методом связано с наличием погрешностей.

В зависимости от развития облака регистрировалась разная частота молниевых разрядов (рис. 16).

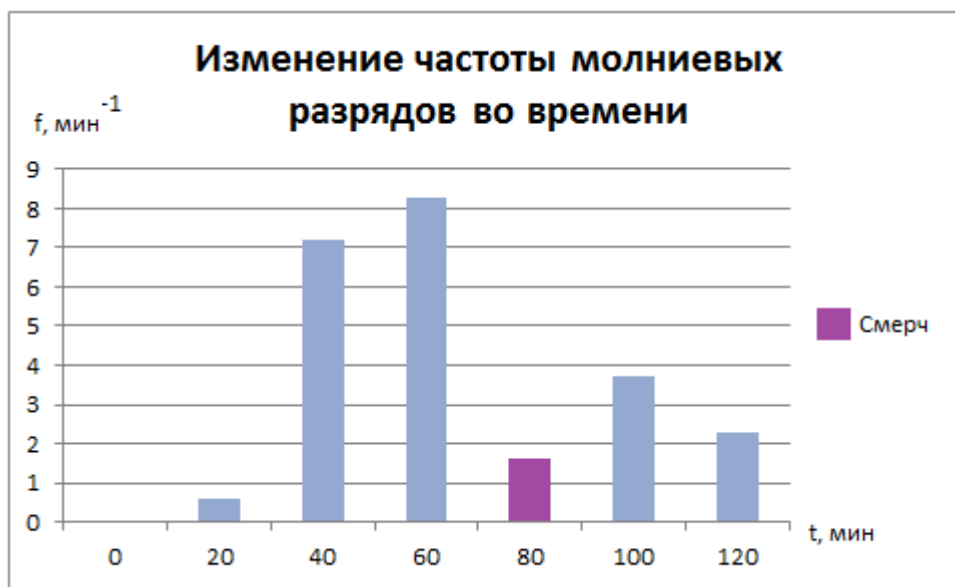


Рис. 16 - Зависимость частоты разрядов молнии от стадии развития облака

Из рисунков 15 и 16 видно, что на 70-й минуте частота молниевых разрядов уменьшается, на 80-й минуте (когда образовался смерч) частота снова увеличивается. Частота молний на 60-ой минуте была максимальной, составив 8.3 мин⁻¹, на 70-ой минуте происходит ее резкое уменьшение до 1.6 мин⁻¹. Далее, после слияния облаков, отмечено увеличение F до 3.7 мин⁻¹. Появление смерча (80 мин) практически не привело к изменениям в частоте молний. В момент окончания наблюдений фиксировались разряды с частотой 2,3 мин⁻¹. Таким образом, повышенная электрическая активность облака наблюдалась за 20 минут до формирования смерча.

При анализе временного хода контролируемых параметров при исследовании смерча на Северо-Западе и на Северном Кавказе [10] было установлено, что при образовании водяного смерча, наблюдалось существенное уменьшение

частоты молний с последующим ростом. Подобные эффекты наблюдались и в экспериментах по исследованию торнадо в США [17]. Предполагают, что вихри в облаке временно разрушают или ослабляют механизм генерации зарядов в облаке, что проявляется в снижении частоты молний. Обнаруженный эффект может служить предиктором водяных смерчей (торнадо) при подтверждении его в дальнейших исследованиях.

Одним из признаков смерча, который можно получить по данным радиолокатора, согласно [2] является наличие близко расположенных радиолокационных объемов с положительной и отрицательной доплеровской скоростью.

Радиальная доплеровская скорость V_r в большей части исследуемого облака на протяжении всей его жизни имела отрицательные значения. При этом в отдельных частях S_b на разных высотах отмечались и объемы с положительной доплеровской скоростью. Изменения пропорции объемов облака с разными по знаку V_r в таблице 4.

Таблица 4

Изменения пропорции объёма облака с положительной V_r .

Время наблюдения за облаком, мин	Угол, °	Наличие V_+	Часть облака
0		Нет	Во всём объёме
10	0,29; 1,58	V_+	Увеличение доли
20	1,1	V_+	Увеличение доли
60	0,29	V_+	21%
70	Наименьший угол	V_+	1%
80	Для всех углов	V_+	35%
120	Для всех углов	V_+	$\leq 2\%$

Наличие разной по знаку доплеровской скорости в облаке и опускание этой области вниз может являться идентификатором зарождающегося мезоциклона и стать предиктором при наукастинге смерча [14].

В целом в рассматриваемых ячейках радиальная доплеровская скорость V_r имела отрицательные значения. Это связано с движением по направлению к радиолокатору фронтальной облачной гряды, частью которой являются сливающиеся облака. В основной области с положительной доплеровской скоростью до слияния были связаны с восточным облаком.

Сразу после слияния (15 ч 20 мин ВСВ) в центре объединенного облака оказались области с разными по направлению значениями доплеровской скорости. В этой области наибольшее значение отрицательной V_r составило $-56,5$ м/с на высоте 2,8 км. Вероятно, на границе этих областей располагался центр вращения мезоциклона, в котором наблюдался смерч. Согласно в основном куполе грозового облака находятся наибольшие по размерам и интенсивности восходящие потоки. В центре мезоциклона также наблюдались максимальные значения отражаемости (> 50 dBZ). Такую отражаемость можно связать с подъёмом облачных капель и капель, образовавшихся в результате подъема воды из Финского залива [16].

На следующем обзоре ДМРЛ (15 ч 30 мин ВСВ) смерч уже не наблюдался.

Область облака с различными по знаку значениями V_r распространяется до высоты изотермы -22 °С. Эта область связана с вращением в смерче [14]. На наличие вихря также указывает вытянутая область с большими значениями (> 8 м/с) ширины доплеровского спектра радиальных скоростей W . Радиальная скорость характеризует разброс скоростей V_r в импульсном объеме и позволяет грубо оценить степень развития турбулентности [16]. В этом месте находится так называемый «столб Zdr» [17] – узкая область с дифференциальной отражаемостью более 3 dB, которая распространяется выше нулевой изотермы. В исследовании водяных смерчей [17] такую область связывают с поднятыми сильным восходящим потоком крупными каплями. В нашем случае столб Zdr

имеет высоту порядка 4 км, выше Zdr резко уменьшается до значения около 0 dB.

Проанализируем взаимосвязь радиолокационных характеристик облака с его электрической активностью с целью определения возможности оценки последней в условиях отсутствия данных гронопеленгационных сетей.

Как видно из приведенных в таблице 5 данных, максимальный коэффициент корреляции наблюдается между F и V35 ($r = 0.95$), наименьший между F и максимальной интенсивностью осадков Im ($r = 0.51$) [16].

Анализ показал, что наиболее тесная связь за весь период наблюдения за анализируемым облаком присутствует у частоты молний с объемами переохлажденной части с отражаемостями 30 и 35 dBZ ($r = 0,96$, $r = 0,95$). Похожие результаты были получены ранее при анализе развития Сб как в условиях Северо-Запада, так и для Северо - Кавказского региона [10].

При анализе временного хода контролируемых параметров было установлено, что при образовании водяного смерча (70 минута), наблюдалось существенное уменьшение частоты молний с последующим ростом. Подобные эффекты наблюдались и в экспериментах по исследованию торнадо в США [17]. Возможно, что вихри в облаке временно разрушают или ослабляют механизм генерации зарядов в облаке, что проявляется в снижении частоты молний. Обнаруженный эффект может служить предиктором водяных смерчей (торнадо) при подтверждении его в дальнейших исследованиях.

Из радиолокационных данных, характеризующих осадки, более тесная связь наблюдается у потока осадков с частотой разрядов ($r=0.90$). Высокий коэффициент корреляции между F и У в данном эксперименте не установлен.

Для целей диагноза и наукастинга смерча особое значение имеют характеристики облака на стадии развития, предшествующей появлению этого опасного явления - в данном случае смерча. Анализ регрессионных связей исследованных выше параметров отдельно для периода развития с нулевой по 60-ю минуту показывает, что описанные выше тенденции сохраняются и на стадии развития, предшествующей смерчу. Максимальная корреляция частоты разря-

дов наблюдается с V30 ($r = 0,97$) и V35 ($r = 0,95$), минимальная с Im ($r = 0,50$). Коэффициенты регрессионных уравнений также меняются несущественно [16]. Это свидетельствует о том, что вихрь наблюдаемого масштаба не привел к существенному изменению характера связей процессов электризации и осадкообразования данного облака.

Таблица 5

Характеристики регрессионных связей электрических и радиолокационных параметров смерчевого (грозового) облака над Финским заливом.

Радиолокационный параметр	Для всего времени наблюдения за облаком	Для времени 0-60 мин
	Регрессионное уравнение (y) и коэффициент корреляции (r)	Регрессионное уравнение (y) и коэффициент корреляции (r)
Объем облака с отражаемостью >30ББ2, км ³	$y = -8.96 + 0.04 * x$ $r = 0.96$	$y = -8.09 + 0.04 * x$ $r = 0.97$
Объем облака с отражаемостью >35ББ2 выше изотермы 0°C, км	$y = -7.41 + 0.06 * x$ $r = 0.95$	$y = -7.45 + 0.06 * x$ $r = 0.95$
Объем облака с отражаемостью >40ББ2 выше изотермы 0°C, км ³	$y = -2.45 + 0.10 * x$ $r = 0.90$	$y = -4.73 + 0.10 * x$ $r = 0.91$

Объем облака с отражаемостью >45ББ2 выше изотермы 0°C, км ³	$y = 5.00 + 0.20*x$ $r = 0.78$	$y = 1.78 + 0.21*x$ $r = 0.77$
Поток осадков (O), м ³ /сек	$y = -2.89 + 0.04*x$ $r = 0.90$	$y = -9.40 + 0.05*x$ $r = 0.92$
Радиолокационный критерий	$y = -43.45 + 1.60*x$ $r = 0.60$	$y = -47.04 + 1.85*x$ $r = 0.67$

Показано, что существует корреляция (слабее, чем для случая облака со смерчем) между числом электрических разрядов и рассматриваемыми радиолокационными характеристиками. Наиболее тесная связь F наблюдается с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 50 dBZ и высотой верхней границы облака [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа данных можно сделать следующее заключение. Существует связь между частотой разрядов в исследуемом облаке и его радиолокационными характеристиками. Наиболее тесной эта связь оказалась для объема переохлажденной части облака, а именно - объема с отражаемостью более 30 dBZ.

Согласно радиолокационным данным, эволюция облака сопровождалась сильными осадками (в т.ч. градом), молниевыми разрядами (наибольшая частота которых составила 8.3 мин⁻¹) и большим количеством мелкомасштабных турбулентных вертикальных движений.

При возникновении смерча частота молний уменьшается, дальше наблюдается рост частоты разрядов.

По многим показателям в рассматриваемый день была значительная неустойчивость. Использование индекса 3D, который несложно вычислить, имея только данные о приземной температуре воздуха и приземной температуре точки росы, оказался хорошим индикатором смерчегенеза.

Для идентификации смерча в настоящее время часто используют поляризационные радиолокационные параметры. Основным признаком водяного смерча по этим данным является узкая область выше 0 °C изотермы, где $Z_{dr} > 3$ dB. Эта область хорошо прослеживалась. Дополнительными признаками наличия сильного вихря являются: большие значения W (> 8 м/с) и зона резкой смены знака доплеровской скорости.

Судя по изученной литературе, на сегодняшний день радиолокационные методы являются основными в прогнозировании смерчей. Также стоит отметить локатор ДМРЛ –С, который позволяет использовать новые возможности по сравнению с МРЛ.

В ходе выполнения работы были выполнены задачи:

- Изучена литература по теме работы.

- Проведён анализ экспериментальных данных от 12 августа 2018г.
- Сделано обобщение и заключение об особенностях развития радиолокационной и электрической структуры облака с водяным смерчем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атлас облаков. Пояснительный текст. Под ред. Хргиана А.Х. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1957 – 68 с.
2. Бекряев В.И., Пономарев Ю.Ф., Синькевич А.А., Чубарина Е.В. Результаты исследований процесса кристаллизации конвективных облаков после воздействий. // В сб.: Вопросы физики облаков — Л., Гидрометеоиздат, 1987, с. 131—136.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического лоатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – Москва, 2014. – 110с.
4. Гусаченко Д.В. Гидродинамическое моделирование мезо- и микромасштабных вихрей (смерчей). Магистерская диссертация. – СПб, 2018. – 147 с.
5. Ермаков Е.И., Стожков Ю.И. Физика грозových облаков / краткие сообщения по физике. – М.: ФИАН, 2004. – 438 с.
6. Калинин Н.А. Исследование атмосферы с помощью импульсных метеорологических радиолокаторов / Н.А. Калинин; Перм. ун-т, Пермь, 2000.
7. Калинин Н.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова / Метеорология и гидрология. 2002. – № 8. – С. 53-60.
8. Кашлева. Атмосферное электричество. Учебное пособие. - СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 116 с.
9. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормоповещения и метеообеспечения авиации. – СПб, 2013. – 137 с.
10. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Попов В.Б., Торопова М.Л., Кашлева Л. В. О возможности прогноза и диагноза опасных явлений погоды по данным о частоте молний: материалы III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», – Спб.: ХИМИЗДАТ, 2019. – с. 616-620.

11. Овсянникова М.Н. Биоклиматическая характеристика г. Санкт-Петербург. Бакалаврская работа. – Туапсе, 2016. – 44 с.
12. Смерчи на территории СССР. Снитковский А.И. / Метеорология и гидрология, 1987. – №2.
13. Справочник по климату СССР Выпуск 3 Часть II. – Ленинград, 1965
14. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем в Северо-Западном регионе России. В.Б. Попов, А.А. Синькевич, Дж. Янг, Ю.П. Михайловский, М.Л. Торопова, Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, Д.С. Старых
15. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы. — Доклады академии наук, 2017. – т. 477, № 6. – с. 722—727.
16. Электризация кучево-дождевого облака с водяным смерчем и зависимость частоты электрических разрядов от радиолокационных характеристик. А. А. Синькевич , Ю. П. Михайловский , М. Л. Торопова , С. Д. Павар , Б. Попов, Д. С. Старых, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей. ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова», Санкт-Петербург.
17. Gungle B., Krider E. P. Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms. — J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, No. D19, 15 pp.
18. Ryzhkov, A. V., Schuur T. J., Burgess D. W., and Zrnicek D. S. Polarimetric tornado detection. — J. Appl. Meteor., 2005, vol. 44, pp. 557—570.
19. Большая российская энциклопедия. – [Электронный ресурс]. – <https://bigenc.ru/geography/text/2139438>
20. Климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>
21. Описание аппаратно-программного комплекса грозопеленгационной системы (АПК ГПС) «Alwes 9.301» – [Электронный ресурс]. – URL: <http://alwes.ru/index2.php/>