



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Валидация данных об осадках и грозах, полученных
ДМРЛ «Пулково»

Исполнитель Колбин Вячеслав Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

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

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой
(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«28» мая 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения.....	4
Введение.....	5
1 Проведение наблюдений на наземных метеостанциях и с помощью ДМРЛ.....	9
1.1 Метеорологические наблюдения	9
1.1.1 Метеорологические станции и метеорологическая сеть.....	10
1.1.2 Классификация метеорологических станций.....	12
1.1.3 Методика проведения наблюдений за осадками и грозами на наземных метеостанциях.....	15
1.2 Доплеровские метеорологические радиолокаторы. Общие сведения.....	20
1.2.1 Методика определения зон осадков и интенсивности осадков с помощью ДМРЛ.....	27
1.2.2 Методика определения зон грозовой активности с помощью ДМРЛ.....	30
2 Валидация данных об осадках и грозах, полученных с помощью ДМРЛ.....	34
2.1 Характеристики качества информации, получаемой с ДМРЛ.....	34
2.2 Архив данных и анализ результатов, полученный в процессе валидации.....	36
3 Радиолокационное исследование процесса слияния конвективных облачных систем.....	49
3.1 Механизм слияний конвективных облачных систем.....	50

	Стр.
3.2 Архив данных и анализ результатов, полученных в результате исследования процесса слияния конвективных облачных систем...	51
4 Оценка продолжительности и интенсивности ливневых осадков по данным ДМРЛ.....	64
4.1 Прогнозирование с применением математического аппарата множественной регрессии.....	65
4.2 Архив радиолокационных данных и анализ результатов, полученных в результате исследования.....	66
4.2.1 Корреляционный анализ.....	67
4.2.2 Уравнения регрессии продолжительности и интенсивности ливневых осадков.....	69
Заключение.....	71
Список используемой литературы.....	73
Приложение А – Результаты, полученные в процессе валидации.....	77
Приложение Б – Архив данных, составленный в результате исследования процесса слияния конвективных облачных систем...	82
Приложение В – Архив данных, составленный в процессе исследования оценки продолжительности и интенсивности ливневых осадков.....	97

СОКРАЩЕНИЯ

- МРЛ – метеорологический радиолокатор;
- АЯ – атмосферное явление;
- ДМРЛ – доплеровский метеорологический радиолокатор;
- МС – метеорологическая станция;
- ВМО – Всемирная метеорологическая организация;
- АМС – автоматическая метеостанция;
- UTC – Всемирное координированное время;
- ВГО – верхняя граница облачности;
- АМРК – автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс;
- ОЯ – опасное явление;
- ЛТ – ложная тревога;
- КЯ – конвективная ячейка.

ВВЕДЕНИЕ

Метеорологические наблюдения проводятся в силу ряда причин. Данные таких наблюдений используются для подготовки в режиме реального времени метеорологических анализов, прогнозов и предупреждений о неблагоприятной погоде, для исследования климата, в текущей деятельности отраслей экономики, зависящих от погоды (например, обеспечение полетов воздушных судов с местных аэродромов, строительных работ на суше и море), для целей гидрологии и сельскохозяйственной метеорологии и для проведения научных исследований в области метеорологии и климатологии.

Широкое применение радиолокационных методов для наблюдения за состоянием атмосферы определяется важностью получения оперативной информации о полях облачности и связанных с ними явлений (интенсивные ливни, гроза, град). Из-за большой пространственной и временной изменчивости облаков с опасными явлениями для их обнаружения и исследования лучше всего подходит именно радиолокационный метод, который отличается от других известных методов своей безынерционностью и возможностью охвата больших площадей при относительно высокой разрешающей способности в пространстве. Наибольшую пользу радиолокационный метод приносит при применении специализированных метеорологических радиолокаторов (МРЛ), созданных с учетом всей специфики облачности как метеорологической радиоцели. Сеть радиолокационного штормоповещения нашей страны создана на базе доплеровских МРЛ (ДМРЛ), которые предназначены для:

- обнаружения и определения геометрических размеров и местоположения облаков и связанных с ними опасных явлений погоды (ливни, грозы, град);

- определения скорости и направления перемещения зон радиоэхо кучево-дождевых облаков и зон радиоэхо осадков обложного характера (из N s);
- определения верхней границы радиоэхо всех обнаруживаемых облаков и нижней границы радиоэхо облаков верхнего и среднего ярусов;
- определения тенденции изменения радиолокационных характеристик облачного поля (облачной системы);
- определения эволюции кучево-дождевых облаков;
- определения высот нулевой изотермы при наличии слоисто-дождевых облаков;
- оценки мгновенной максимальной интенсивности выпадающих осадков в радиусе до 90 км от локатора — определения площадей, занятых радиоэхо осадков.

К настоящему времени четко определились области применения ДМРЛ:

- 1) оперативная служба: краткосрочный прогноз погоды, измерение интенсивности и оценка по градациям интенсивности и количества жидких осадков, активные воздействия на градовые облака и конвективные облака с целью искусственного вызывания осадков;
- 2) исследовательская работа: участие в комплексных исследованиях механизма погоды в конкретных районах, изучение взаимодействия мезо- и макромасштабных процессов, выраженных в поле облачности. Оперативная информация ДМРЛ используется в практике синоптического анализа и прогноза погоды, для штормового оповещения, при обслуживании авиации, сельского хозяйства, больших промышленных центров и органов энергетики.

Эффективность радиолокационной метеорологической информации для диагноза и прогноза погоды возрастает в районах с редкой сетью метеостанций, а также при использовании информации с территории, соизмеримой с масштабами синоптических процессов (1000–2000 км).

Таким образом, информация, получаемая с помощью ДМРЛ, имеет особое значение в современной метеорологии, позволяя повысить оперативность и эффективность работы оперативной штормовой службы.

Целью данной работы является освоить методику проведения наблюдений за ливневыми осадками и грозами с помощью ДМРЛ, а также провести качественную и количественную оценку информации, получаемую в результате его работы при решении различных задач.

Для достижения главной цели, поставлены следующие *задачи*:

- провести валидацию данных об осадках и грозах, полученных с помощью ДМРЛ;
- исследовать процесс слияния конвективных облачных систем;
- исследовать возможность оценки продолжительности и интенсивности ливневых осадков по данным ДМРЛ, полученных на ранней стадии их формирования, и на основе этого исследовать возможность их прогнозирования с помощью математического аппарата множественной регрессии.

Структура работы: работа состоит из введения, четырех глав, которые разделены на подглавы, заключения, списка использованных источников и приложения.

Первая глава посвящена теоретическим основам о наземных метеорологических станциях и доплеровских МРЛ, а также информации, получаемой с помощью их. *Вторая глава* посвящена проведению валидации данных гроз об осадках и грозах, полученных с помощью ДМРЛ. В *третьей главе* представлены результаты исследования слияния конвективных облачных систем. В *четвертой главе* представлены результаты оценки продолжительности и интенсивности ливневых осадков по данным ДМРЛ, также исследован способ их прогнозирования с помощью математического

аппарата множественной регрессии. В *заключение* работы сделаны основные выводы по результатам исследования.

Для написания данной выпускной квалификационной работы использовались как труды отечественных авторов, так и зарубежных, позволяющие изучить проблематику вопроса целиком.

1 Проведение наблюдений на наземных метеостанциях и с помощью ДМРЛ

1.1 Метеорологические наблюдения

Фактические сведения о состоянии атмосферы, погоды мы получаем с помощью метеорологических наблюдений [1].

Метеорологические наблюдения – это количественное измерение метеорологических параметров и регистрация различного рода атмосферных явлений. Метеорологические наблюдения делят на контактные и дистанционные.

Контактные методы измерения заключаются в непосредственном физическом контакте чувствительного элемента прибора с измеряемым объектом (воздушная среда, почва и т.д.). К ним относят все виды измерений на метеорологических, аэрологических станциях, самолетное и ракетное зондирование атмосферы [2, 4].

Дистанционные наблюдения основаны на методах активной и пассивной локации. Пассивная локация заключается в измерении величины электромагнитного излучения исследуемого объекта. К таким методам относят все спутниковые измерения. При активной радиолокации прибор (например, локатор) сам испускает различного рода волны, фиксируя принятый сигнал, который отразился, рассеялся от объекта, либо поглотился. К активной локации относятся радиолокационные, лидарные (лазерные) и содарные наблюдения. Величину интенсивности излучения (пассивная локация) или электромагнитного эха (активная локация) по различным физическим методикам переводят в количественные величины, которые характеризуют состояние объекта [2, 3].

К *метеорологическим величинам* относят температуру, характеристики влажности (относительная и абсолютная влажность, парциальное давление, массовая доля водяного пара, отношение смеси и др.), атмосферное давление, потоки тепла и лучистой энергии, скорость и направление ветра, метеорологическая дальность видимости, количество осадков, количество облаков и высота их нижней границы и др. Также к ним относят величины, которые непосредственно не отражают свойства атмосферы и атмосферных процессов, но тесно связаны с ними, например, температура поверхности почвы, высота снежного покрова и другие [4, 5]. Кроме основных метеорологических параметров существует еще перечень атмосферных явлений, которые также отмечаются на всех станциях – туман, гроза, град, гало и другие. Каждое из этих явлений оценивается качественно, т.е. по принципу «есть явление» или «нет явления». Также некоторые виды явлений классифицируются по шкале интенсивности (слабое, умеренное или сильное явление), например, «сильная метель», «умеренная гроза» [6].

Все перечисленные ранее метеонаблюдения проводятся на наземных метеорологических станциях и называются *наземными метеорологическими наблюдениями*. Кроме них также существуют *аэрологические наблюдения* – это измерение всех основных метеорологических величин (температура и влажность воздуха, атмосферное давление и параметры ветра) в свободной атмосфере. Такого рода наблюдения необходимы для составления прогноза погоды (синоптическими или численными методами), а также для обслуживания полетов авиации. Наблюдения за состоянием атмосферы высоких слоев (выше 40 км) ведется с помощью ракетного зондирования [5].

1.1.1 Метеорологические станции и метеорологическая сеть

Метеорологическая станция (МС) – это специальное учреждение для проведения метеорологических наблюдений в месте, которое удовлетворяет всем необходимым требованиям, например, рельеф местности,

непосредственная близость жилых зданий и других объектов. МС должна располагаться в таком месте, которое наиболее типично для данного района, в котором планируются проводиться метеорологические наблюдения. В состав МС входит метеорологическая площадка (см. рисунок 1.1), где расположены основные измерительные приборы для проведения метеорологических наблюдений, и здания, в котором живет и работает персонал станции, а также устанавливаются барометры и барографы, содержится запасной инвентарь и т.д. МС оборудуется всей необходимой аппаратурой, с помощью которой ведутся наблюдения в установленные сроки и в определенной последовательности [6, 7].



Рисунок 1.1 – Метеорологическая площадка

Поскольку атмосфера является самой подвижной оболочкой земного шара, следовательно, процессы, которые будут определять погоду в данном месте, развиваются на достаточно больших пространствах. Помимо этого, результаты метеонаблюдений служат для постановки начальных и граничных

условий для математических моделей атмосферы, благодаря которым в последние десятилетия на всех мировых метеоцентрах составляют прогнозы погоды. Такие важные обстоятельства вынуждают размещать МС на огромных территориях и по возможности на равном удалении друг от друга. Всемирная метеорологическая сеть в идеале должна представлять собой набор станций, расположенные на равном расстоянии друг от друга не более чем на 100 км – это примерно 32 500 точек наблюдения по всему земному шару. Но на самом деле, в настоящее время международная сеть Всемирной метеорологической организации (ВМО) насчитывает около 10 тыс. метеорологических и аэрологических станций [6].

В России, как и в большинстве других стран мира, есть своя государственная метеорологическая сеть Росгидромета, которая по состоянию на 1 января 2015 г. включает 1921 станцию и 3079 гидрометеорологических постов, 115 аэрологических станций (см. рисунок 1.2). Программа модернизации Гидрометслужбы предполагает увеличение числа станций до 5400 – в основном за счет установки автоматических метеостанций (АМС) [2, 9].

1.1.2 Классификация метеорологических станций

Все МС делятся на три разряда. Станции первого разряда производят наблюдения по полной программе, затем обрабатывают полученные данные и передают их в местные центры управления Гидрометслужбы в установленные сроки. Помимо полной программы метеонаблюдений, на таких станциях часто проводят аэрологическое зондирование. В случае, если это научная метеорологическая обсерватория или станция, организованная непосредственно для научной работы, обычно выполняются уникальные измерения, набор из которых зависит от задач, которые поставлены перед данной обсерваторией (станцией).

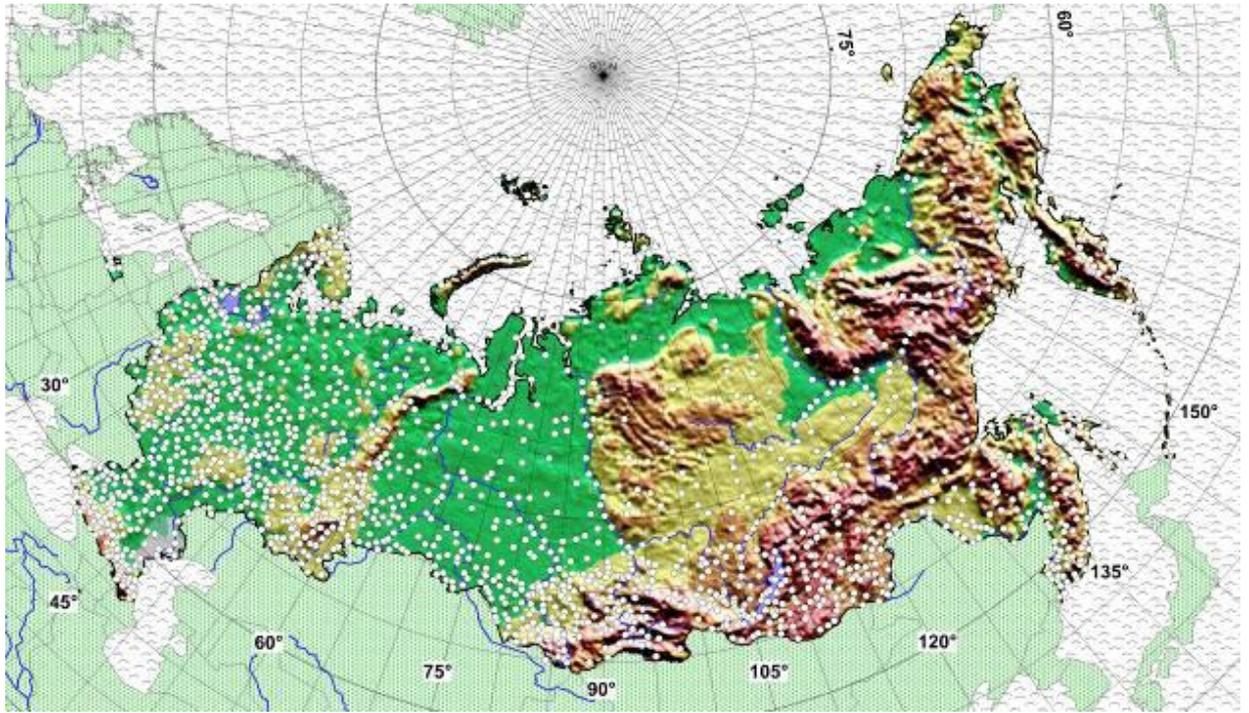


Рисунок 1.2 – Гидрометеорологическая сеть России [9]

Станции второго разряда также ведут наблюдения и осуществляют обработку данных по полной программе, однако аэрологические наблюдения и дополнительные исследования на них не проводят. *МС третьего разряда* производят наблюдения по сокращенной программе, с уменьшенным числом сроков. Часто такие станции даже не участвуют в международном обмене гидрометеорологическими данными, и используются только местными службами и ведомствами [2, 7].

Также все гидрометеорологические станции классифицируются в зависимости от проводимых на них наблюдений, например, береговые гидрометеорологические, агрометеорологические, гидрологические станции и другие.

Основной проблемой любой метеорологической сети является ее пространственная неоднородность (см. рисунок 1.2). К началу 80-х годов 20 века число станций и постов на территории бывшего СССР превышало 6000,

из которых 4665 относились непосредственно к системе Гидрометслужбы. Метеорологическая сеть России своего максимального развития достигла к 1986 году, тогда по всей территории насчитывалось 2308 станций и 3274 поста. В связи различных исторических и экономических причин, число МС сократилось почти на 30% за период с 1987 по 2005 гг., постов – 35% (см. рисунок 1.3). Средняя по России плотность существующей ныне метеорологической сети (10,5 тыс. км²) сравнима с плотностью 1950 г. Плотность сети крайне неравномерна в отдельных регионах, в частности, в Республике Саха (Якутия) и на арктическом побережье – здесь она в 8–10 раз меньше, чем в центральных и южных районах Европейской части России [2, 9].

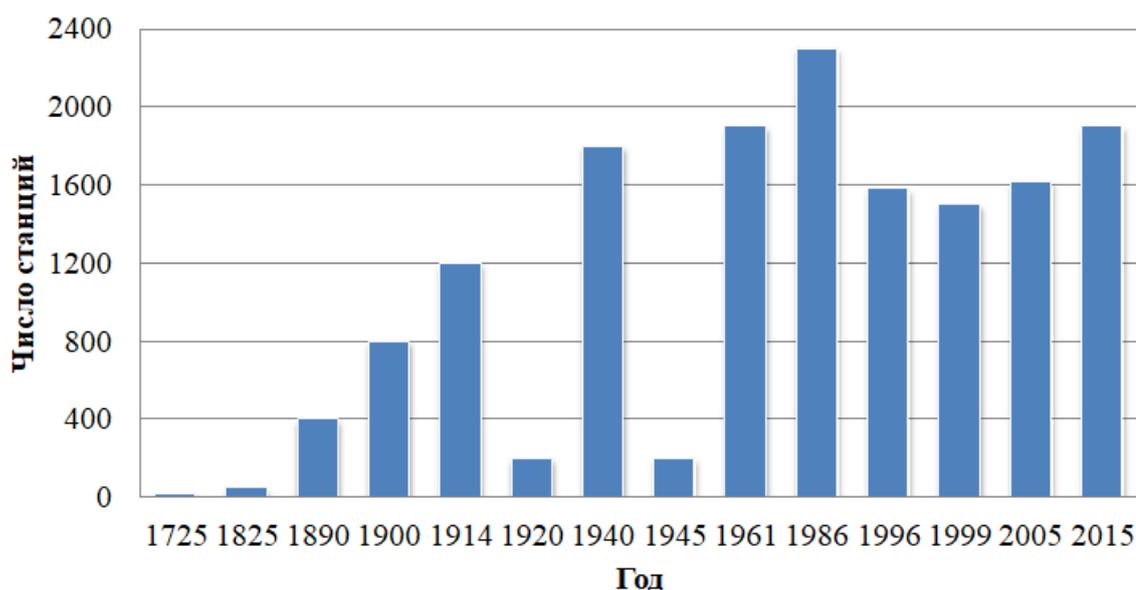


Рисунок 1.3 – Число метеорологических станций в России

Во всем мире на наземных МС проводятся синхронные наблюдения в следующие установленные сроки: в 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 по Всемирному скоординированному времени (UTC). При этом сроки наблюдений, запись начала и окончания атмосферных явлений указываются

непосредственно по UTC. Исключением являются только актинометрические измерения, которые ведутся по истинному солнечному времени.

Срок наблюдения – это интервал времени продолжительностью 10 мин, который заканчивается точно в указанный час. Например, срок 12 ч – это интервал времени от 11 ч 50 мин до 12 ч 00 мин. За конец метеорологических суток принимается 21:00 по UTC, а за начало следующий суток срок 0:00 по UTC. Данные наблюдений обрабатываются в течение 15-20 мин, затем они зашифровываются специальным синоптическим кодом и в региональные центры управления Гидрометслужбы. Оттуда данные поступают в межрегиональные центры, и, в конце концов, оказываются в трех мировых центрах гидрометеорологических данных: Москве, Вашингтоне и Мельбурне. И уже через 40 мин после окончания срока наблюдений данные всех станций земного шара доступны для синоптиков и других специалистов всех мировых и региональных метеоцентров [2, 7, 8].

1.1.3 Методика проведения наблюдений за атмосферными осадками и грозами на наземных метеорологических станциях

Разработанная методика наблюдения за всеми атмосферными явлениями, происходящими на метеорологической станции и в пределах видимой окрестности, включая атмосферные осадки и грозы, была разработана еще во второй половине 20 века, и содержит необходимые рекомендации для определения следующих характеристик:

- вид атмосферного явления (АЯ);
- время начала и окончания, продолжительность АЯ;
- интенсивность АЯ;
- состояние погоды в срок и между сроками наблюдений.

Вид атмосферного явления на МС определяется визуально по внешним признакам явлений, составленных на классификации, принятой ВМО [6, 7].

Время начала и окончания явления отмечается по московскому (зимнему) времени, а продолжительность определяется как разница между временем начала и окончания явления в течение метеорологических суток.

Интенсивность АЯ определяется также визуально по внешним признакам явления с учетом общего состояния погоды.

Состояние погоды определяется по непрерывным наблюдениям за атмосферными явлениями в соответствии с таблицами для WW (в срок) и W_1W_2 (между сроками) кода КН-01.

Все атмосферные явления, за которыми ведутся наблюдения на МС, делятся на следующие группы:

1. *гидрометеоры*, которые представляют собой скопление жидких или твердых частиц воды, падающих в атмосфере (осадки, выпадающие на поверхность земли), взвешенных в ней (туманы), отлагающихся на предметах, на земной поверхности земли или в атмосфере (осадки, образующиеся на поверхности) или поднятых ветром с поверхности земли (метели);

2. *литометеоры*, которые представляют собой скопление твердых частиц (не водных), которые поднимаются с поверхности земли ветром и переносятся на некоторое расстояние или остаются в воздухе во взвешенном состоянии;

3. *электрические явления*, к которым относятся видимые и слышимые (звуковые) проявления действия атмосферного электричества;

4. *оптические явления*, которые возникают в результате отражения, преломления и дифракции солнечного или лунного света;

5. *различные явления в атмосфере*, которые трудно отнести к определенному виду, указанному выше.

Каждая из перечисленных групп явлений, также разделяются на несколько видов и разновидностей.

В таблице 1.1 приведен перечень всех типов жидких атмосферных осадков, наблюдаемых на МС, их краткое описание, и условные знаки для их записи в книгу КМ-1 во время наблюдений.

После возникновения явления наблюдатель оценивает его интенсивность и внимательно следит за ходом явления, отмечая время изменения его интенсивности. Окончание явления отмечается при полном его исчезновении.

Таблица 1.1 – Виды жидких атмосферных осадков, выпадающих на земную поверхность

Тип осадков	Условный знак	Краткое описание
Дождь	•	Жидкие осадки, выпадающие из облаков на земную поверхность в виде капель. Отдельные капли дождя, падая в воду, оставляют след в виде расходящегося круга, а на сухой поверхности – след в виде нового пятна. Выпадение дождя происходит главным образом из слоисто-дождевых облаков (обложной дождь). Дождь может выпадать также из высоко-слоистых, слоисто-кучевых и других облаков.
Ливневый дождь		Жидкие осадки, отличающиеся внезапностью начала и конца выпадения и резким нарастанием интенсивности; выпадает из кучево-дождевых облаков; может сопровождаться грозой и градом.

Продолжение таблицы 1.1

		Капли ливневого дождя обычно значительно крупнее капель обложного дождя. При ливневом дожде, как правило, выпадает большое количество осадков, но может быть и не значительным.
Морось	•	Жидкие осадки, выпадающие в виде очень мелких капелек; падение их почти не заметно для глаза. При оседании капель мороси сухая поверхность намокает медленно и равномерно, на воде кругов не наблюдается. Морось обычно выпадает из слоистых облаков или тумана.

Интенсивность большинства атмосферных явлений представляет собой субъективную качественную оценку явления на данной станции. При этом различают:

- интенсивность обычную для данной станции в конкретный сезон (умеренную);
- слабую интенсивность;
- сильную интенсивность.

Слабая или сильная интенсивность отмечается в тех случаях, когда характер явления значительно отличается от умеренной интенсивности. В случае слабой интенсивности у символа вида явления ставится «0», в случае сильной – «2», при умеренной интенсивности отмечается только символ явления.

При *ливневом дожде* различается интенсивность слабая, умеренная, сильная и очень сильная. В случае очень сильной интенсивности у символа ставится «2».

Наблюдатель МС должен особо внимательно следить за развитием особо опасных атмосферных явлений, таких как ливневые осадки и грозы.

Гроза (☉) – это электрические разряды в атмосфере, сопровождаемые вспышкой света (молнией) и резким звуковыми раскатами (громом). Промежуток времени между молнией и последующим громом зависит от расстояния грозы от места наблюдения. При расстоянии до 3 км этот промежуток меньше 10 с. Гром может быть слышен на расстоянии до 15–20 км, при этом молния может быть не замечена.

К особенностям наблюдений за грозой относят следующие:

- за время начала грозы принимается момент первого удара грома независимо от того, была ли видна молния или нет;
- за время окончания грозы принимается момент последнего удара грома при условии, что в последующие 15 мин гром не повторится. При грозе следует определить направление перемещения грозы по восьми румбам; если определить направление перемещения грозы затруднительно, то следует указать, в каком направлении от станции наблюдается гроза.

Одновременно наблюдающиеся явления записываются в книжке КМ-1 в одной графе столбиком. При записи наблюдений за грозой рядом с символом грозы записывается направление, в котором наблюдается гроза, например: ☉(СЗ) 14⁴⁰ – 15⁰⁰ [7, 8, 10].

Пример записи наблюдений за атмосферными явлениями в книжку КМ-1 приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Пример записи атмосферных явлений в книжке КМ-1

ДАТА		ВРЕМЯ	
		15	18
Состояние погоды	Между сроками W ₁ W ₂	<i>Ливневый дождь</i>	<i>Гроза</i>
	В срок WW	<i>Дождь</i>	
	Атмосферные явления	$\dot{\nabla}^2 14^{18} - 14^{44}$	$\nabla(C3) 16^{40} - 17^{00}$

1.2 Доплеровские метеорологические радиолокаторы. Общие сведения

Доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) предназначены для обеспечения метеорологической информации об облачности, осадках и связанных с ними атмосферных явлений. Особенностью ДМРЛ является то, что они также способны измерять скорости перемещения облаков, осадков, невидимых однородностей атмосферы, а также измерять скорости движения рассеивающих частиц внутри атмосферных образований.

Принцип действия ДМРЛ основан на использовании эффекта Доплера, который применительно к радиолокации заключается в том, что частота отраженных сигналов изменяется, если наблюдатель и отражающий объект перемещаются друг относительно друга.

Гидрометеорные частицы атмосферных образований участвуют в сложных движениях: под действием ветра они перемещаются в горизонтальном направлении в составе всего образования; под действием

гравитационных сил, восходящих и нисходящих потоков они движутся в вертикальном направлении; вследствие турбулентного перемешивания они хаотически изменяют свое местоположение в пространстве. Вследствие наличия таких перемещений отражателей в атмосфере частота отраженных от них радиолокационных сигналов действительно может изменяться, т.е. может наблюдаться доплеровский сдвиг частоты.

Упорядоченное движение атмосферного образования как системы отражателей определяет средний доплеровский сдвиг частоты, а движение отдельных отражателей относительно друг друга влияет на ширину спектра доплеровских частот. Таким образом, изучая спектр принимаемого радиолокационного сигнала, можно получить информацию о движении как всего атмосферного образования в целом, так и о движении гидрометеорных частиц внутри самого атмосферного образования [11, 13, 18].

Разность частот излучаемого и принятого колебаний, называется *доплеровским приращением частоты* f_d :

$$f_d = 2 \times \frac{v_R}{\lambda} , \quad (1.1)$$

где v_R – радиальная скорость рассеивающего объекта;

λ – длина волны электромагнитного излучения.

Радиальная скорость связана с полной скоростью V соотношением:

$$v_R = v \times \cos \psi , \quad (1.2)$$

где ψ – угол между линией визирования цели и вектором ее скорости.

Тогда:

$$f_d = 2 \frac{v_R}{\lambda} \times \cos \psi , \quad (1.3)$$

Доплеровский сдвиг частоты представляет собой разностную частоту колебаний между принимаемыми и излучаемыми сигналами. Частота этих колебаний выделяется с помощью специального фильтра и может быть измерена. Другими словами, метеорологическая информация оказывается заключенной в доплеровской частоте или спектре доплеровских частот [11, 12].

Современные оперативные метеорологические радиолокаторы проводят зондирование атмосферы узким лучом, который формируется параболической антенной с диаграммой направленности шириной 1° . Зондирование ведется импульсным методом, измерение времени задержки отраженного метеоцелями радиосигналов позволяет измерить расстояние до них, а измерение характеристик отраженного сигнала (мощность, фазу, коэффициент кросскорреляции) позволяет определить их метеорологические характеристики [14].

Для оценки отражающих свойств метеоцелей (например, частиц облаков и осадков) применяется ряд связанных между собой характеристик:

- эффективная площадь рассеяния (σ_i);
- удельная площадь обратного рассеяния (η);
- радиолокационная отражаемость (Z).

При выполнении условий рэлеевского рассеяния, согласно которым радиус частицы a намного меньше длины падающей на нее плоской

электромагнитной волны λ ($a \leq 0,03\lambda$) и намного меньше λ внутри самой частицы ($a < 0,13 \frac{\lambda}{|m|}$), выражение для эффективной площади рассеяния σ_i :

$$\sigma_i = \frac{64\pi^5 a^6}{\lambda^4} \times \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (1.4)$$

где m – комплексный показатель преломления вещества частицы на длине волны λ .

Наличие мнимой части m указывает на то, что падающая энергия частично поглощается веществом частицы. Для воды в сантиметровом диапазоне множитель $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = 0,93 \pm 0.004$, для льда с единичной площадью он равен 0,197.

Удельная площадь обратного рассеяния η определяется по формуле [14]:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{V_{\text{Э}}}, \quad (1.5)$$

где N – число рассеивающих частиц в объеме $V_{\text{Э}}$ отражающей области;
 $V_{\text{Э}}$ – эффективный объем.

Радиолокационная отражаемость Z определяется концентрацией и распределением частиц по размерам в единичном объеме и их комплексным коэффициентом преломления в используемом диапазоне электромагнитного

излучения. Величина Z характеризует рассеивающие свойства метеорологических объектов в диапазоне радиоволн. Обычно ее выражают через радиус a или через диаметр d отражающих частиц. Выражение через d нашло большее распространение [11, 15]:

$$Z = \sum_{i=1}^N d_i^6 \times \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (1.6)$$

Величина Z в практике радиолокационных наблюдений измеряется в $\text{мм}^6/\text{м}^3$ или dBz. Связь между значениями Z , выраженными в различных единицах, определяется по следующим формулам [15, 16]:

$$Z (\text{мм}^6/\text{м}^3) = 10^{18} Z (\text{м}^3) = 10^{12} Z (\text{см}^2); \quad (1.7)$$

$$Z (\text{dBz}) = 10 \lg Z/Z_0; \quad (1.8)$$

$$Z (\text{мм}^6/\text{м}^3) = 10^{0,1Z} (\text{dBz}). \quad (1.9)$$

Принцип оперативных метеорологических радиолокационных наблюдений заключается в проведении в каждом радиолокационном обзоре последовательности азимутальных круговых сканирований верхней полусферы под различными углами места антенны так, чтобы в результате каждого обзора собиралась радиолокационная информация об облачности и осадках на нескольких конических сечениях (см. рисунок 1.4). Затем дальнейшая компьютерная обработка полученных данных позволяет построить трехмерную модель облачной атмосферы в зоне радиолокационного обзора. Чем чаще по углу места будет проведено сканирование, тем подробнее будет построенная модель [14].

ДМРЛ, как правило, размещаются на специальной башне высотой 30 м, обеспечивающей хороший радиолокационный обзор за счет преобладания высоты башни по сравнению с высотой зданий и деревьев в ближней зоне (см. рисунок 1.5).

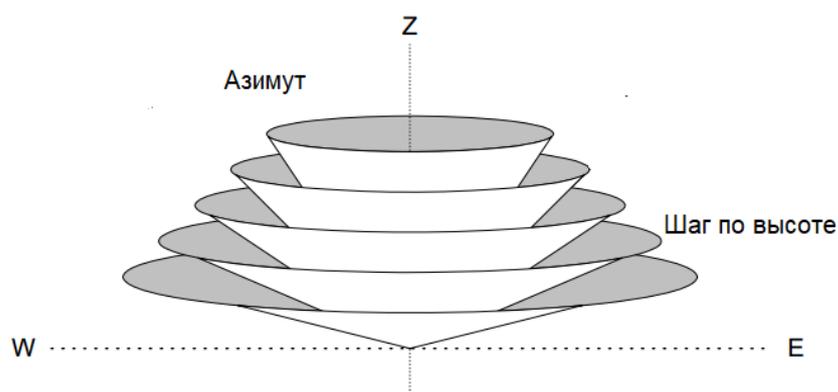


Рисунок 1.4 – Графическое изображение конических сечений при радиолокационном зондировании [14]



Рисунок 1.5 – Башня с установленным ДМРЛ [14]

В настоящее время радиолокаторы ДМРЛ устанавливаются Росгидрометом на территории России в рамках выполнения государственной программе с целью создания единой системы радиолокационных наблюдений. До 2020 г. По планам развертывания ДМРЛ-С должно быть установлено около 140 радиолокационных станций (см. рисунок 1.6) [18].

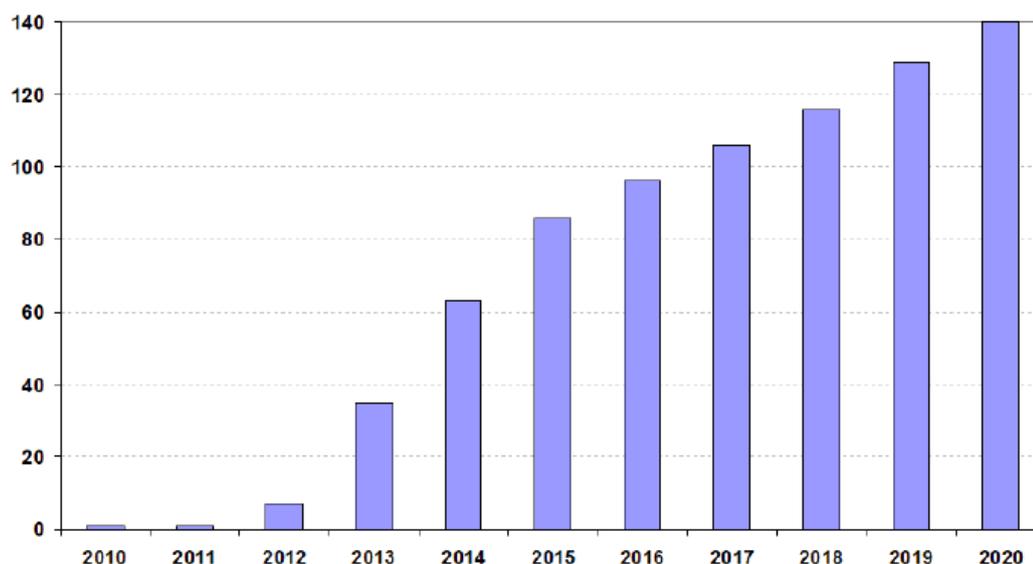


Рисунок 1.6 – График ввода в эксплуатацию ДМРЛ-С [18]

Выбор места установки ДМРЛ-С определяется Приказом Росгидромета № 257 и описан в методических указаниях в приложении. В соответствии с этими указаниями, в качестве эффективного рабочего радиуса обзора метеорологического локатора следует выбирать 200 км, а при размещении в составе сети следует добиваться того, чтобы зоны обзора локаторов пересекались, образуя общие зоны перекрытия, на удалениях не более 150–180 км. При этом также необходимо учитывать удаленность радиолокационных позиций до населенных пунктов, дорог, сетей энергоснабжения и связи. План размещения сети ДМРЛ-С на территории России показан на рисунке 1.7.

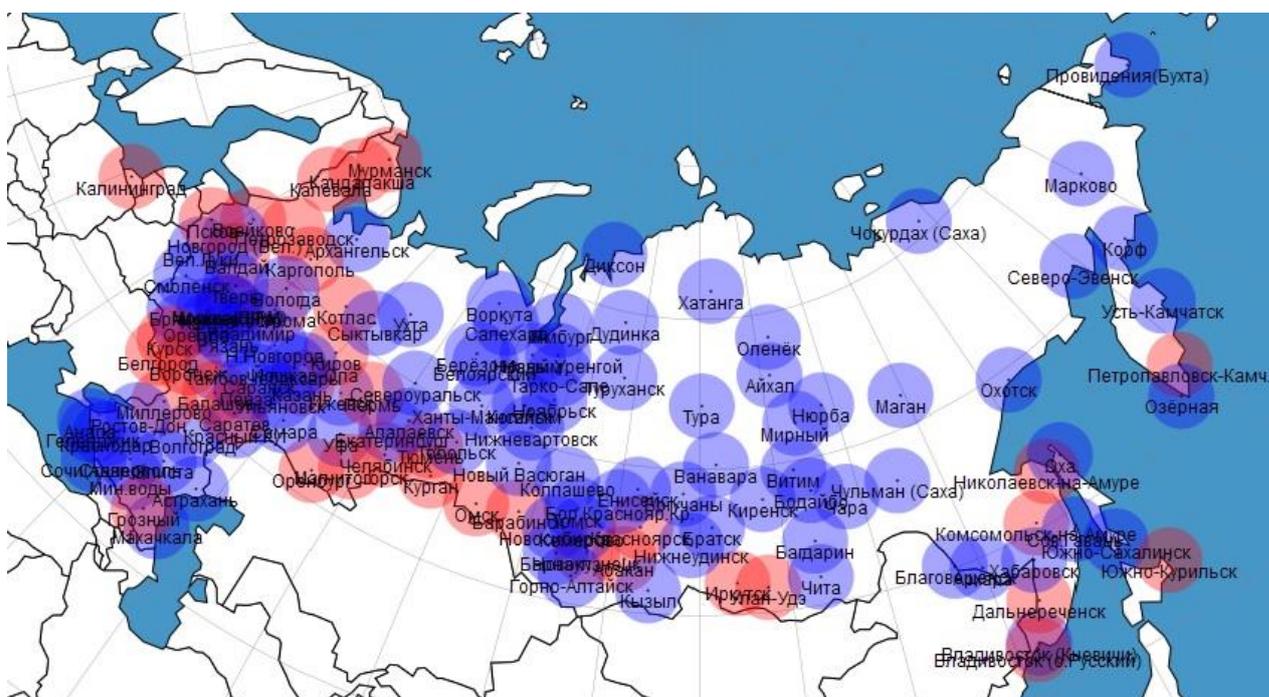


Рисунок 1.7 – План размещения сети ДМРЛ-С. Радиус обзора – 250 км, красным цветом окрашены радиолокаторы, установленные по программе «Геофизика», синим – по ФЦП «ОрВД» [18]

Создание единого радиолокационного поля позволит получить целостную картину распределения зон облачности и осадков по всей территории России, а также позволит объединить радиолокационную и грозопеленгационную информацию с данными наблюдений на сети МС [18].

1.2.1 Методика определения зон осадков и интенсивности осадков с помощью ДМРЛ

В настоящее время принципы идентификации метеоявлений с помощью ДМРЛ основаны на применении информации о радиолокационной отражаемости Z . По величине Z можно судить о природе источника радиоэха. В работе [22] приведена наглядная схема, на которой представлены величины

радиолокационной отражаемости Z для различных отражателей в атмосфере (см. рисунок 1.8).

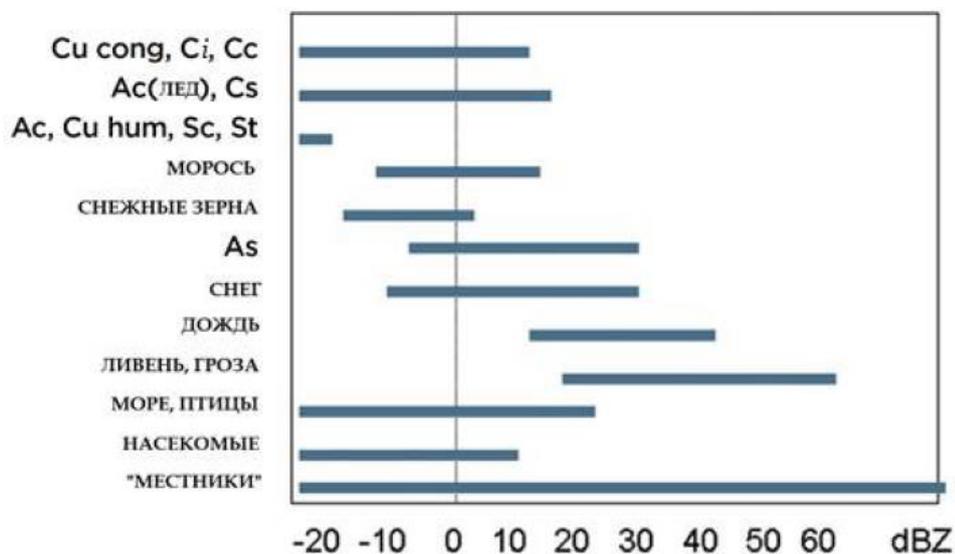


Рисунок 1.8 – Значения радиолокационной отражаемости от различных источников [22]

Радиолокационная отражаемость облака зависит от многих параметров: фазового состояния, водности, спектра размеров частиц в облаке. По природе образования и стадии развития облачность можно разделить на два типа:

- облачность с осадками;
- облачность без осадков.

Облачность *без осадков* классифицируется как кучевая, слоистообразная, облака верхнего и нижнего ярусов. Эффективность обнаружения таких облаков значительно ниже, чем дождевых, т.к. радиолокационная отражаемость Z их очень мала. Кроме того, из-за низкой отражательной способности, имеется предельная дальность обнаружения метеоцелей, поэтому максимальная дальность обнаружения нежданных облаков чаще всего ограничивается несколькими десятками километров [14].

Определение *облаков с осадками* с помощью ДМРЛ основано на наличие отражаемости Z на двух уровнях отражаемости Z_1 (уровень до 2 км) и Z_2 (2-4 км). Для теплого периода используются данные об отражаемости только на уровне Z_1 :

- Осадки слабые: $Z_1 \geq 0$ dBz;
- Осадки умеренные: $Z_1 \geq 13$ dBz;
- Осадки сильные: $Z_1 \geq 23$ dBz.

Для переходного и холодного периода необходимо, чтобы выполнялось условие $Z_2 \geq 0$ dBz для всех градаций интенсивности.

Для распознавания ливневых осадков используются данные тех же уровней Z_1 и Z_2 . В течение всего года (в зависимости от региона):

- Слабый ливень: $Z_1 \geq 28$ dBz (в теплый период) и $Z_1 \geq 31$ dBz (в переходный и холодный);
- Умеренный ливень: $Z_2 \geq 13$ dBz
- Сильный ливень: $Z_1 \geq 23$ dBz

Разделение осадков по типу на обложные и конвективные в радиометеорологии производится с учетом температурной стратификации в атмосфере [14, 20].

Оценка интенсивности выпадающих осадков радиолокационным способом основана на эмпирическом соотношении между отражаемостью Z и интенсивностью I мм/ч [15, 16]:

$$Z = A \times I^B \quad (1.10)$$

где A и B – константы, зависящие от вида осадков.

На рисунке 1.9 представлен пример отображения зон осадков на экране автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка».

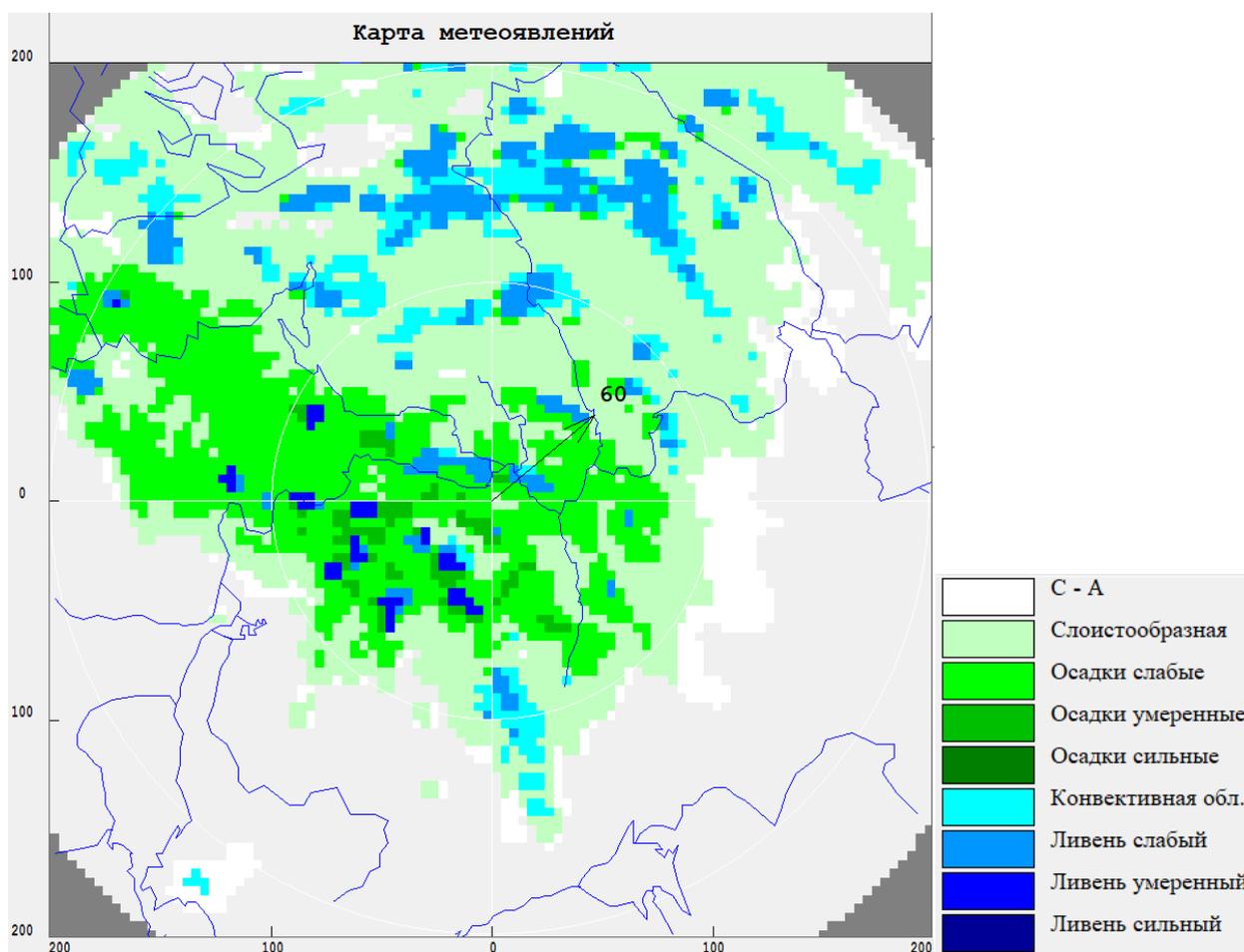


Рисунок 1.9 – Отображение зон осадков на экране АМРК «Метеоячейка»

1.2.2 Методика определения зон грозовой активности с помощью ДМРЛ

Существующая в настоящее время единственная методика распознавания зон грозовой активности с помощью ДМРЛ, основаны на критериях грозы, полученных в результате экспериментов [20], методике прогноза гроз [21], согласно которым, одним из основных условием

возникновения грозы является достижение кучево-дождевыми облаками температур $-20...-25$ °C [17, 22].

Для распознавания опасного явления (ОЯ) (например, грозы) выделяют *однозначные и комплексные критерии* [15].

К *однозначным критериям* относят следующие параметры:

- максимальная высота радиоэха явления (H_{max});
- значения радиолокационной отражаемости Z на двух уровнях: высоте изотерм 0 и -22 °C (lgZ_2 и lgZ_3 соответственно), определяющие связь отражаемости облака с количеством осадков, а также с восходящими потоками облака;

В ходе своего развития конвективное облако достигает той стадии, при которой начинается оледенение его вершины. С того момента в облаке создаются условия для начала интенсивного разделения электрических зарядов, при этом облако превращается в мощное кучево-дождевое. Так, например, возникновения грозы происходит после превышения радиоэха кучево-дождевого облака уровня изотермы -22 °C ($H_{-22^\circ\text{C}}$). Интенсивность ОЯ будет зависеть от мощности переохлажденной части облака ΔH :

$$\Delta H = H_{max} - H_{-22^\circ\text{C}} \quad (1.11)$$

Также считается, что развитие облаков по вертикали происходит до уровня тропопаузы $H_{\text{троп}}$. Однако в летние месяцы может наблюдаться случаи, когда восходящие потоки воздуха настолько интенсивны, что «пробивают» тропопаузу и выносят водяной пар за ее границы. Следовательно, превышение облаком уровня тропопаузы также может

служить критерием распознавания мощных кучево-дождевых облаков, а значит и распознавания ОЯ.

$$\Delta H_{\text{троп}} = H_{\text{max}} - H_{\text{троп}} \quad (1.12)$$

Превышение установленных пороговых критериев значением lgZ свидетельствует о том, что отмечается явление, обладающее большей интенсивностью. Напротив, если значение lgZ не достигает установленного критерия, то отмечается ОЯ меньшей интенсивности [15, 17, 20, 23].

Комплексные критерии рассчитываются на основе набора радиолокационных параметров облака. Критерий грозоопасности Y определяется следующим образом:

$$Y = H_{\text{max}} \times lgZ_3 \quad (1.13)$$

При резких изменениях в погоде рекомендуют проводить ежедневную корректировку критерия грозоопасности Y к высоте изотермы $-22\text{ }^\circ\text{C}$ ($Y_{\text{кр}}$):

$$Y_{\text{кр}} = H_{-22^\circ\text{C}} \times lgZ_{\text{min}}, \quad (1.14)$$

где lgZ_{min} – минимальное значение lgZ_3 в грозах для данного региона.

Если $Y > Y_{\text{кр}}$, то фиксируют грозу, если же $Y < Y_{\text{кр}}$ – ливень [14, 15, 23].

Вероятность распознавания гроз зависит от величины превышения критерия Y над $Y_{кр}$. Для разных регионов вероятность распознавания грозы рассчитывается отдельно. В примере указанном в [16] для гроз различной интенсивности выполняются следующие соотношения:

- для гроз с вероятностью распознавания $V_p > 90\%$: $Y > Y_{кр} + 14$ и обозначается символом \mathbb{K} ;
- для гроз с $V_p = 71 \div 90\%$: $Y > Y_{кр} + 6$, обозначение \mathbb{K});
- для гроз с $V_p = 30 \div 70\%$: $Y > Y_{кр}$, обозначается символом (\mathbb{K}) .

На рисунке 1.10 представлен пример отображения зон грозовой активности на экране АМРК «Метеоячейка».

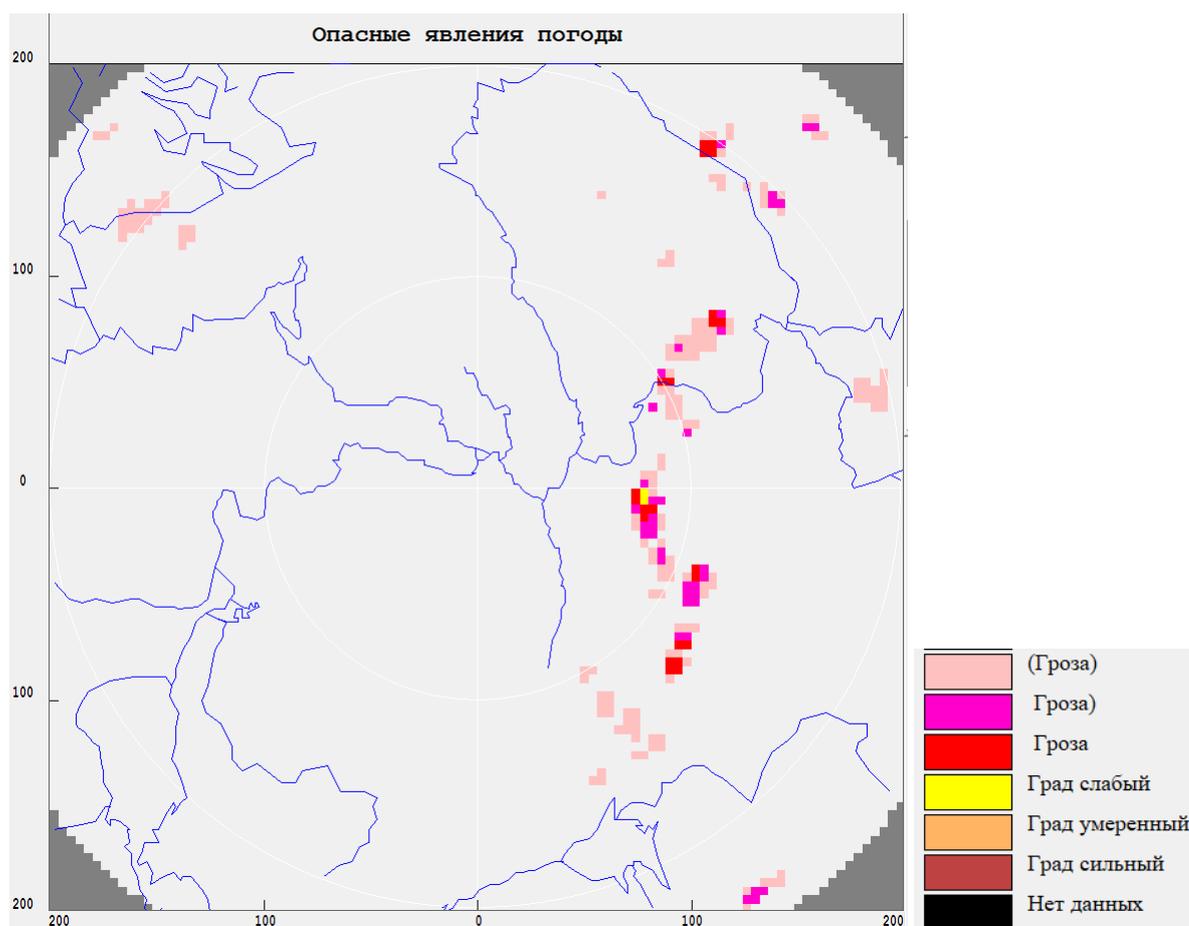


Рисунок 1.10 – Отображение зон грозовой активности на экране АМРК «Метеоячейка»

2 Валидация данных об осадках и грозах, полученных с помощью ДМРЛ

Валидация данных необходима для того, чтобы обеспечить высокое качество радиолокационных наблюдений. Поскольку характеристики, получаемые непосредственно при таких наблюдениях, проверить не предоставляется возможным, необходимо контролировать точность вторичных радиолокационных продуктов: характеристики осадков, идентификация ОЯ и другие [18].

Вероятностный характер радиолокационной информации об ОЯ делает необходимым оценку ее надежности и достоверности. Такая оценка может проводиться по сопоставлению наземных и радиолокационных данных [16].

2.1 Характеристики качества информации, получаемой с ДМРЛ

Для оценки качества радиолокационных наблюдений необходимо проводить по данным независимых метеорологических наблюдений (эталонных).

Основным эталонным источником информации для верификации ДМРЛ в настоящее время является наземная наблюдательная сеть и аэрологическая сеть Росгидромета.

В качестве дополнительных источников эталонной информации могут использоваться данные грозопеленгационной сети, и атмосферных профилемеров, данные метеорологических спутников Земли об облачности и осадках, которые должны быть обеспечены надежными методиками оценки точности измерений характеристик облачности и осадков. Для контроля

абсолютной калибровки ДМРЛ используются данные наземной сети наблюдений (МС).

Для контроля качества работы алгоритма идентификации ОЯ ДМРЛ предлагается использовать данные эталонных измерений (например, данные МС в коде КН-01, WAREP и пр.) о зафиксированных метеоявлениях.

Коды явлений об ОЯ в КН-01 делятся на группы – явления в срок (в последние 10 минут до срока), явления в последний час, явления между сроками.

Для характеристики качества радиолокационных наблюдений используются следующие индикаторы [18, 24]:

- оправдываемость P_0 ОЯ;
- достоверность P_d обнаружения ОЯ.

Оправдываемость P_0 есть вероятность обнаружения с помощью ДМРЛ случаев ОЯ, зафиксированных эталоном (наблюдателем МС), выраженная в %. За 100% принимается число эталонных наблюдений (наблюдений на МС). Оправдываемость P_0 рассчитывается по следующей формуле:

$$P_0 = \frac{N_{\text{Э-ДМРЛ}}}{N_{\text{Э}}} \times 100\%, \quad (2.1)$$

где $N_{\text{Э-ДМРЛ}}$ – число случаев гроз/ливней, зафиксированных эталоном и совпавших с грозами/ливнями по ДМРЛ;

$N_{\text{Э}}$ – число случаев гроз/ливней по данным эталонных наблюдений.

Достоверность P_d – вероятность подтвержденных эталоном (наблюдателем МС) случаев ОЯ, отмеченных на ДМРЛ, выраженная в %. За

100% принимается число наблюдений ОЯП по ДМРЛ. Достоверность P_D рассчитывается по следующей формуле [18]:

$$P_D = \frac{N_{\text{ДМРЛ-э}}}{N_{\text{ДМРЛ}}} \times 100\% , \quad (2.2)$$

где $N_{\text{ДМРЛ-э}}$ – число случаев гроз/ливней по ДМРЛ, подтвержденных грозами/ливнями по эталону;

$N_{\text{ДМРЛ}}$ – число случаев гроз/ливней по ДМРЛ.

Кроме индикаторов P_O и P_D также обычно рассчитывают вероятность пропуска P_{Π} ОЯ и «ложных тревог» (ЛТ) $P_{\text{ЛТ}}$ [25]:

$$P_{\Pi} = 100\% - P_O \quad (2.3)$$

$$P_{\text{ЛТ}} = 100\% - P_D \quad (2.4)$$

2.2 Архив данных и анализ результатов, полученный в процессе валидации

В качестве исходных данных использовались следующие данные:

- радиолокационная информация, полученная с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса ДМРЛ «Метеоячейка», расположенного в аэропорту Пулково (г. Санкт-Петербург);

- данные независимых метеорологических измерений на десяти МС [36]. Расположение наземных станций, участвующих в валидации, отмечено на рисунке 2.1.

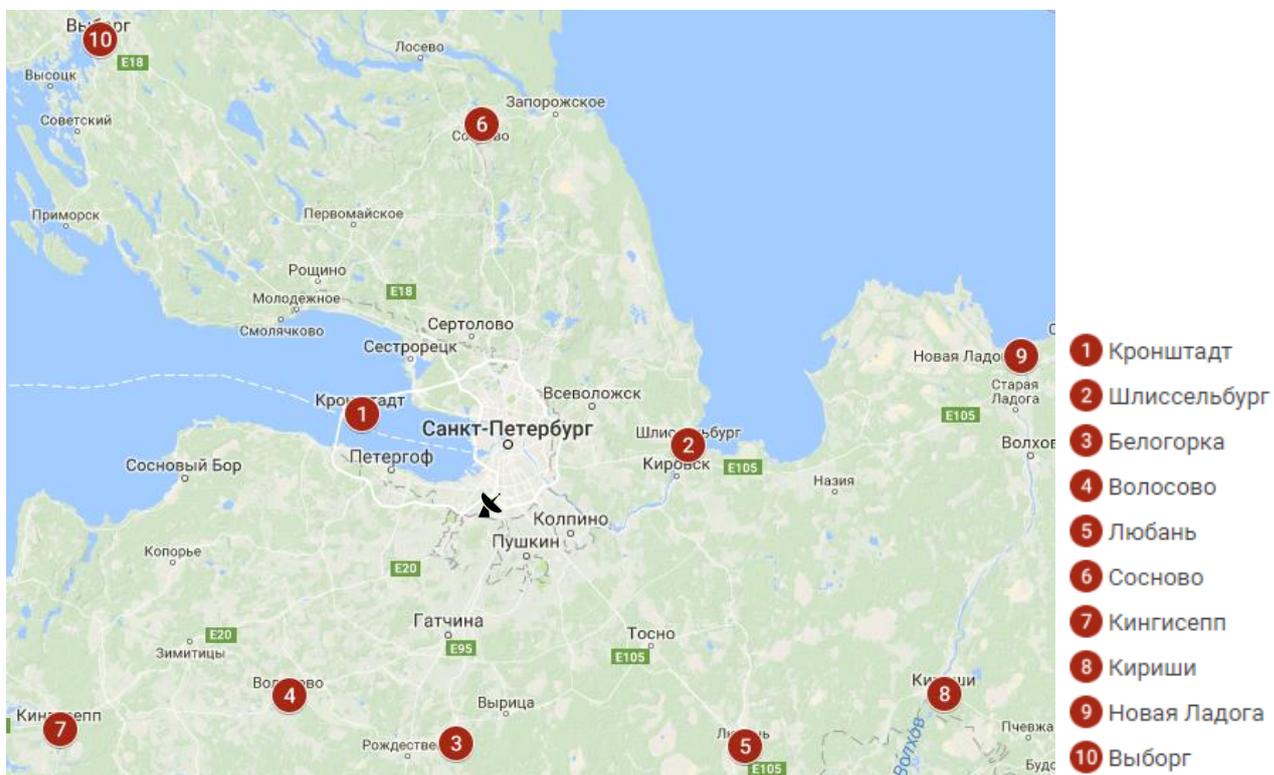


Рисунок 2.1 – Расположения наземных МС

Пример карты метеоявлений, сформированного комплексом ДМРЛ – «Метеоячейка», представлен на рисунке 2.2.

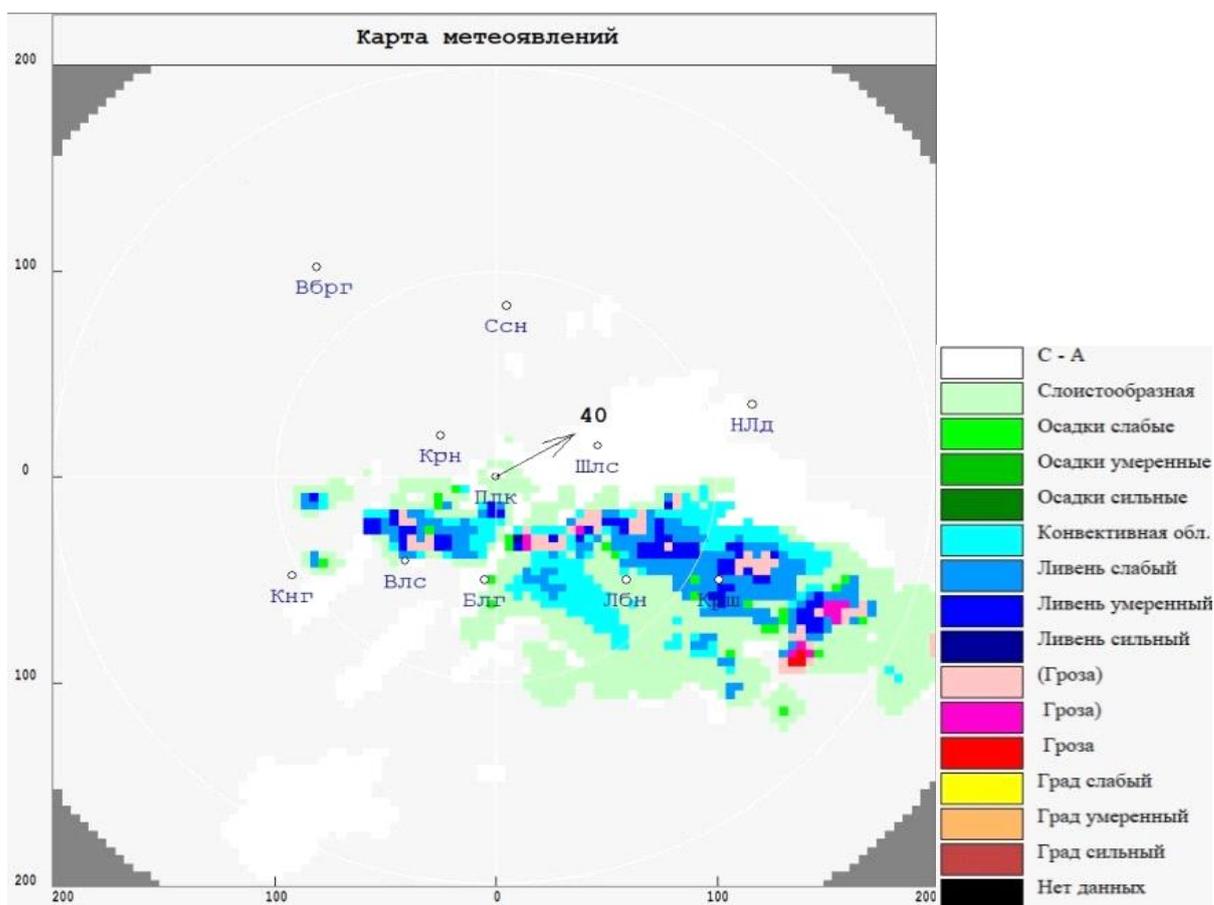


Рисунок 2.2 – Пример карты метеоявлений, обнаруженных АМРК ДМРЛ «Метеоячейка», с расположенными на ней метеостанциями

Характеристики метеорологических наземных станций, данные наблюдений которых использовались в работе, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики наземных МС

Местонахождение станции	Географические координаты	Удаление станции от ДМРЛ, км	Направление станции от «Пулково»	Высота над уровнем моря, м
Кронштадт	N=59°57'44' E=30°41'05	33	Запад	3

Продолжение таблицы 2.1

Местонахождение станции	Географические координаты	Удаление станции от ДМРЛ, км	Направление станции от «Пулково»	Высота над уровнем моря, м
Шлиссельбург	N=60°12'52' E=31°29'10'	48	Восток	5
Белогорка	N=59°20'58' E=30°06'38'	51	Юг	101
Волосово	N=59°25'18' E=29°28'22'	58	Юго-Запад	117
Любань	N=59°20'58' E=31°14'30'	78	Юго-Восток	22
Сосново	N=60°32'19' E=30°19'36'	83	Север	40
Кингисепп	N=59°20'58' E=28°33'20'	104	Запад	27
Кириши	N=59°20'58' E=32°01'09'	113	Юго-Восток	29
Новая Ладога	N=60°06'23' E=32°20'59'	121	Северо-Восток	13
Выборг	N=60°03'48' E=28°42'22'	130	Северо-Запад	28

При проведении исследования использовались синхронные радиолокационные и станционные наблюдения за грозами и ливневыми осадками за 4 месяца летних периодов 2012–2013 гг., при этом было рассмотрено 2100 случаев с ОЯ.

Сопоставление данных МС и ДМРЛ проводилось в радиусе 140 км относительно ДМРЛ. При сопоставлении радиолокационной и станционной информации принимались следующие условия:

- 1) Ливни и грозы считались обнаруженными ДМРЛ, если они наблюдались в окрестности 15 км вокруг станции и подтверждались данными визуальных наблюдений;
- 2) Время регистрации ливней и гроз на метеостанции отличалось от срока радиолокационного наблюдения не более чем на 15 минут.

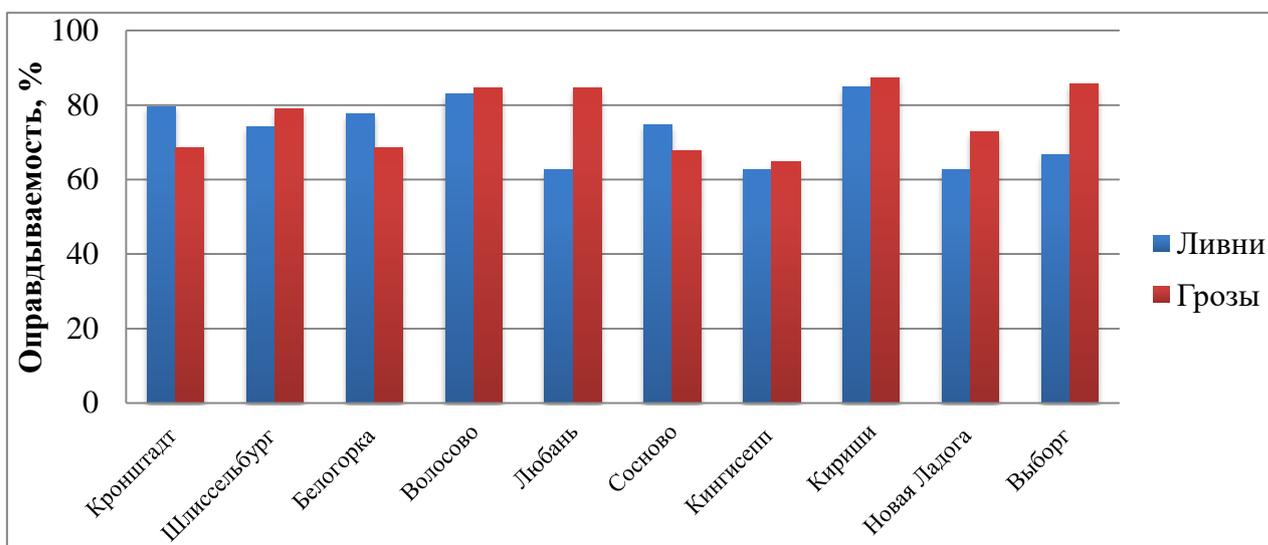
Фрагмент архива данных представлен на рисунке 2.3.

	A	B	C	D	E	F
1			Новая Ладога		ДМРЛ Пулково	
2	Дата	Время	Наличие явления	явление,интенсивность	Наличие явления	явление,интенсивность
3	2,05	15:00	1	слаб. ливн.дождь	0	
4		15:06	1	ливн.осадки	1	ливень слабый
5	5,05	2:00-3:00	1	ливн.дождь	0	
6		4:46-5:17	1	ливн.дождь	1	ливень слабый
7		11:17-11:56	1	ливн.дождь	1	ливень слабый
8		12:06-12:26	0		1	ливень слабый
9		15:00-18:00	1	ливн.осадки	0	
10	6,05	19:26	1	ливн.осадки	1	ливень слабый
11		23:17-23:36	1	ливн.дождь	1	ливень слабый
12	7,05	3:26-3:56	1	ливн.осадки	1	ливень слабый
13	8,05	3:00-6:00	1	слаб. ливн.дождь	0	
14	11,05	8:17-8:56	1	слаб. ливн.дождь	1	ливень слабый
15		11:56	1	ливн.дождь	1	ливень слабый
16		14:00-18:00	1	ливн.дождь	0	
17		21:06-21:17	1	ливн.осадки	1	ливень слабый
18	12,05	5:46-5:56	1	слаб. ливн.дождь	1	ливень слабый
19		9:00-12:00	1	слаб. ливн.дождь	0	
20		15:00-18:00	1	ливн.осадки	0	
21		20:00-23:59	1	ливн.дождь	0	
22	16,05	18:36	1	ливн.осадки	1	ливень слабый
23		21:00	1	гроза без осадков	1	гроза
24		21:36-23:17	1	ливн.осадки	1	ливень слабый, гроза
25	17,05	0:00-6:00	1	гроза	0	
26	18,05	3:00-6:00	1	ливн.осадки	0	
27		8:56-9:17	1	слаб. ливн.дождь	1	ливень слабый
28	29,05	0:00	1	слаб. ливн.дождь	0	
29		2:00-6:00	1	ливн.дождь	0	
30	30,05	5:46-6:56	1	сильн. ливн.дождь	1	ливень слабый

Рисунок 2.3 – Фрагмент архива данных для МС Новая Ладога

Результаты вычисления вероятностей оправдываемости P_0 и достоверности P_D гроз и ливней представлены на рисунке 2.4 и в таблице А.1 в Приложении А.

а)



б)

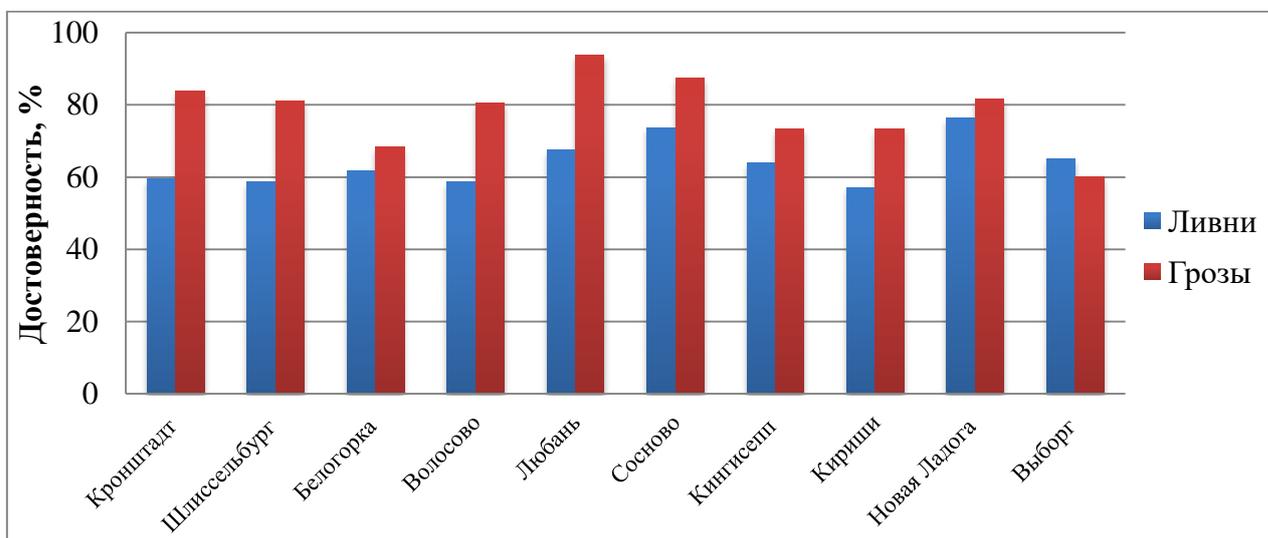


Рисунок 2.4 – Вероятности оправдываемости (а) и достоверности (б) гроз (красные столбцы) и ливней (синие столбцы)

Как видно из диаграмм оправдываемости (см. рисунок 2.4а) и достоверности (см. рисунок 2.4б) как гроз, так и ливней лежат в диапазоне 0,6 – 0,8. Поскольку значение оправдываемости оказалось чуть выше, следовательно, пропуск ОЯ случается реже, чем «ложная тревога». Результаты вычисления вероятностей пропусков ОЯ и «ложных тревог», рассчитанные на каждой станции, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты вероятностей пропусков ОЯ и «ложных тревог»

Станции	Вероятность пропуска P_{Π} , %		Вероятность ЛТ $P_{ЛТ}$, %	
	ливней	гроз	ливней	гроз
Кронштадт	32	20	16	41
Шлиссельбург	21	26	19	41
Белогорка	32	22	32	38
Волосово	15	17	20	41
Любань	15	38	6	32
Сосново	32	25	13	26
Кингисепп	35	38	27	36
Кириши	13	15	27	43
Новая Ладога	27	37	18	24
Выборг	14	33	40	35

Вероятность пропусков гроз лежит в диапазоне 13-35%, ливней – 15-38%, вероятность «ложных тревог» гроз – в диапазоне 6-40%, ливней – 24-43%. Чаще всего локатор пропускал как грозу, так и ливни в районе станции Кингисепп. Над станцией Выборга в 40% случаях локатор фиксировал грозу, не подтвержденную на МС. «Ложные ливни» максимально часто обнаруживались локатором над Кронштадтом, Шлиссельбургом и Волосово (41% случаев).

На рисунке 2.5 представлены диаграммы вероятностей оправдываемости P_0 и достоверности P_d гроз и ливней в зависимости от месяца. Результаты также приведены в таблицах А.2 в Приложении А. Из диаграмм видно, что месяцы сезона не оказывают заметного влияния на точность работы ДМРЛ.

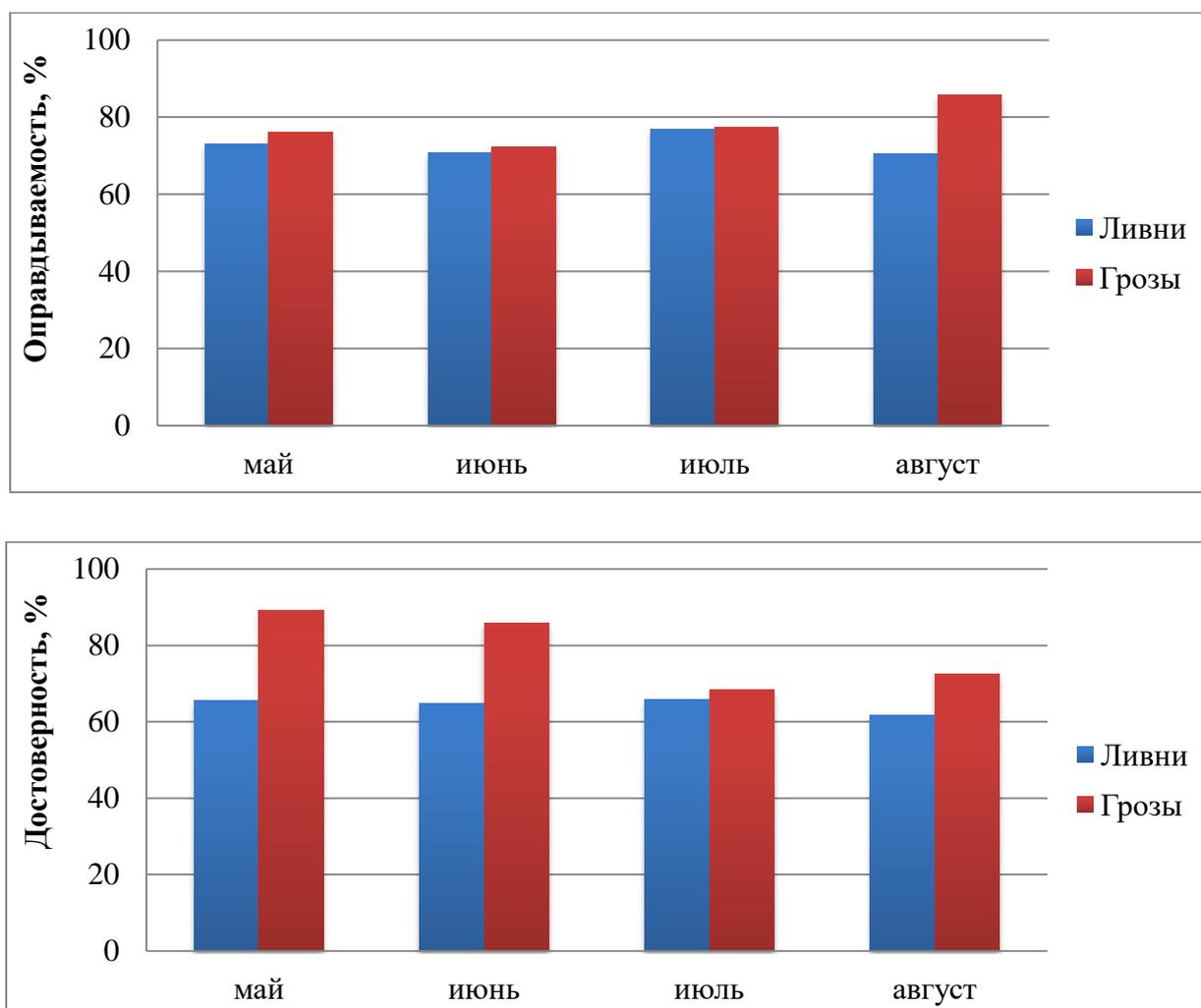
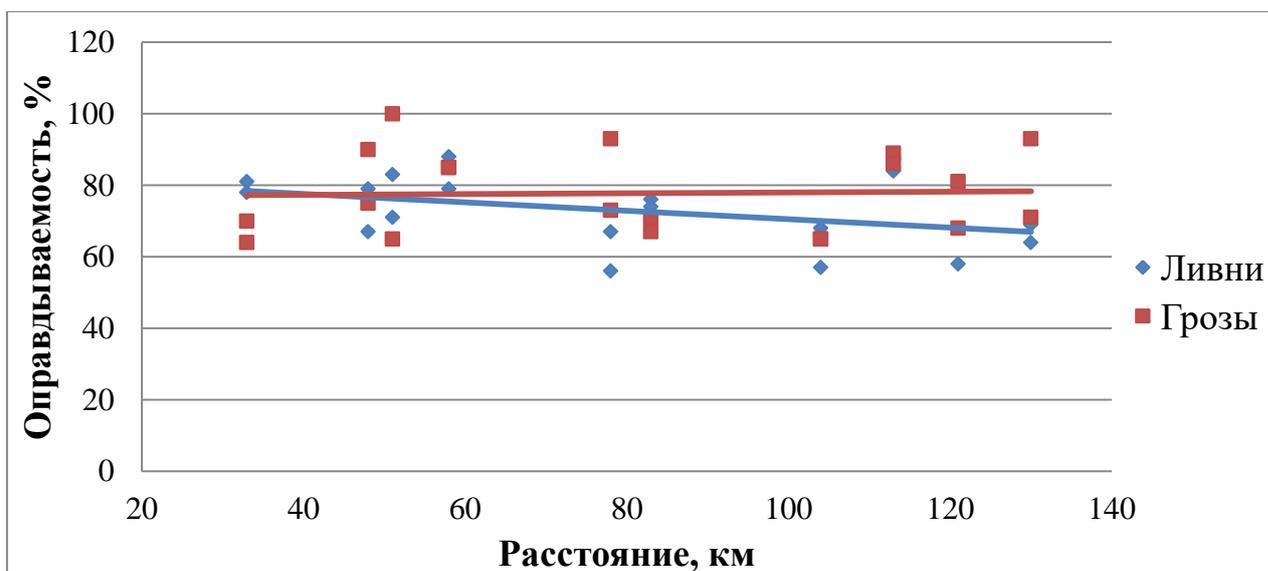


Рисунок 2.5 – Вероятности оправдываемости (а) и достоверности (б) гроз (красные столбцы) и ливней (синие столбцы)

В ходе валидации также было изучено влияние различных факторов на оправдываемость и достоверность ОЯ. Оценка влияния удаленности метеоявления от локатора выполнена с помощью графиков на рисунке 2.6, где

приведено распределение значений оправдываемости и достоверности гроз и осадков по МС, расположенным на разных удалениях от ДМРЛ – от 0 до 140 км. Линии тренда на диаграммах показывают, что с удалением метеостанции от ДМРЛ наблюдается незначительное снижение значений оправдываемости ливней, что можно объяснить уменьшением разрешающей способности ДМРЛ и ослаблением радиолокационного излучения. Достоверность обнаружения ливней на МС, напротив, с ее удалением от ДМРЛ незначительно возрастает. В работе [24] аналогичный результат объясняется тем, что, несмотря на ослабление радиоизлучения и ухудшение разрешения с расстоянием, для реально существующих случаев ОЯ эти эффекты не оказывают столь сильного влияния, и реальные грозы или ливни идентифицируются с помощью ДМРЛ правильным образом.



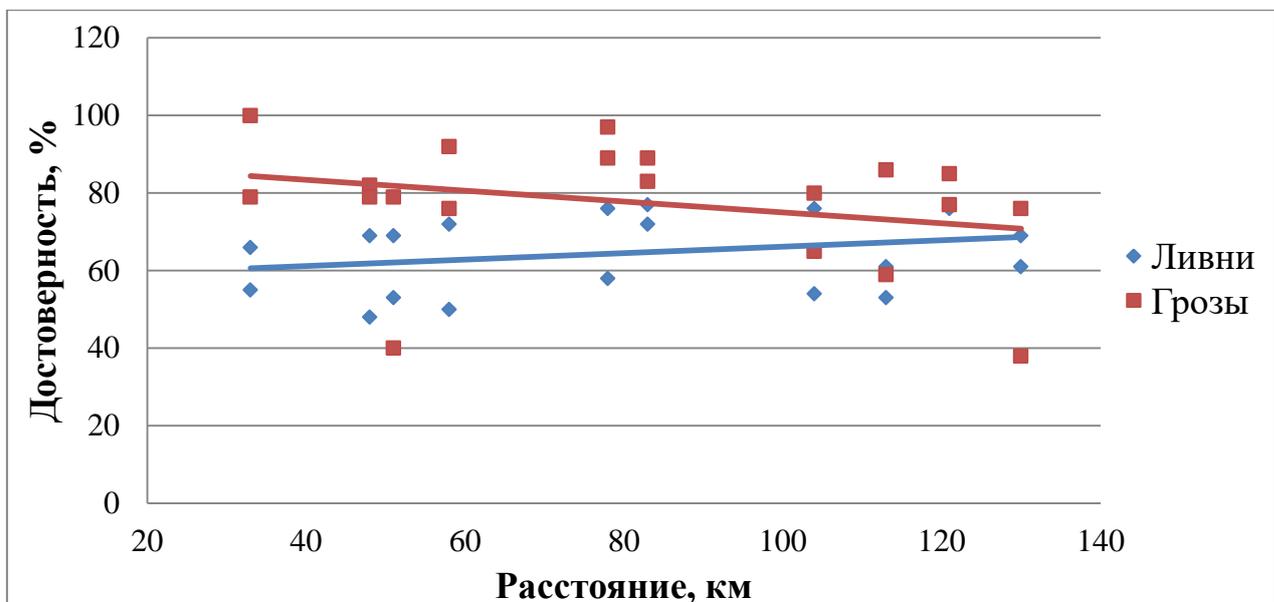


Рисунок 2.6 – Зависимость оправдываемости и достоверности гроз и осадков от расстояния станции от ДМРЛ

Количественно зависимость показателей точности от удаленности станции от ДМРЛ была отражена коэффициентами корреляции, представленными в таблице 2.3. В таблице 2.3 также приведены результаты количественного анализа корреляционной связи оправдываемости и достоверности осадков и гроз высоты МС, а также количества случаев с осадками и грозами [25].

Таблица 2.3 – Коэффициенты парной корреляции

	Удаленность МС от ДМРЛ	Высота МС над уровнем моря	Количество случаев с ливнями	Количество случаев с грозами
R_0 осадков	-0,47	0,62	-0,57	-0,47
R_0 гроз	-0,24	0,02	-0,38	-0,54

Продолжение таблицы 2.3

	Удаленность МС от ДМРЛ	Высота МС над уровнем моря	Количество случаев с ливнями	Количество случаев с грозами
$R_{\text{д осадков}}$	0,46	0,13	0,56	0,15
$R_{\text{д гроз}}$	-0,39	-0,14	0,02	0,37

Приведенные результаты указывают на прямую зависимость оправдываемости осадков от высоты МС (коэффициент корреляции 0,62). Установлена также зависимость показателей от количества случаев с ливнями: рост случаев ливней вызывает увеличение достоверности и уменьшение оправдываемости осадков. Увеличение количества случаев гроз снижает их достоверность.

Зависимость оправдываемости и достоверности гроз и ливней от направления то ДМРЛ отражена на диаграммах в рисунке 2.7.

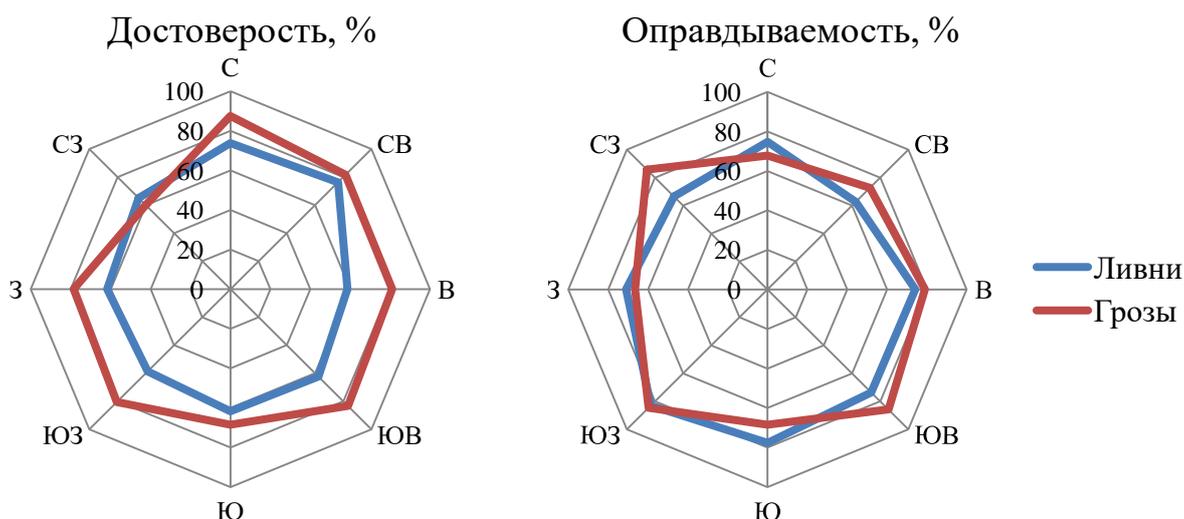


Рисунок 2.7 – Зависимость оправдываемости и достоверности гроз и ливней от направления от ДМРЛ

Из рисунка 2.7 видно, что значения оправдываемости и достоверности обнаружения ОЯ не зависят от направления от ДМРЛ.

На рисунке 2.8 представлена диаграмма, которая иллюстрирует зависимость вероятностей пропуска и ложной тревоги гроз и ливней от направления от ДМРЛ. Из рисунка видно, что вероятность пропуска грозы наименьшая в северно-западном и юго-восточном направлении, а вероятность «ложной тревоги» – северном. Для случаев с ливневыми осадками зависимость от направления не наблюдается.

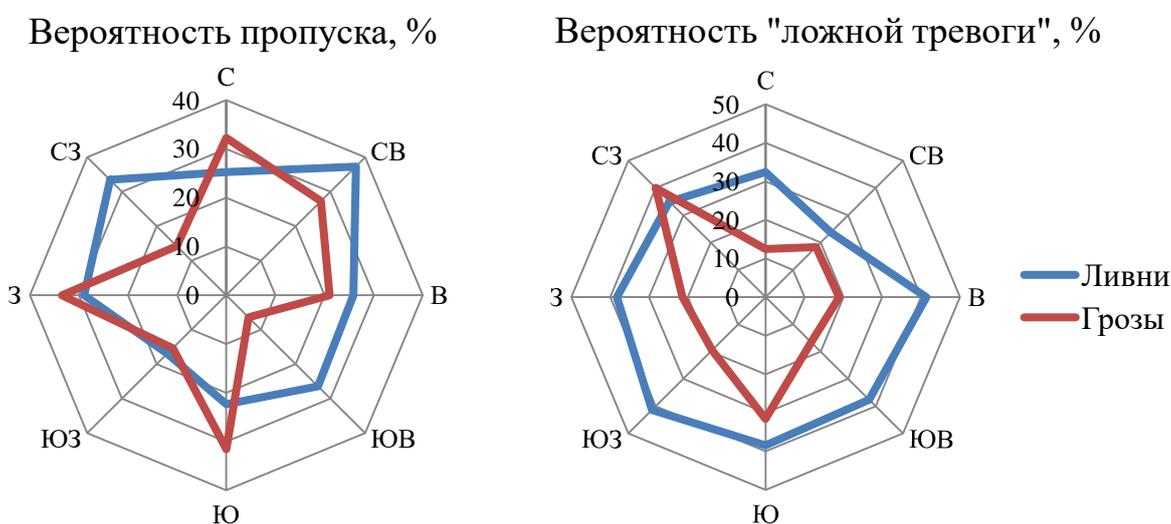


Рисунок 2.8 – Зависимость вероятностей пропуска и «ложной тревоги» гроз и ливней от направления от ДМРЛ

Исследование случаев пропусков гроз во всех рассмотренных случаях, когда ДМРЛ пропустил грозу, был эффект экранирования – на отрезке между ДМРЛ и МС, где зафиксирована гроза, наблюдалась конвективная облачность с осадками. Пример экрана приведен на рисунке 2.9. Кроме того, в 40% случаях пропуска были осадки над ДМРЛ, что указывает на наличие мокрого колпака [26, 27].

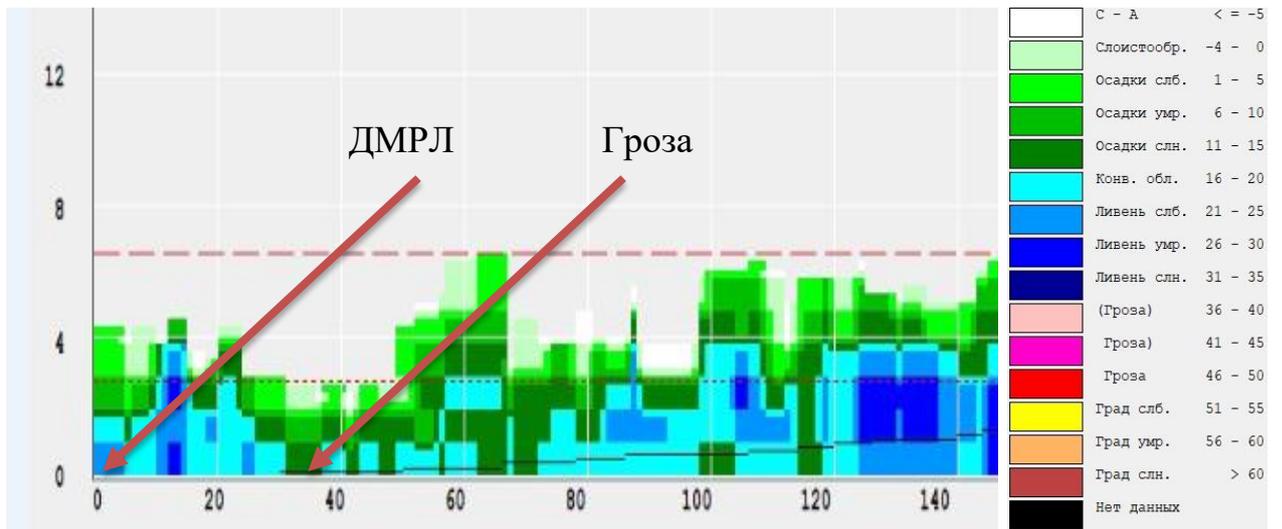


Рисунок 2.9 – Иллюстрация к эффекту экранирования

3 Радиолокационное исследование процесса слияния конвективных облачных систем

Известно, что с конвективной облачностью связаны наиболее опасные явления погоды. Немаловажное значение имеют они и для климата, поскольку влияют на радиационный режим системы земная поверхность — атмосфера путем переноса тепла, влаги, количества движения в верхние слои атмосферы. Зачастую эволюция конвективного облака исследуется изолированно от других облаков, однако большую роль в развитии процесса конвекции и осадкообразовании играет слияние облаков. В работах, приведенных в [27], отмечается увеличение массы облака и потока осадков в 2–3 раза в результате объединения облаков. По данным радиолокационных исследований на юге Флориды, слияние двух облаков средних размеров приводит к увеличению осадков в 10–20 раз, а также показано, что 86% осадков формируется из облаков, которые сливались. Исследователи также отмечали, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных ячеек.

Такой мощный механизм регулирования развития облаков привел к появлению новых способов активных воздействий. Если одно из сливающихся облаков является градовым, а второе, расположенное на более низкой высоте и имеющее достаточно высокий водозапас, попадает в восходящие потоки движущегося градового облака и затягивается в верхнюю его часть, то вследствие этого градовое облако начинает быстро расти в размерах. В радиолокационной литературе ячейки, которые сливаются с более мощным и долгоживущим облаком и подпитывают его влагой получили название фидерных. При активных воздействиях для стимулирования

осадкообразования оказывается влияние на переохлажденную часть фидерных облаков, где происходит формирование условий для зарождения града.

3.1 Механизм слияний конвективных облачных систем

Окончательной ясности в причинах и механизме процесса слияния облаков на сегодняшний день нет. Существуют три теории. Одна заключается в воздействии испарения облачных частиц на увлажнение межоблачного пространства, что приводит к формированию нового облака между сливающимися облаками. Особенно благоприятные условия для этого создаются при сдвиге ветра, который способствует наклону облачной стены и образованию нависающих частей над соответствующим промежутком. Во второй теории причиной развития новой ячейки в межоблачном промежутке считается зона конвергенции на низких уровнях атмосферы. Третья теория объясняет слияние облаков разнонаправленностью их движения, вызванной вращением.

Зачастую перед слиянием ячеек возникают облака нижнего яруса, которые соединяют между собой сливающиеся облака, такая перемычка получила название «облачного моста» (см. рисунок 3.1). Причиной появления «облачного моста», по мнению ряда ученых, является взаимодействие холодных нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками. Появление радиоэха в этом месте обычно объясняется переносом облачных частиц соответствующими потоками в промежуток между сливающимися облаками [27, 28].

Интенсификацию развития слившегося облака объясняют его укрупнением, вследствие чего вовлекающийся сухой воздух оказывает меньшее влияние, чем на отдельные небольшие облака [28].

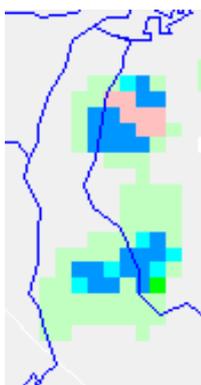


Рисунок 3.1 – Образование «облачного моста» перед слиянием

3.2 Архив данных и анализ результатов, полученных в результате исследования процесса слияния конвективных облачных систем

В качестве исходных данных использовалась радиолокационная информация о распределении конвективных образований. Исследование проводилось с помощью АМРК ДМРЛ «Метеоячейка», расположенного в г. Санкт-Петербург (аэропорт Пулково). Исследование слияния конвективных ячеек проводилось путем изучения структуры горизонтальных разрезов зон радиоэха облаков во всем диапазоне высот: 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 и 4–5 км, измерялись максимальная радиолокационная отражаемость (Z , dBz) на длине волны 3,2 см, высота верхней границы радиоэха ($H_{вз}$, км), высота зоны повышенной отражаемости (H_{Zmax} , км) и высота максимальной отражаемости (H_{max} , км). Радиолокационные наблюдения за динамикой развития конвективных облаков проведены за 4 месяца летнего периода 2012-2013 гг. Полученный архив радиолокационных данных представлен в таблице Б.1 Приложения Б.

На рисунке 3.2 представлен пример слияния конвективных ячеек, видимый на экране комплекса «Метеоячейка»: а – до слияния, б – образование облачного моста; в – объединенное облако.

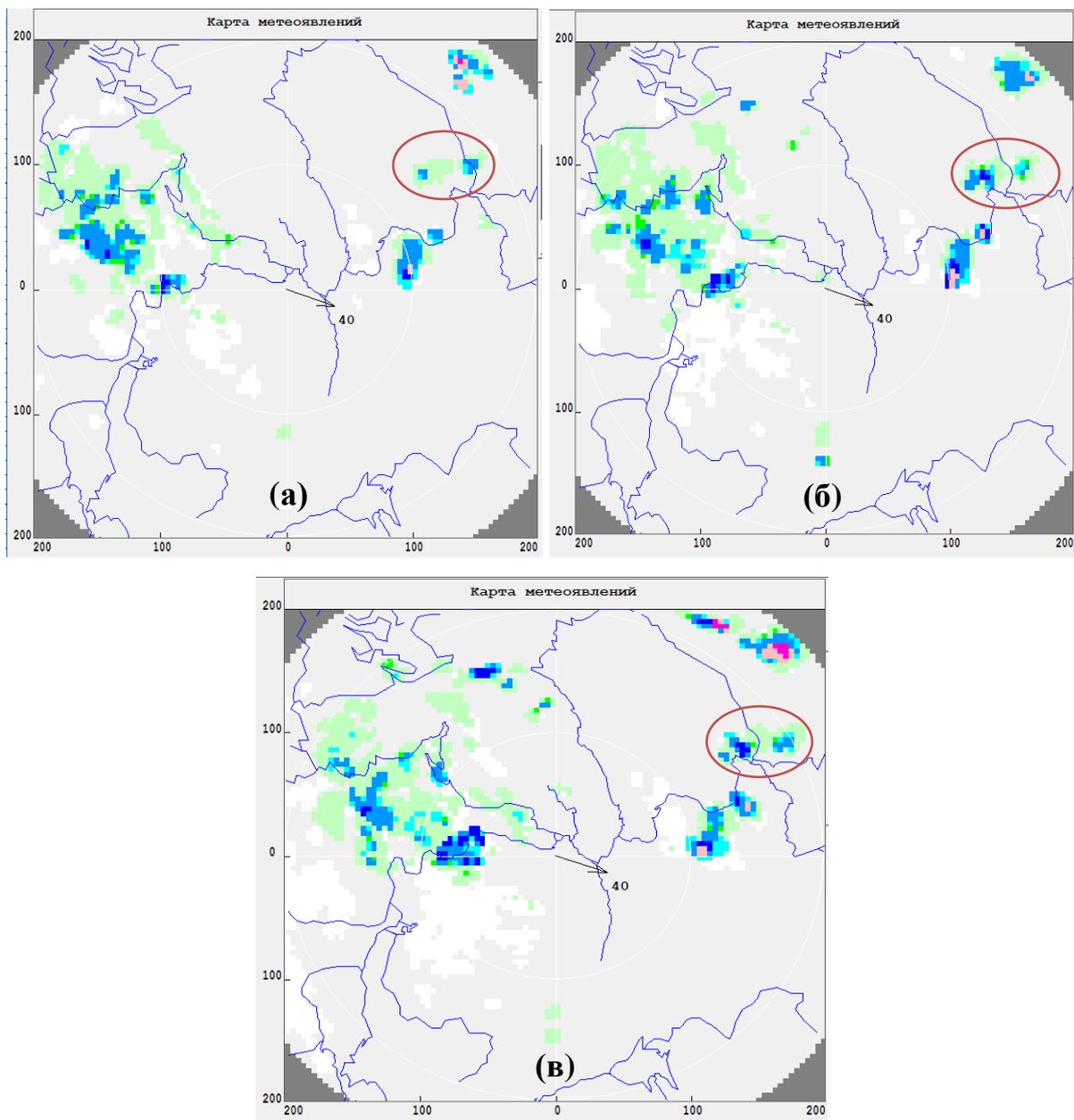


Рисунок 3.2 – Метеоявления в 8:56 (а), 9:06 (б) и 9:16 (в)

Распределение случаев слияния облаков по месяцам и времени суток представлено на гистограммах рисунок 3.3. По летним месяцам слияния облаков происходят довольно равномерно. Что касается времени суток – чаще утром и днем, реже – вечером, единичные случаи слияний наблюдались ночью.

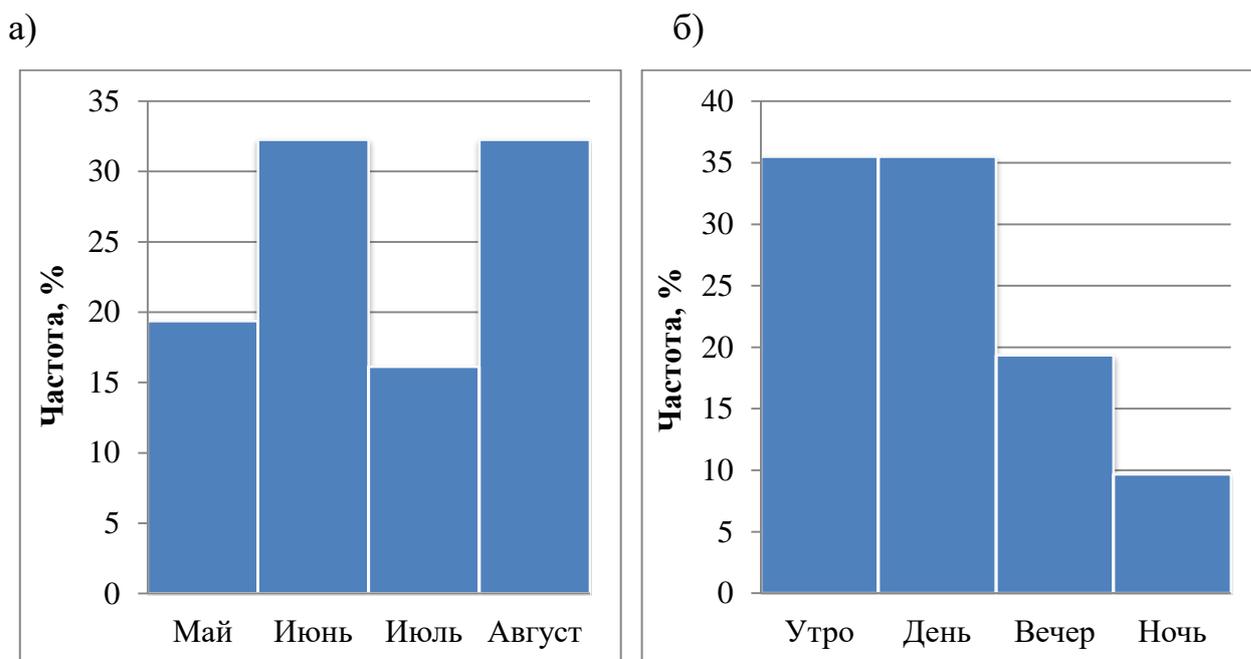


Рисунок 3.3 – Распределение случаев слияния облаков по месяцам (а) и времени суток (б)

На рисунке 3.4 показана карта изолиний повторяемости случаев слияния КЯ. Обнаружено небольшое преимущество слияний над поверхностью суши – 61%, остальные над водой – 39%, (над Финским заливом и Ладожским озером) слияний над территорией города зафиксировано не было [28].

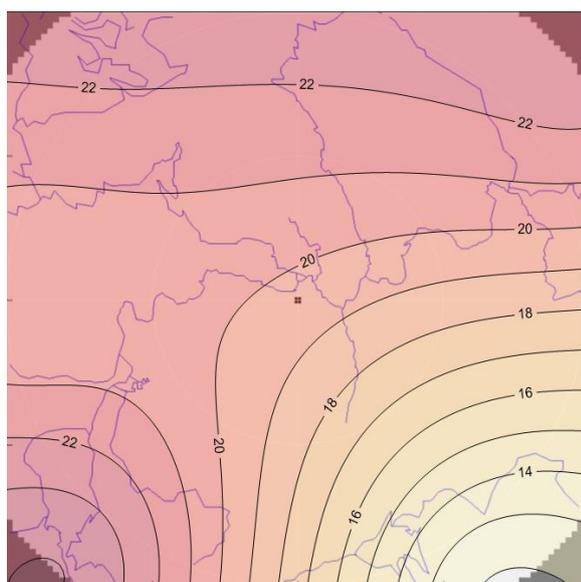
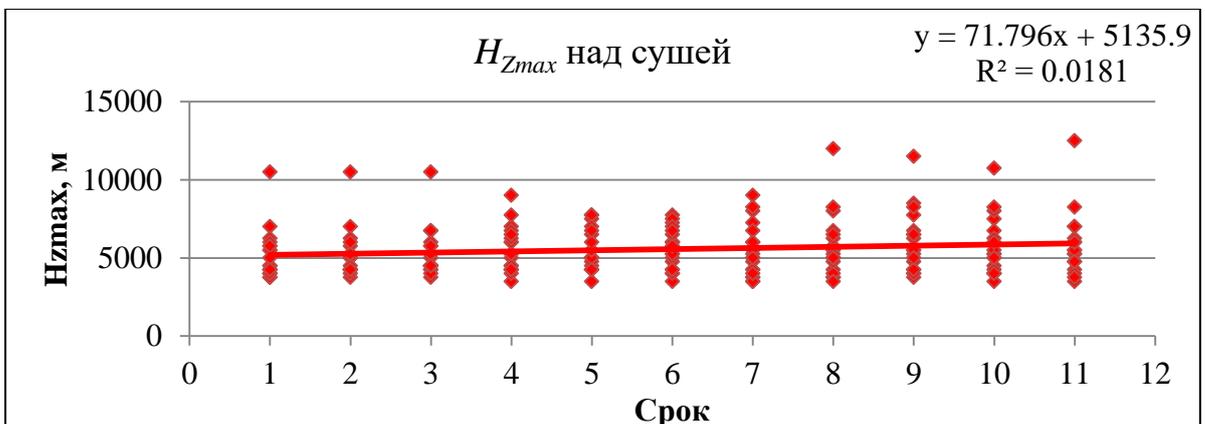
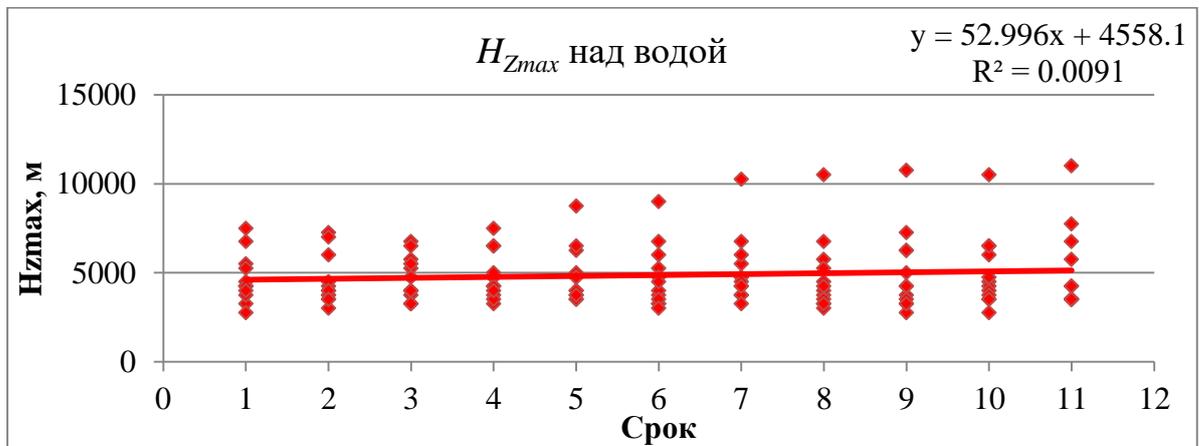


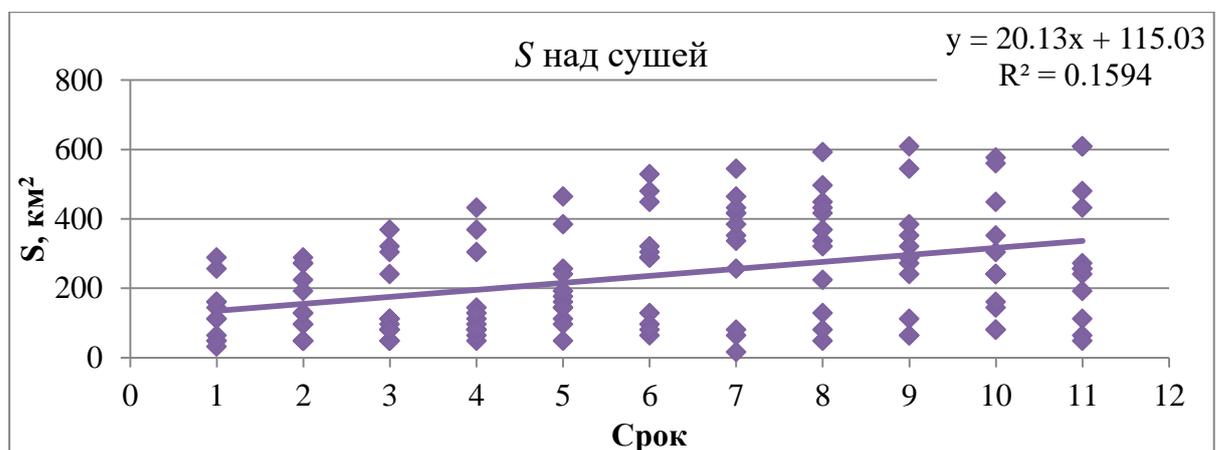
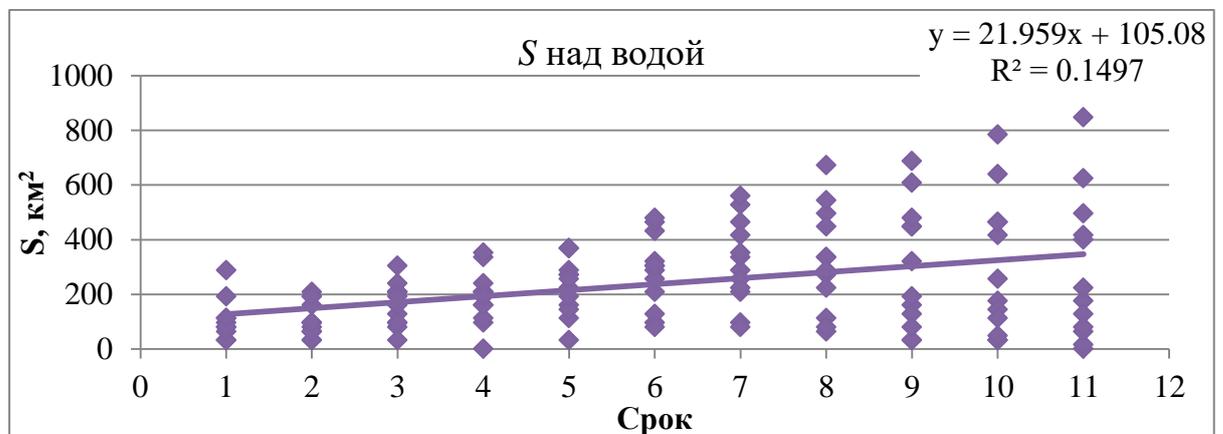
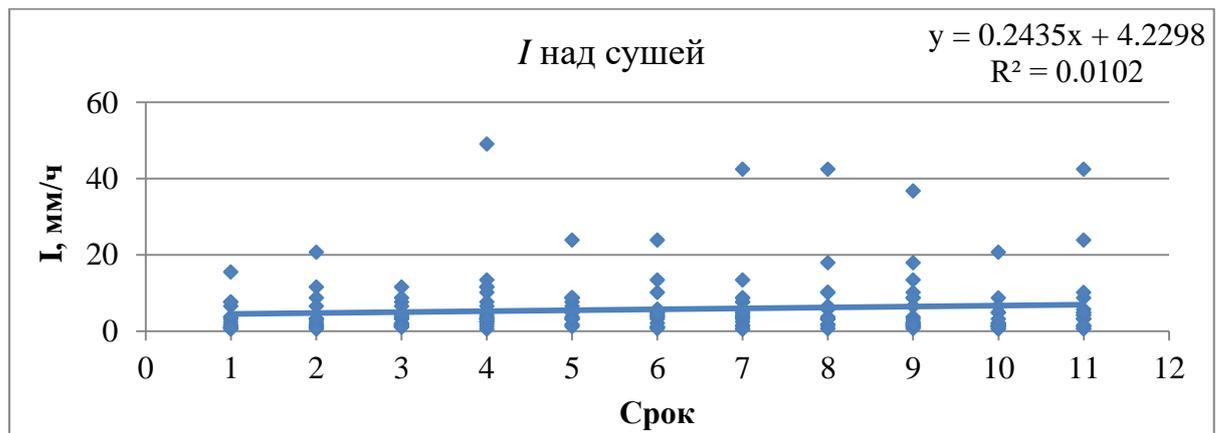
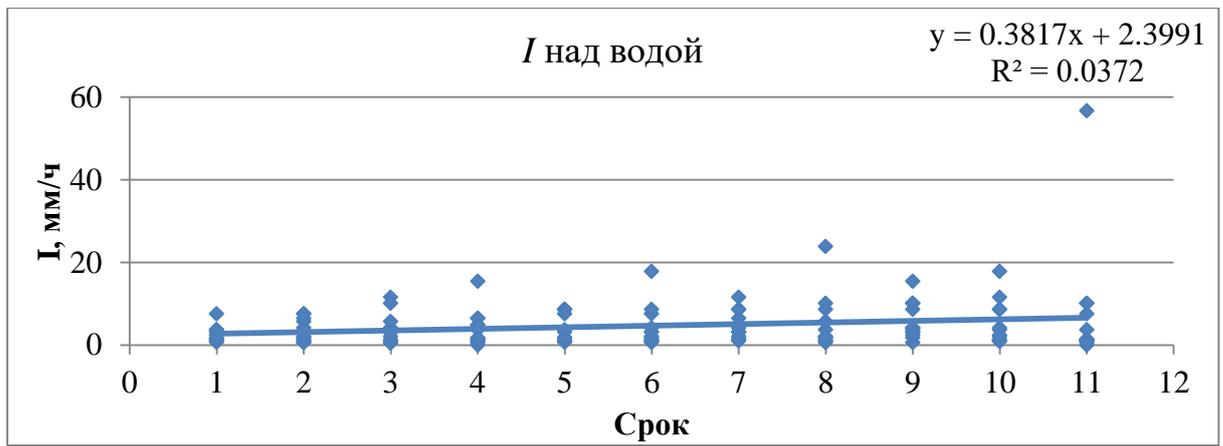
Рисунок 3.4 – Повторяемость (%) случаев слияний КЯ

На рисунках 3.5 показаны графики временной динамики высоты зоны повышенной отражаемости (H_{Zmax} , км), интенсивности (I , мм/ч) и площадь осадков (S , км²) и интегральной водности (VIL , кг/м²), рассчитанной по формуле 3.1, в зависимости от типа подстилающей поверхности (суша / вода), над которой наблюдались случаи слияния КЯ. Временная ось отражает пять сроков до слияния и пять после, где 6-й срок является моментом слияния КЯ.

$$VIL = 3,14 \cdot 10^{-6} \times \sum \left[\frac{(Z_i + Z_{i+1})}{2} \right]^4 \times \Delta h, \quad (3.1)$$

где Z_i – отражаемость в столбе i -том дискрете по высоте;
 Δh – шаг по высоте от i -го до $i+1$ дискрета по высоте.





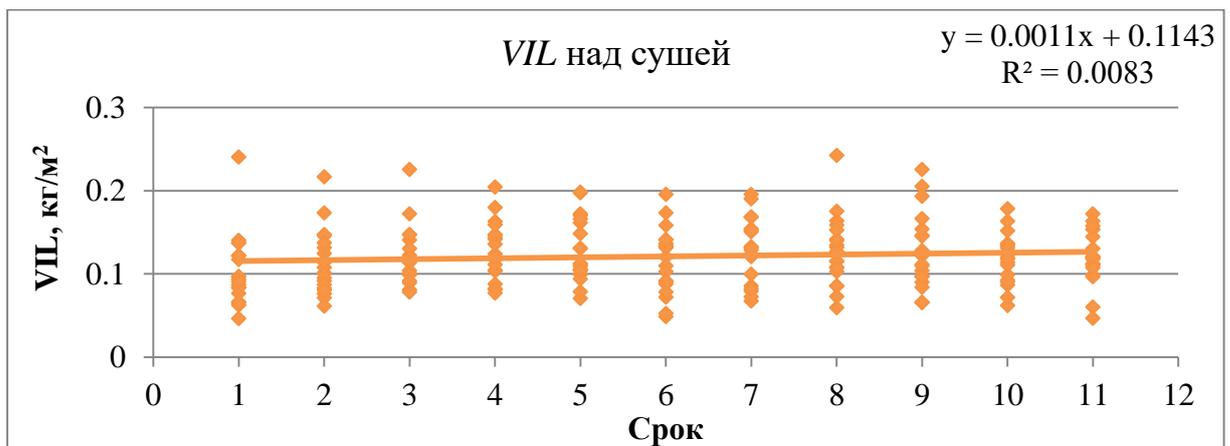
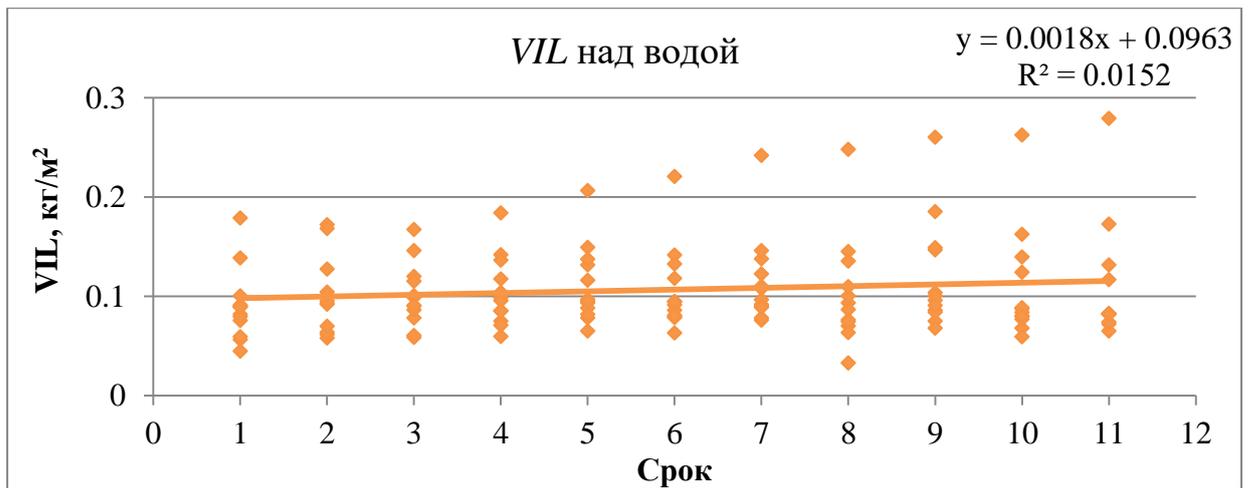
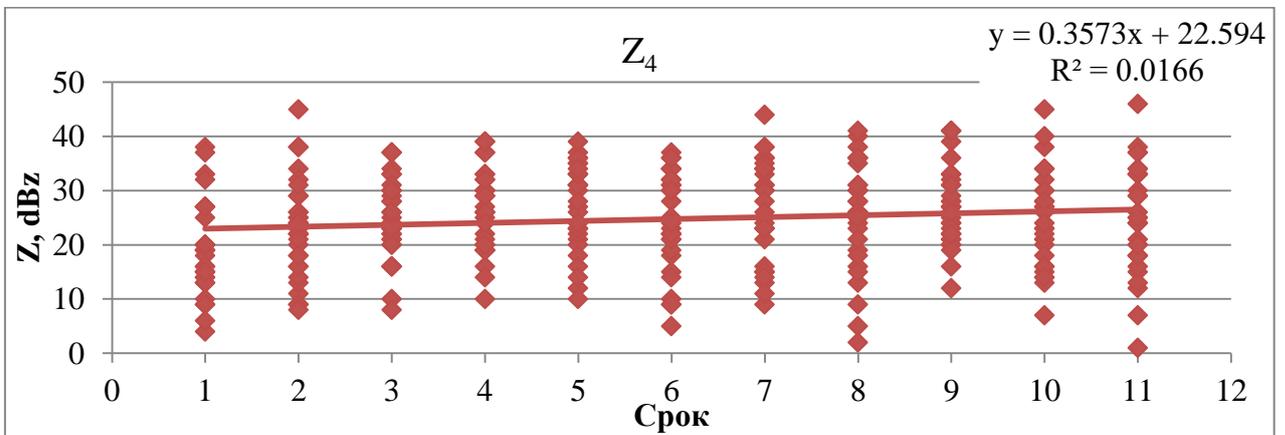
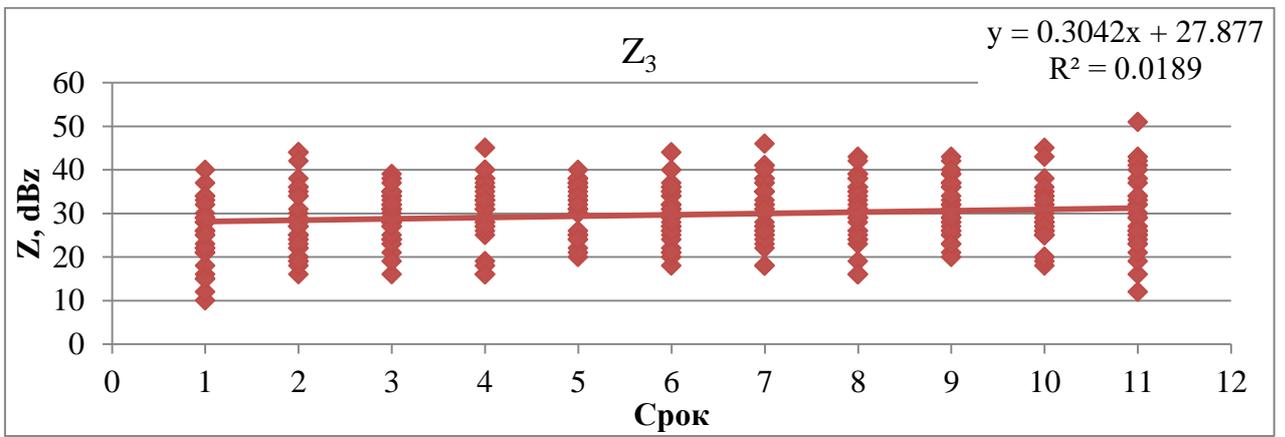
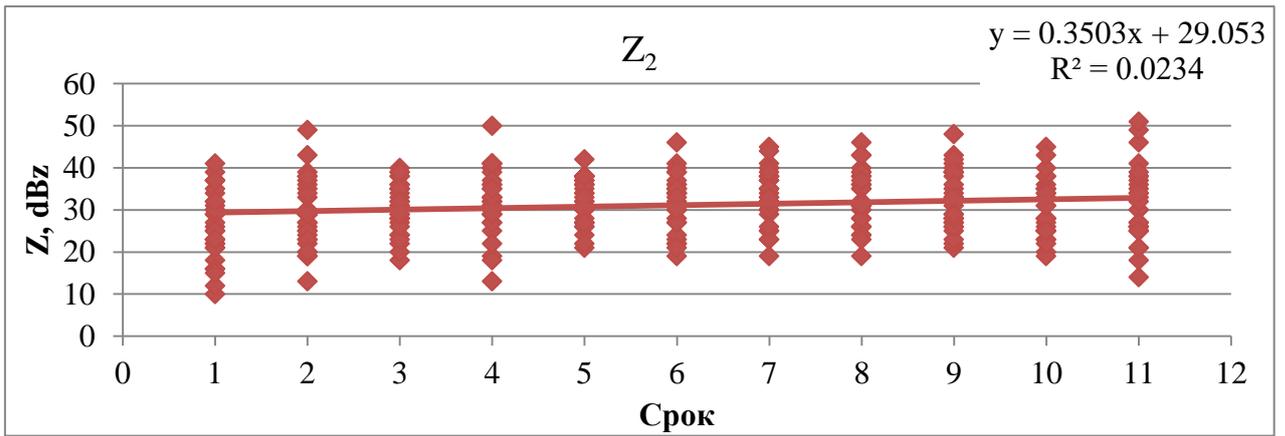
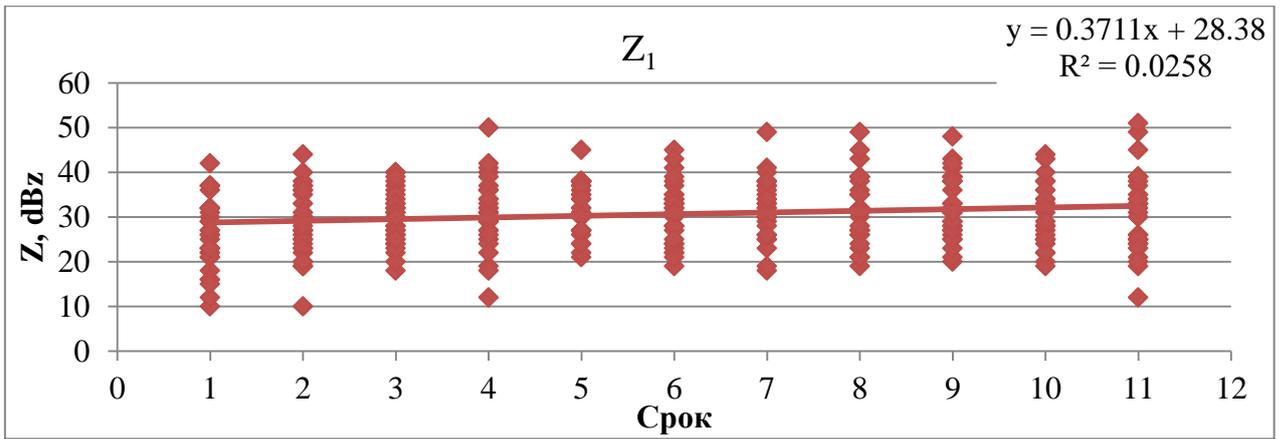


Рисунок 3.5 – Временная динамика параметров H_{Zmax} , I , S , VIL

Из графиков видно, что подстилающая поверхность не оказывает особого влияния на процессы слияния КЯ.

Изменение радиолокационной отражаемости Z на пяти уровнях вследствие слияния КЯ иллюстрирует графики на рисунках 3.6 и 3.7. Временная ось на рисунке 3.6 отражает пять сроков до слияния и пять после. На рисунке 3.7 представлены вертикальные профили отражаемости: голубые линии – до слияния КЯ, черная – в момент слияния, красные – после. Заметен рост отражаемости на первых трех уровнях после слияния [29].



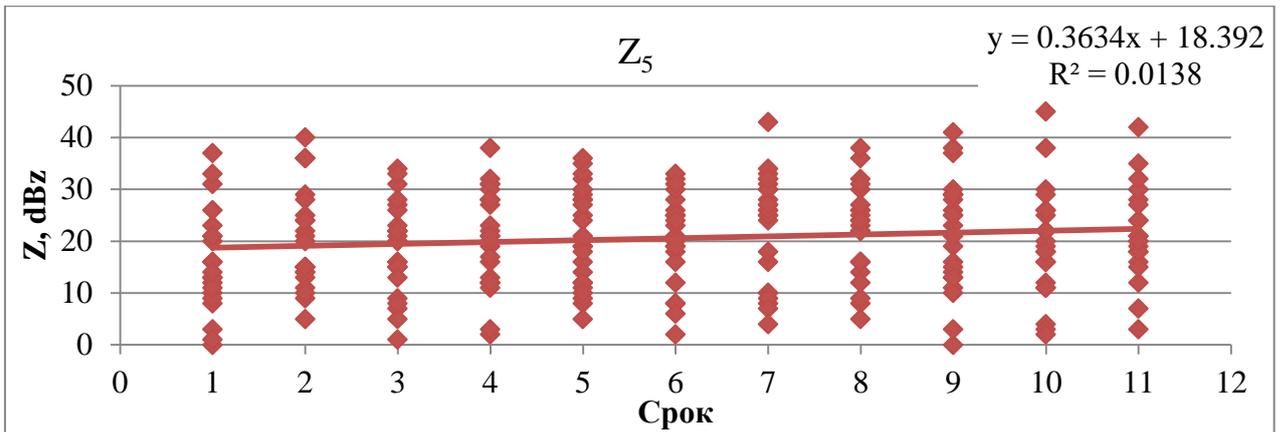


Рисунок 3.6 – Изменение радиолокационной отражаемости на пяти уровнях за пять сроков до слияния и пять после, слияние КЯ на 6-м сроке

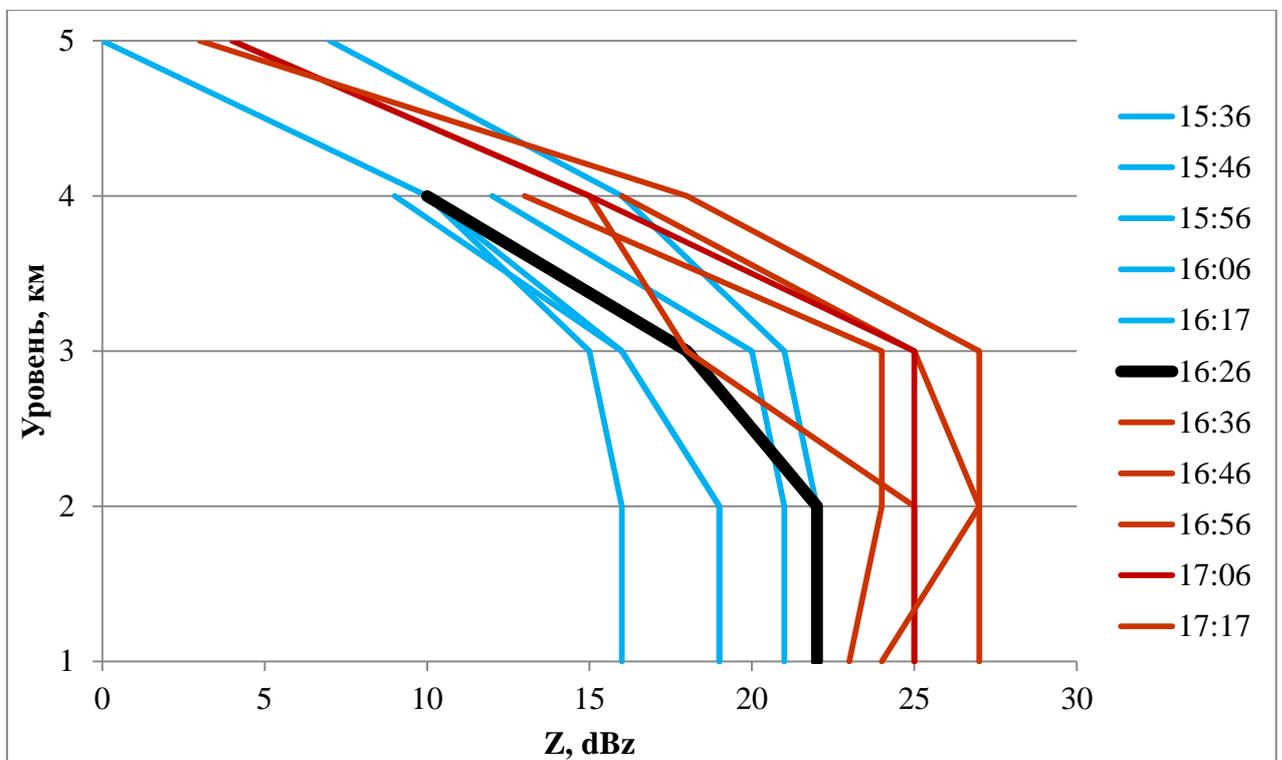


Рисунок 3.7 – Пример профилей отражаемости Z : голубые линии – до слияния КЯ, черная – в момент слияния, красные – после

Исследование также показало разнонаправленный характер изменения других показателей после слияния конвективных систем. Так, высота максимальной отражаемости H_{Zmax} как растет после слияния КС, так и

уменьшается (см. рисунок 3.8). Гистограмма на рисунке 3.8 представляет собой распределение градиента скорости H_{Zmax} , рассчитываемого как отношение скорости H_{Zmax} за 5 сроков до слияния к скорости H_{Zmax} за 5 сроков после слияния. Значение единицы соответствует отсутствию реакции на слияние. Значения градиента больше единицы соответствуют случаям увеличения H_{Zmax} после слияния, от 1 до 0 – замедление скорости, отрицательный градиент - понижение высоты. Как видно из гистограммы, в большинстве случаев рост высоты замедлялся или прекращался совсем после слияния [30].

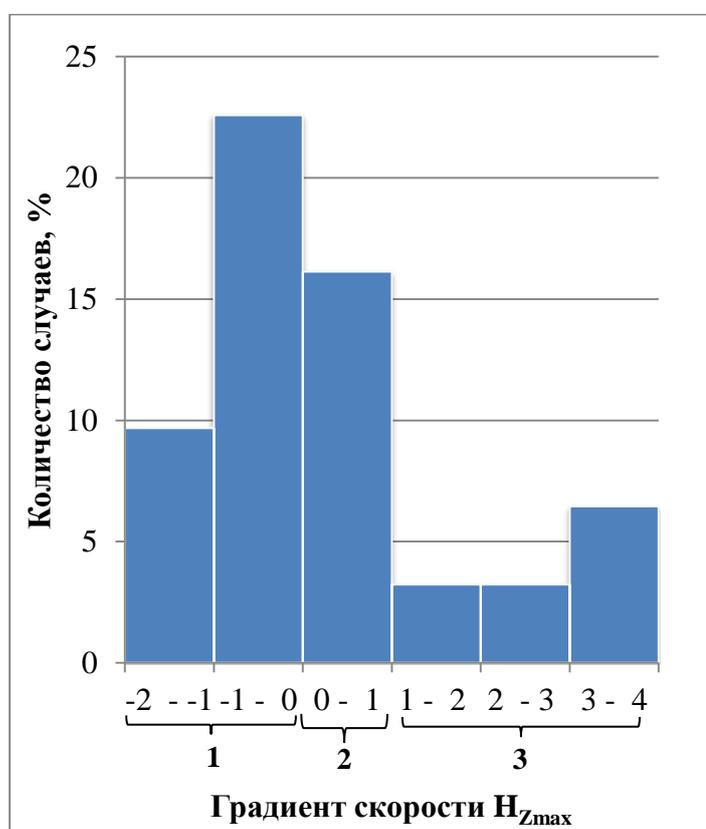


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения градиента скорости H_{Zmax} : 1 – понижение высоты после слияния; 2 - замедление скорости; 3 – рост скорости

В ходе исследования было установлена зависимость характера изменения интенсивности осадков от стадии жизненного цикла КЯ, на которой происходит процесс слияния. Известно, что КЯ, так же как

изолированные конвективные облака, на протяжении своего существования проходят три стадии развития: роста, зрелости и разрушения. Начальная стадия формирования и роста ячеек характеризуется преобладанием во всей их толще восходящих движений, которые способствуют активному процессу облако и осадкообразования. Об этом свидетельствует рост высоты, площади и радиолокационной отражаемости ячеек. Следующая стадия – стадия зрелости, когда рост высоты облачных ячеек прекращается. Заключительная стадия – стадия диссипации конвективных ячеек, наблюдается не только опускание верхних границ ячеек, но и быстрый подъем их оснований вследствие разрушения их капельных частей, ослабление осадков и их прекращение [31].

Все случаи слияния КЯ были разделены на три группы, в зависимости от того, на какой стадии КЯ находились до начала слияния. Деление производилось по значению высоты максимальной отражаемости H_{Zmax} . Первую группу составили случаи, в которых наблюдался рост H_{Zmax} , причем скорость роста была не менее 3%. Во вторую группу отнесены случаи с постоянной высотой (скорость H_{Zmax} не выходила за диапазон -3% – +3%). На первой и второй стадии наблюдался также рост площади с максимальной отражаемостью. Третья группа – высота и площадь уменьшаются.

Распределение случаев на группы представлено в виде гистограммы на рисунке 3.9. Большинство слияний происходит на 1-й и 2-й стадиях развития, на третьей стадии случаи слияния КЯ редки.

Примеры графиков временной динамики высоты максимальной отражаемости H_{Zmax} , интенсивности I и площади S осадков приведены на рисунке 3.10. Для сопоставления значения H_{Zmax} , I и S нормированы. На графиках показаны 11 сроков радиолокационного обзора, 5 до слияния КЯ, 5 после, медианное значение соответствует моменту слияния.

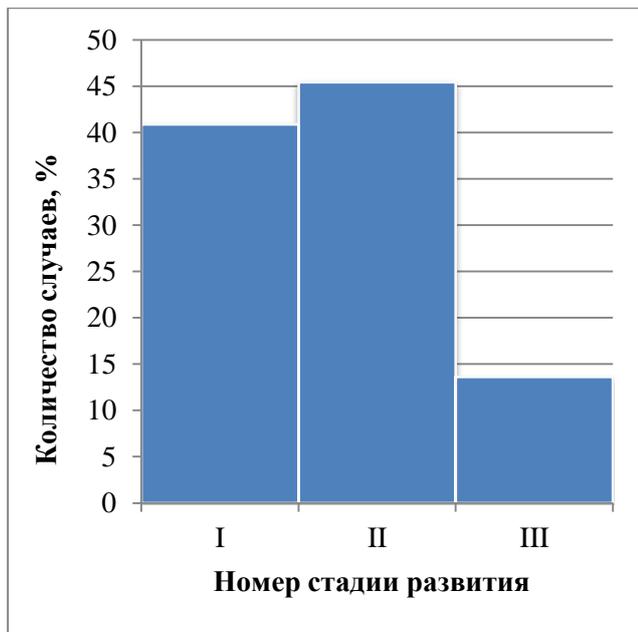
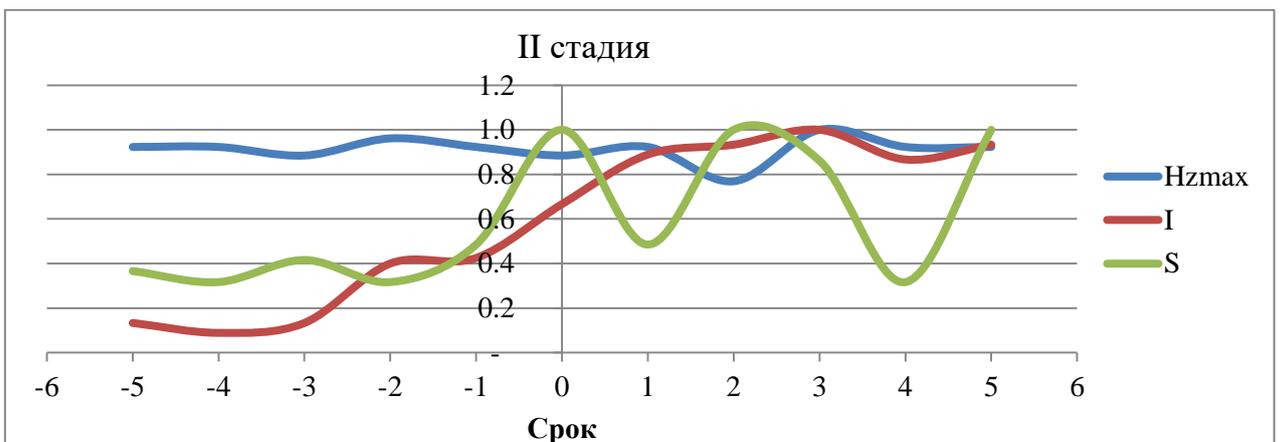
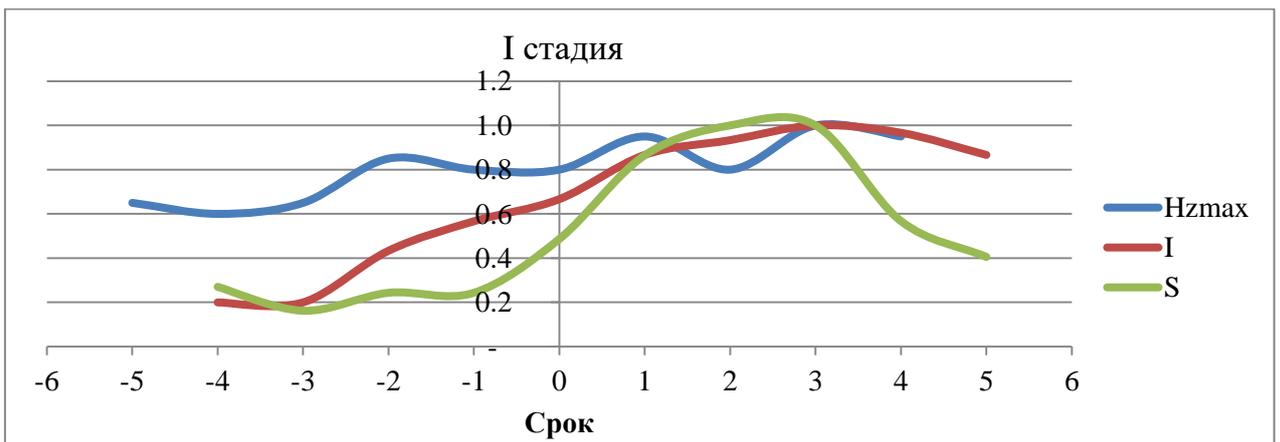


Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения градиента H_{Zmax}



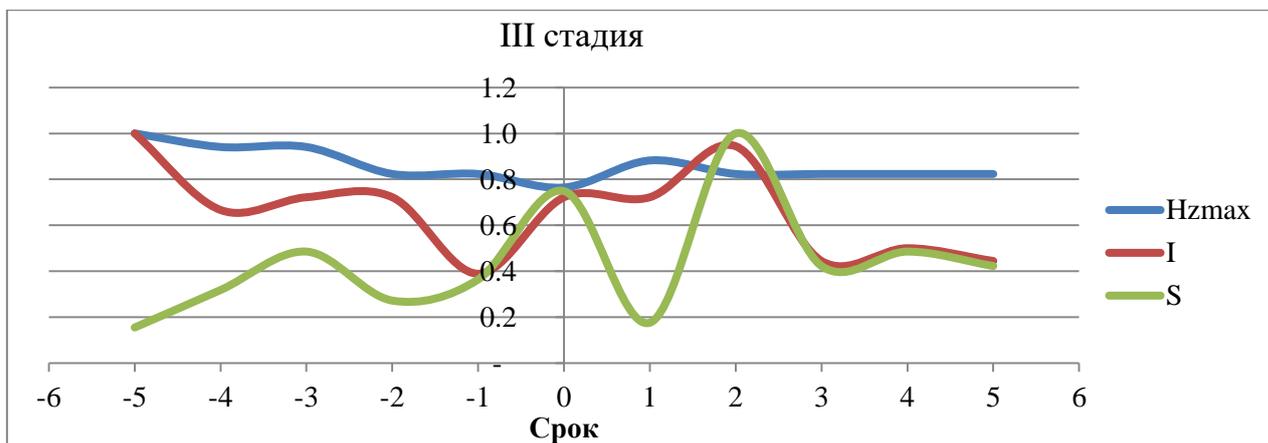
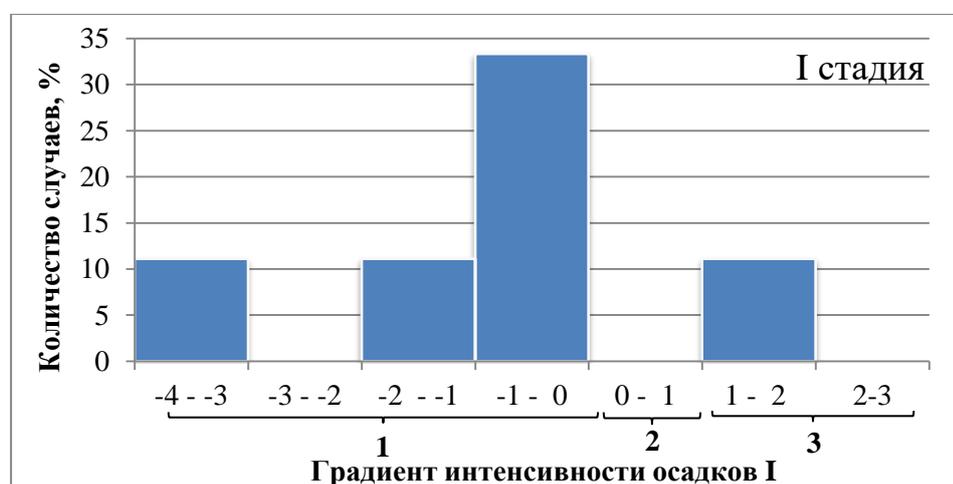


Рисунок 3.10 – Динамика площади S и интенсивности I осадков, высоты максимальной отражаемости H_{Zmax} в процессе слияния КЯ

Результаты исследования интенсивности осадков на разных стадиях представлены на рисунке 3.11. Гистограммы представляют собой распределение градиента интенсивности при слиянии на первой стадии (см. рисунок 3.11а) и на второй (см. рисунок 3.11б). Градиент интенсивности рассчитывался аналогично градиенту H_{Zmax} : отношение скорости интенсивности за 5 сроков до слияния к скорости за 5 сроков после слияния. Как видно из гистограмм, возрастание интенсивности после слияния, о котором говорилось в начале, происходит при слиянии на второй стадии. Слияние с КЯ, находящейся на 1 стадии, гасит интенсивность осадков [30].

а)



б)

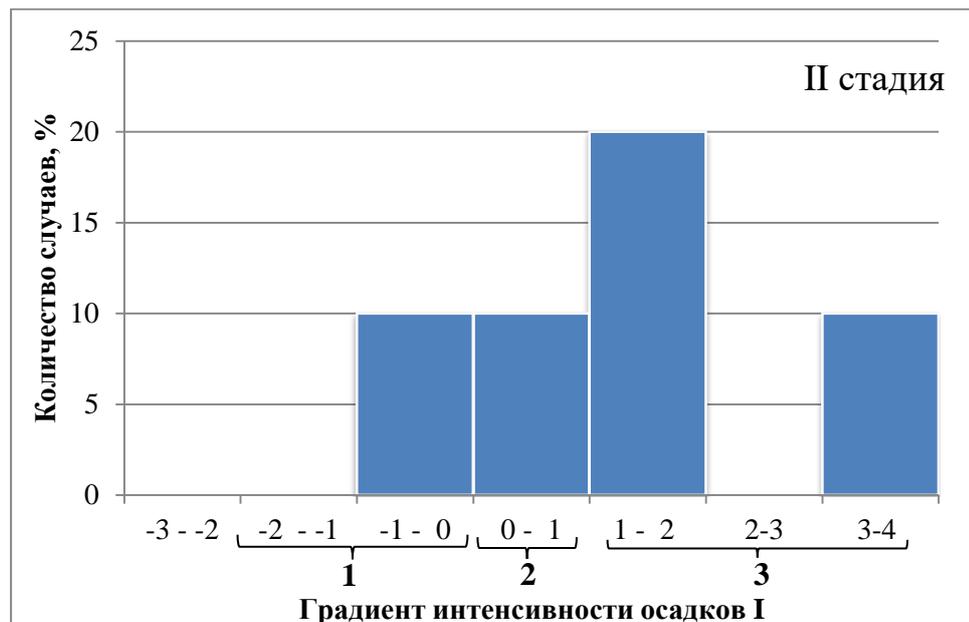


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения градиента скорости осадков при слиянии КЯ на первой стадии (а) и второй стадии (б): 1 – понижение интенсивности после слияния; 2 – замедление скорости интенсивности после слияния; 3 – рост скорости интенсивности после слияния.

4 Оценка продолжительности и интенсивности ливневых осадков по данным ДМРЛ

Прогноз продолжительности и интенсивности ливневых осадков является достаточно непростой задачей. С одной стороны, образование осадков связано с макромасштабными динамическими движениями атмосферы. С другой – выпадение осадков – это локальное явление, управляемое микрофизическими процессами, масштаб которых зачастую меньше размера сетки передовых моделей численного прогноза погоды. Вследствие несовместимости масштабов выпадающих осадков и численных моделей, возможности последних при прогнозе осадков в определенном месте и для коротких периодов времени весьма ограничены. Наилучшей стратегией количественных прогнозов ливневых осадков на короткие периоды в настоящее время является *наукастинг*.

По определению ВМО наукастинг (nowcasting) – это сверхкраткосрочный прогноз явлений погоды до 6 часов от срока наблюдения [6]. Наукастинг содержит подробное описание текущей погоды, а также прогнозы, полученные путем экстраполяции данных. За такие промежутки времени можно прогнозировать ОЯ с довольно высокой точностью. Синоптик, использующий новейшие радиолокационные, спутниковые и данные с наземных МС, способен анализировать мелкомасштабные процессы, присутствующие в небольшой области, например в районе города, и делать точный прогноз на ближайшие несколько часов. Поэтому наукастинг является мощным инструментом предупреждения о надвигающихся опасных явлениях погоды, таких как, сильные ливни, град, гроза, которые могут угрожать населению, наносить ущерб стратегически важным отраслям экономики.

Радиолокационные наблюдения подходят наилучшим образом в качестве основания для оперативного наукастинга ливневых осадков, поскольку они обеспечивают высокое пространственное (обычно 2 км) и временное (10 мин) разрешение. Таким образом, экстраполирование радиолокационных эхо-сигналов является основой наукастинга, причем с помощью них можно определять размеры, форму, интенсивность, скорость и направление движения отдельных облачных систем. Это позволяет экстраполировать вероятное местоположение движущейся бури. Можно оценить интенсивность и продолжительность осадков из определенного облака или группы облаков [32, 33].

4.1 Прогнозирование с применением математического аппарата множественной регрессии

Регрессионные модели являются наиболее широко используемые из статистических методов. Наиболее распространенными применениями статистических методов являются моделирование и прогнозирование: исследование и установление взаимосвязи между несколькими переменных. Метод регрессионного анализа использует описание объекта исследования в виде некоего полинома – отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестное уравнение связи некой случайной величины y от случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n .

При регрессионном анализе случайная величина y представляется в виде суммы функций от случайных величин x_1, x_2, \dots, x_n и случайной величины ε – ошибки (невязка) регрессии.

Модель множественной регрессии имеет вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (4.1)$$

где $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ – коэффициенты регрессии;
 ε – ошибки (невязки) регрессии.

Основной задачей регрессионного анализа является нахождения таких функций, при x_1, x_2, \dots, x_n , которая обеспечивала бы понимаемую в вероятностном смысле максимальную близость ее значений к значениям предиктанта y [34].

4.2 Архив радиолокационных данных и анализ результатов, полученных в результате исследования

В качестве исходных данных использовались результаты радиолокационного зондирования, выполненного с помощью ДМРЛ, установленным в аэропорту Пулково г. Санкт-Петербурга.

В ходе исследования были рассмотрены 46 случай с ливневыми осадками за 4 месяца летнего периода 2012-2013 гг. В момент начала осадков измерялись следующие радиолокационные параметры:

Z – максимальная радиолокационная отражаемость облака во всем диапазоне высот: 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 и 4–5 км (dBz);

H_I – высота верхней границы радиоэха (км);

I_I – интенсивность выпадения осадков (мм/ч);

S_I – площадь осадков (км²).

По окончанию выпадения ливневых осадков фиксировалась их длительность (Δt , мин) и скорость перемещения облака (V , км/мин). Кроме того, по формуле 3.1 рассчитывалась вертикальная интегрированная водность облака (VIL_I) в момент начала осадков. Полученный архив данных представлен в таблице В.1 в Приложении В.

4.2.1 Корреляционный анализ

Временные ряды отражаемостей Z на двух уровнях: 0-1 и 1-2 км и продолжительности осадков $\Delta\tau$ представлены на рисунке 4.1. На рисунке 4.2 – временные ряды отражаемостей (Z) на двух уровнях: 0-1 и 1-2 км и интенсивности осадков (I_I). Из графиков хорошо заметна корреляционная связь между представленными параметрами.

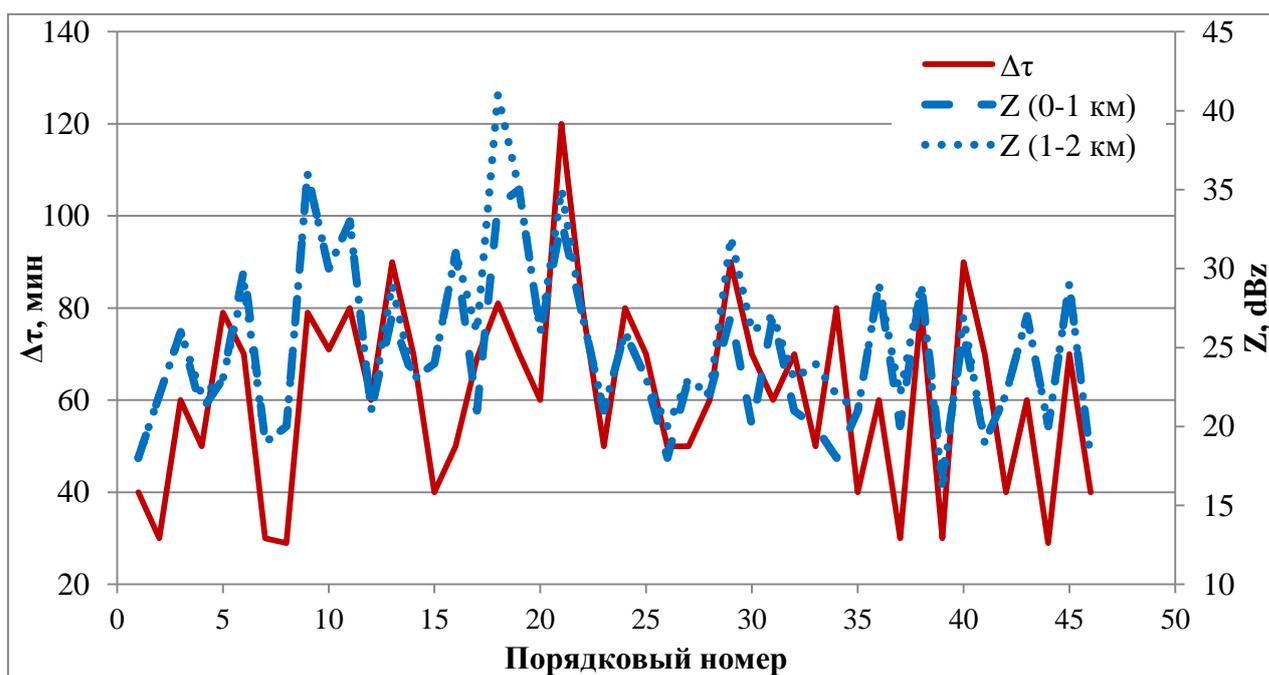


Рисунок 4.1 – Временные ряды отражаемостей на двух уровнях и продолжительности ливневых осадков

Количественная оценка связи продолжительности и интенсивности ливней и радиолокационными характеристиками в первый срок выпадения осадков дана с помощью парных коэффициентов линейной корреляции, представленных в таблице 4.1.

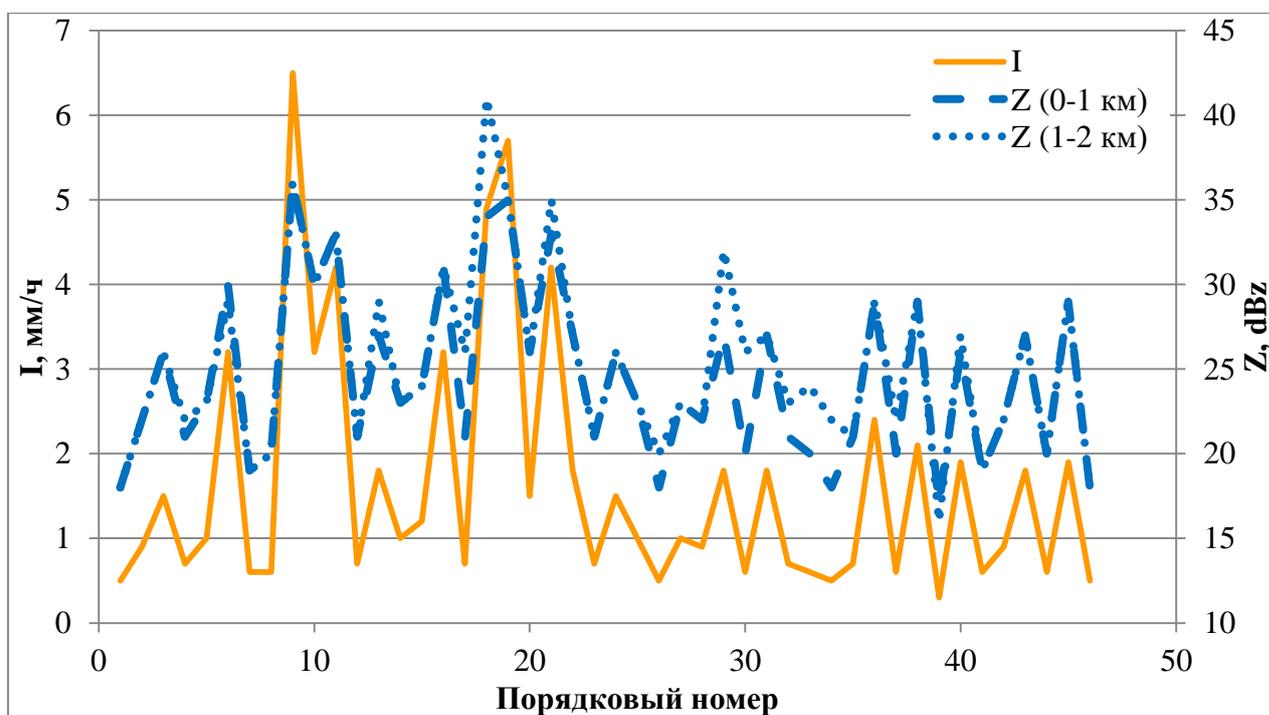


Рисунок 4.2 – Временные ряды отражаемостей на двух уровнях и интенсивности ливневых осадков

Таблица 4.1 – Парные коэффициенты корреляции

	V	Z					H ₁	I ₁	S ₁	VIL ₁
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5				
$\Delta\tau$	-0,14	0,60	0,68	0,62	0,47	0,28	0,36	0,52	0,32	0,53
I ₁	-0,02	0,94	0,89	0,82	0,56	0,33	0,12	1,00	0,45	0,53

Полученные в результате исследования парные коэффициенты корреляции показывают заметную связь продолжительности выпадения ливневых осадков ($\Delta\tau$) с максимальной радиолокационной отражаемостью облака Z в слое 1-2 км ($r = 0,68$), с интенсивностью осадков I_1 ($r = 0,52$) и с интегральной водностью облака VIL_1 ($r = 0,53$). Высокая корреляционная связь обнаружена между интенсивностью осадков и максимальной радиолокационной отражаемостью облака Z в слоях 0-1 и 1-2 км ($r = 0,94$ и $0,89$ соответственно) [35].

4.2.2 Уравнения регрессии продолжительности и интенсивности ливневых осадков

С помощью математического пакета «Анализ данных», встроенного в Microsoft Excel, были получены уравнения множественной регрессии для продолжительности $\Delta\tau$ и интенсивности ливневых осадков I , от различных радиолокационных параметров.

Уравнение множественной регрессии для продолжительности ливневых осадков от значений радиолокационной отражаемости Z на первом и втором уровнях:

$$\Delta\tau = -0,87 - 1,30Z_1 + 3,71Z_2 \quad (4.2)$$

Коэффициент детерминации полученного уравнения: 0,47. Графики невязок для двух переменных представлены на рисунке 4.3.

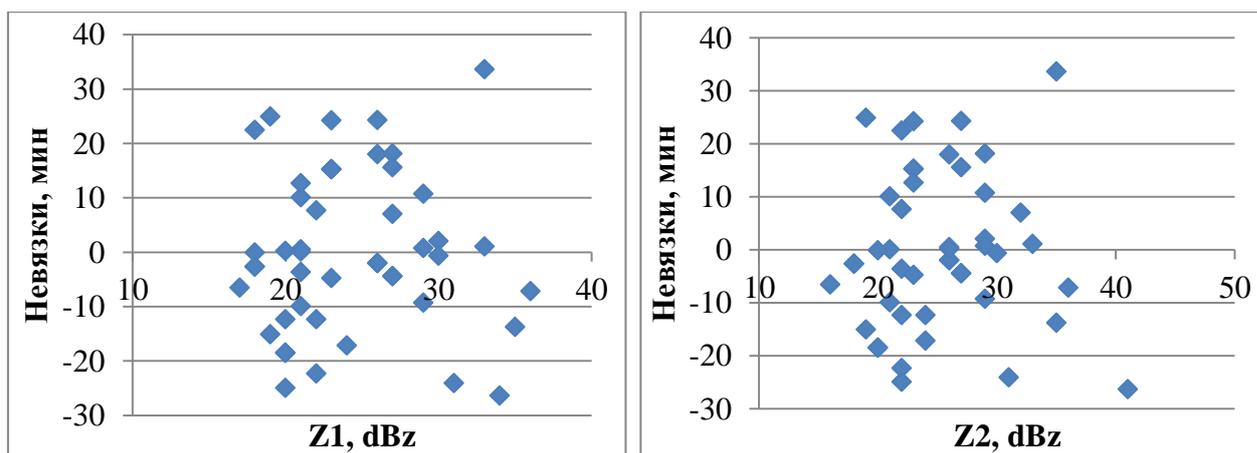
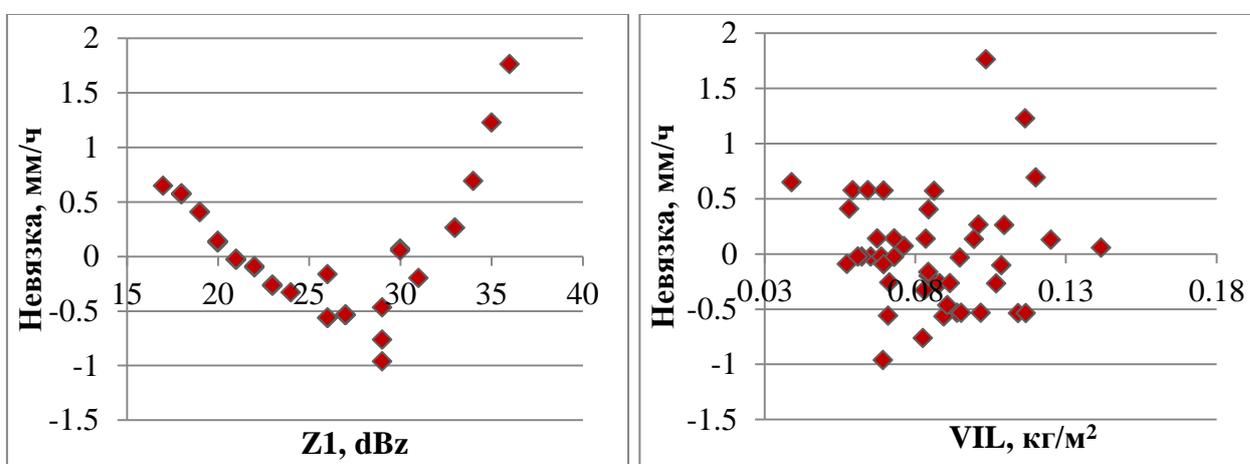


Рисунок 4.3 – Графики остатков для Z_1 и Z_2

Уравнение множественной регрессии для интенсивности осадков от значений интегральной водности и радиолокационной отражаемости на первом уровне имеет вид:

$$I = -4,89 + 0,27Z_1 + 0,24VIL \quad (4.3)$$

Коэффициент детерминации полученного уравнения: 0,87. Графики невязок для двух переменных представлены на рисунке 4.3 [35].



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной выпускной квалификационной работы магистра была освоена методика проведения наблюдений за ливневыми осадками и грозами с помощью ДМРЛ, а также была проведена качественная и количественная оценка информации, получаемая в результате его работы для решения различных задач, а именно исследования слияния КЯ и оценки продолжительности и интенсивности ливневых осадков.

В результате валидации радиолокационных данных об осадках и грозах были получены следующие результаты:

- На массиве радиолокационных обзоров за теплые месяцы 2012-2013 гг. путем сравнения с измерениями на МС выявлены случаи необнаружения доплеровским МРЛ осадков и гроз.
- Выполнена оценка точности работы алгоритмов идентификации ОЯ по радиолокационным данным на основе рассчитанных показателей: вероятности оправдываемости и достоверности гроз и осадков, вероятности пропуска и «ложных тревог» гроз и осадков.
- Изучено влияние семи факторов на оправдываемость и достоверность ОЯ – осадков и гроз: удаленности и азимута осадков и гроз, высоты места, сезона, количества осадков в районе станции, эффекта экранирования и влажного колпака ДМРЛ.

Таким образом, учет указанных причин, влияющих на результаты радиолокационных измерений, поможет обеспечить повышение их точности.

В результате исследования влияния слияния облаков на динамику их параметров над территорией Ленинградской области были полученные следующие результаты:

- В объединенном облаке, по сравнению с отдельно взятым, увеличиваются водность, высота, площадь осадков, радиолокационная отражаемость. Увеличение интенсивности осадков, если и наблюдалось в отдельных случаях, площадь осадков при этом возрастала в среднем вдвое.

- Обнаружено влияние подстилающей поверхности на процесс слияния КЯ. Так, объединение облаков, происходящее над сушей, приводило к небольшому усилению интенсивности осадков; слияние над водной поверхностью Ладожского озера и Финского залива не меняло интенсивность, а в некоторых случаях гасило ее. При этом интегрированная водность и высота максимального радиоэха над водой были несколько выше аналогичных параметров над сушей. Этот факт объясняется формированием в облаке более интенсивного восходящего потока, уменьшающего обратный процесс при слиянии над водой.

- Установлено, что процесс слияния характерен для КС, находящихся на 1 или 2 стадии развития.

- Интенсивность осадков повышается, если слияние КС произошло на 2-й стадии развития, и гасится, если на 1-й.

В целом можно констатировать, что процесс слияния оказывает влияние на эволюцию объединенного облака.

Также в работе были получены уравнения регрессии для анализа и прогноза продолжительности и интенсивности ливневых осадков на основе данных радиолокационного зондирования.

Таким образом, в ходе выпускной квалификационной работы были выполнены все поставленные задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хромов С.П. Метеорология и климатология [текст]. / Петросянц М.А. – М.: изд. МГУ, 2001. – 528 с.
2. Торопов П.А. Гидрометеорологический мониторинг в экосистемах ООПТ Алтае-Саянского экорегиона. Методическое пособие [текст]. / Терентьев Б.А. – М.: изд. WWF России, 2011. – 133 с.
3. Быстров Р.П. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов [текст]. / Загорин Г.К., Соколов А.В., Федорова Л.В. – М.: Радиотехника, 2008. – 320 с.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы [текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
5. Морина О.М. Метеорология и климатология [текст]. / Дербенцева А.М., Морин В.А. – Хабаровск, изд. ТОГУ, 2013. – 67 с.
6. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО №8 [текст]. – изд. ВМО, 2014. – 778 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях [текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
8. Руководящий документ. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть II. Обработка материалов метеорологических наблюдений [текст]. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 90 с.

9. Кокорев В.А. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России [текст]. / Шерстюков А.Б. – Якутск, изд. СВФУ, 2015. – 19 с.
10. Методика метеорологических наблюдений. Выпуск 375. [текст]. Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 144 с.
11. Киселев В.Н. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы) [текст]. / Кузнецов А.Д. – СПб., изд. РГГМУ, 2004. – 426 с.
12. Широков Ю.Ф. Основы теории радиолокационных систем. Электронное учебное пособие [текст]. – Самара, изд. Гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева, 2012. – 129 с.
13. Вельтищев Н.Ф. Дистанционные методы измерений в гидрометеорологии. Учебное пособие [текст]. / Семенченко Б.А. – М.: изд. МГУ, 2005. – 129 с.
14. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета [текст]. СПб., изд. ГГО, 2013. – 137 с.
15. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков [текст]. / Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 234 с.
16. Брылев Г.Б. Использование радиолокационных данных в синоптической практике. Методическое пособие [текст]. / Низдойминога Г.Л. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 78 с.
17. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 [текст]. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 350 с.

18. Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и представлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С. Технический проект [текст]. – Долгопрудный, изд. Росгидромет, 2013. – 64 с.

19. Bech J., Chau L. Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar, and other advanced applications [текст]. – Rijeka, 2012. – 481 с.

20. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике [текст]. – М.: изд. Росгидромет, 2014. – 110 с.

21. Byers H.R., Braham R.R. The thunderstorms project [текст]. – Washington, 1949. – 287 с.

22. Лебедева Н.В. Прогноз ливней и гроз. Сборник методических указаний по авиационной метеорологии [текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 28 с.

23. Калинин Н.А. Возможности метеорологических радиолокаторов в обнаружении облачности и опасных явлений погоды [текст]. / Смирнова А.А. – Пермь, изд. ПГУ, 2006. – 9 с.

24. Павлюков Ю.Б. Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета. Труды МФТИ. Том 8, №1 [текст]. / Серебрянник Н.И., Карпов Б.Н. – М.: изд. МФТИ, 2016. – 7 с.

25. Колбин В.А. Анализ точности обнаружения метеорологических объектов доплеровским локатором [текст]. / Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Солонин А.С. – СПб, 2018. – 10 с.

26. Колбин В.А. Валидация данных об опасных явлениях погоды, полученных доплеровским радиолокатором [текст]. / Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Солонин А.С. – СПб, 2018. – 6 с.

27. Попов В.Б. Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России [текст]. / Синькевич А.А. – СПб, изд. ГГО, 2017. – 17 с.
28. Абшаев А.М. Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках [текст]. / Абшаев М.Т., Аджиев А.Х., Садыхов Я.А., Чочаев А.Б., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П. – СПб, изд. ГГО, 2017. – 24 с.
29. Колбин В.А. Радиолокационное исследование процесса слияния конвективных облачных систем [текст]. / Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Солонин А.С. – СПб, 2018. – 5 с.
30. Колбин В.А. Исследование процесса слияний конвективных ячеек над территорией Ленинградской области [текст]. / Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Солонин А.С. – СПб, 2017. – 5 с.
31. Хргиан А.Х. Физика облаков [текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 458 с.
32. Radar and lightning detection (RMI) [электронный ресурс]. – Belgium. – Режим доступа: <http://radar.meteo.be/>
33. World Meteorological Organization Extranet [электронный ресурс]. – Switzerland. – Режим доступа: <https://www.wmo.int>
34. Дегтярев А.С. Статистические методы обработки метеорологической информации. Учебник [текст]. / Драбенко В.А., Драбенко В.А. – СПб, изд. ООО «Андреевский издательный дом», 2015. – 225 с.
35. Капустин А.В. Оценка продолжительности и интенсивности ливней по радиолокационным характеристикам облачности [текст]. / Колбин В.А., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. – СПб, изд. ГГО, 2018. – 10 с.
36. Погода и климат [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pogodaiklimat.ru/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты, полученные в процессе валидации

Таблица А.1 – Оправдываемость и достоверность обнаружения ОЯ за 2012-2013 гг.

	Наземная станция		ДМРЛ Пулково				Оправдываемость P_0 , %		Достоверность P_d , %	
	Ливни	Грозы	Совп.ливней	Совп.гроз	Всего ливней	Всего гроз	Ливней	Гроз	Ливней	Гроз
Кронштадт	201	38	160	26	269	31	80	68	59	84
Шлиссельбург	178	38	132	30	225	37	74	79	59	81
Белогорка	188	19	146	13	237	19	78	68	62	68
Волосово	159	39	132	33	225	41	83	85	59	80
Любань	240	52	150	44	222	47	63	85	68	94
Сосново	214	31	160	21	217	24	75	68	74	88
Кингисепп	296	51	185	33	289	45	63	65	64	73
Кириши	118	47	100	41	175	56	85	87	57	73
Новая Ладога	241	55	151	40	198	49	63	73	76	82
Выборг	254	21	169	18	260	30	67	86	65	60

Таблица А.2 – Оправдываемость и достоверность обнаружения ОЯ за май 2012-2013 гг.

	Наземная станция		ДМРЛ Пулково				Оправдываемость $P_0, \%$		Достоверность $P_d, \%$	
	Ливни	Грозы	Совп.ливней	Совп.гроз	Всего ливней	Всего гроз	Ливней	Гроз	Ливней	Гроз
Кронштадт	56	12	43	9	63	10	77	75	68	90
Шлиссельбург	36	9	27	7	47	9	75	78	57	78
Белогорка	40	7	31	5	54	5	78	71	57	100
Волосово	50	12	42	10	63	10	84	83	67	100
Любань	61	20	38	18	55	19	62	90	69	95
Сосново	47	8	34	6	50	8	72	75	68	75
Кингисепп	65	15	38	7	69	7	58	47	55	100
Кириши	31	17	29	15	51	18	94	88	57	83
Новая Ладога	62	13	41	7	50	10	66	54	82	70
Выборг	57	2	37	2	50	2	65	100	74	100

Таблица А.3 – Оправдываемость и достоверность обнаружения ОЯ за июнь 2012-2013 гг.

	Наземная станция		ДМРЛ Пулково				Оправдываемость $P_0, \%$		Достоверность $P_d, \%$	
	Ливни	Грозы	Совп.ливней	Совп.гроз	Всего ливней	Всего гроз	Ливней	Гроз	Ливней	Гроз
Кронштадт	32	13	26	7	35	8	81	54	74	88
Шлиссельбург	36	13	26	10	44	11	72	77	59	61
Белогорка	44	8	30	5	47	5	68	63	64	100
Волосово	32	14	26	11	50	13	81	79	52	85
Любань	47	15	29	11	47	11	62	73	62	100
Сосново	41	13	28	7	37	8	68	54	76	88
Кингисепп	58	14	33	10	52	15	57	71	63	67
Кириши	25	14	22	12	43	17	88	86	51	71
Новая Ладога	52	16	38	14	44	17	73	88	86	82
Выборг	44	10	25	8	41	9	57	80	61	89

Таблица А.4 – Оправдываемость и достоверность обнаружения ОЯ за июль 2012-2013 гг.

	Наземная станция		ДМРЛ Пулково				Оправдываемость P_0 , %		Достоверность P_d , %	
	Ливни	Грозы	Совп.ливней	Совп.гроз	Всего ливней	Всего гроз	Ливней	Гроз	Ливней	Гроз
Кронштадт	51	4	45	3	81	5	88	75	56	60
Шлиссельбург	49	10	34	7	59	8	69	70	58	88
Белогорка	34	2	28	1	49	5	82	50	57	20
Волосово	29	5	25	5	43	8	86	100	58	63
Любань	57	8	32	7	48	8	56	88	67	88
Сосново	58	3	46	2	63	2	79	67	73	100
Кингисепп	73	9	52	6	71	10	71	67	73	60
Кириши	34	6	29	6	38	9	85	100	76	67
Новая Ладога	54	11	37	10	48	10	69	91	77	100
Выборг	62	3	50	2	79	5	81	67	63	40

Таблица А.5 – Оправдываемость и достоверность обнаружения ОЯ за август 2012-2013 гг.

	Наземная станция		ДМРЛ Пулково				Оправдываемость P_0 , %		Достоверность P_d , %	
	Ливни	Грозы	Совп.ливней	Совп.гроз	Всего ливней	Всего гроз	Ливней	Гроз	Ливней	Гроз
Кронштадт	62	9	46	7	90	8	74	78	51	88
Шлиссельбург	57	6	45	6	75	9	79	100	60	67
Белогорка	70	2	57	2	87	4	81	100	66	50
Волосово	48	8	39	7	69	10	81	88	57	70
Любань	75	9	51	8	72	9	68	89	71	89
Сосново	68	7	52	6	67	6	76	86	78	100
Кингисепп	100	13	62	10	97	13	62	77	64	77
Кириши	28	10	20	8	43	12	71	80	47	67
Новая Ладога	73	15	35	9	56	12	48	60	63	75
Выборг	91	6	57	6	90	14	63	100	63	43

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Архив данных, составленный в результате исследования процесса слияния конвективных облачных систем

Таблица Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VIL	
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S		
1	26.05		15:36					16	16	15	10	0			4250			0,056442	
			15:46					19	19	16	9	-1			4250	0,6	32	0,058322	
			15:56					22	22	21	16	7	-1		5250	0,9	128	0,078538	
			16:06					19	19	16	10				3750	0,6	96	0,059685	
			16:17					21	21	20	12				3750	0,7	288	0,065269	
			16:26	<i>Ладога</i>		<i>слева</i>	<i>Ю</i>	<i>Внутримас.</i>	22	22	18	10				3750	0,9	432	0,063347
			16:36						25	25	18	15	4			4250	1,3	464	0,07614
			16:46						23	24	24	13				3750	1	496	0,070291
			16:56						27	27	25	16				3750	1,8	448	0,07537
			17:06						25	25	25	15	4			4500	1,3	416	0,079912
	26.05		17:17					24	27	27	18	3			4250	1,2	400	0,082416	
2	27.05		8:26					30	31	28	9	-10			4000	3,2	48	0,066269	
			8:36					27	29	25	16				3750	1,8	96	0,076327	
			8:46					26	29	29	22	5			4500	1,5	48	0,089341	
			8:56					29	30	29	19				3500	2,4	48	0,081186	
			9:06					34	34	33	24	8			4500	4,9	144	0,09909	
			9:17	<i>Суша</i>		<i>слева</i>	<i>ЮЗ</i>	<i>Фронтальн.</i>	33	34	32	22	2			4000	4,2	128	0,087805

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			9:27					34	32	25	16				3500	4,9	256	0,07931
			9:36					35	35	35	30	14			4250	5,7	336	0,108197
			9:46					36	38	33	22	0			4250	6,5	288	0,089929
			9:56					36	36	30	21	3			4000	6,5	240	0,092489
		27.05	10:06					33	36	32	24	7			4250	4,2	272	0,098429
3	2.07		14:06					22	22	22	19	10			4500	0,9	112	0,084054
			14:17					22	22	22	18	9			4250	0,9	96	0,082644
			14:26					37	38	39	33	16			4500	7,6	112	0,11434
			14:36					41	41	38	30	20			4250	13,4	144	0,117103
			14:46					38	38	36	27	12	-6		5000	8,7	256	0,104507
			14:56	Суша	слева	СВ	Внутримас.	41	41	37	34	23			4750	13,4	288	0,120293
			15:06					41	41	41	36	25			4750	13,4	416	0,123957
			15:17					43	43	43	40	24	5		5750	17,9	224	0,134526
			15:26					41	41	36	24	11			4750	13,4	272	0,097326
			15:36					44	45	45	30	18	-2		5000	20,7	240	0,120106
		2.07	15:46					45	46	43	33	16			4750	23,9	240	0,120755
4	5.08		12:56					37	37	37	38	37	34	30	10500	7,6	160	0,240274
			13:06					38	38	38	38	36	32	23	10500	8,7	224	0,216596
			13:17					34	34	34	34	34	32	29	10500	4,9	320	0,225275
			13:26					33	33	33	33	31	24	15	9000	4,2	112	0,17966
			13:36					35	35	35	35	32	27	20	7750	5,7	160	0,172117
			13:46	Суша	слева	З	Внутримас.	22	22	22	22	18	15	11	7750	0,9	96	0,131436
			13:56					25	25	25	25	24	22		5000	1,3	64	0,120516
			14:06					26	26	26	26	26	26	16	6750	1,5	128	0,141565

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			14:17					27	27	27	27	26	26	20	6750	1,8	64	0,145836
			14:26					28	28	28	28	26	21		5250	2,1	144	0,125982
		5:08	14:36					25	25	25	25	24	20		5250	1,3	64	0,119281
5	19.08		8:17					26	26	26	20	12			4500	1,5	96	0,091263
			8:26					27	27	27	22	11			4500	1,8	80	0,09282
			8:36					30	30	30	28	22	12		5750	3,2	80	0,120196
			8:46					25	25	25	25	21			4750	1,3	112	0,098763
			8:56					31	31	31	31	28	21		5000	3,2	160	0,131809
			9:06	<i>Ладога</i>	<i>слева</i>	<i>В</i>	<i>Внутримас.</i>	<i>31</i>	<i>31</i>	<i>31</i>	<i>28</i>	<i>21</i>	<i>9</i>		<i>5250</i>	<i>3,2</i>	<i>288</i>	<i>0,118437</i>
			9:17					31	31	31	33	33	26		5500	3,2	288	0,137938
			9:26					38	38	38	36	32	24		5750	8,7	336	0,145206
			9:36					39	39	39	39	37	31	22	7250	10,1	448	0,18559
			9:46					38	38	38	38	30	27	16	6500	8,7	464	0,162772
		19.08	9:56					37	37	37	37	35	28	18	7750	7,6	496	0,172943
6	26.08		8:17					10	10	10	9				3750			0,046223
			8:26					30	30	30	29	24	16		5000	3,2	48	0,124561
			8:36					32	32	32	29	22	11		5250	3,7	80	0,122178
			8:46					40	40	40	37	31	22		5250	11,6	96	0,146058
			8:56					36	36	36	33	25	12		5000	6,5	112	0,130705
			9:06	<i>Суша</i>	<i>слева</i>	<i>В</i>	<i>Внутримас.</i>	<i>34</i>	<i>34</i>	<i>34</i>	<i>34</i>	<i>26</i>	<i>16</i>	<i>2</i>	<i>6000</i>	<i>4,9</i>	<i>288</i>	<i>0,136543</i>
			9:17					38	38	38	38	32	22	7	6000	8,7	336	0,154241
			9:26					39	39	39	36	23	9		5500	10,1	416	0,131799
			9:36					28	28	28	25	13	4		5500	2,1	352	0,10387
			9:46					27	27	27	27	16			4500	1,8	304	0,099005

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							H _{zmax}	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
		26.08	9:56					34	34	34	29	18	1		5250	4,9	256	0,111972
7	11.05		17:17					21	21	21	19	13	2		5500	0,7	80	0,089335
			17:26					25	25	25	24	22	19	8	6000	1,3	160	0,127472
			17:36					28	28	28	24	20	13		5500	2,1	304	0,115543
			17:46					27	32	33	30	28	21	8	6500	1,8	336	0,142055
			17:56					32	32	33	33	28	24	12	6250	3,7	368	0,149346
			18:06	Залив	справа	СВ	Фронтальн.	33	36	35	32	25	18	6	6750	4,2	464	0,141919
			18:17					38	38	35	31	25	20	8	6750	8,7	528	0,14635
			18:26					35	36	33	30	22	14	5	6750	5,7	544	0,135509
			18:36					38	39	37	28	28	20	7	6250	8,7	608	0,14685
			18:46					38	38	34	28	25	15		6000	8,7	640	0,124406
		11.05	18:56					39	41	41	33	24	8		5750	10,1	624	0,131813
8	12.05		5:17					25	25	25	20	8			4500	1,3	144	0,086811
			5:26					26	26	24	22	13	6		5000	1,5	288	0,100974
			5:36					24	24	24	23	16	8		5000	1,2	96	0,103797
			5:46					18	18	19	19	12	4		5000	0,5	80	0,087542
			5:56					24	24	25	26	19	10		5000	1,2	176	0,109304
			6:06	Суша	слева	СВ	Фронтальн.	23	23	25	25	19	12		5000	1	288	0,109602
			6:17					32	32	32	31	26	16		5250	3,7	416	0,128764
			6:26					27	28	29	26	22	9		5500	1,8	368	0,114789
			6:36					26	26	26	24	19	9		5250	1,5	320	0,109445
			6:46					28	28	28	27	12	15		5250	2,1	352	0,113928
		12.05	6:56					30	30	30	30	28	21		5500	3,2	432	0,130214
9	3.06		7:06					36	34	33	27	20	5		5500	6,5	256	0,117113

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			7:17					30	27	27	26	14			5000	3,2	272	0,094978
			7:26					32	35	31	25	9			4500	3,7	368	0,099539
			7:36					32	33	29	26	16			4500	3,7	432	0,103364
			7:46					35	36	37	31	16			5000	5,7	464	0,111307
			7:56	Суша	справа	С	Фронтальн.	35	35	32	34	28	21		6000	5,7	528	0,133089
			8:06					32	34	35	34	28	15		5500	3,7	544	0,132624
			8:17					39	38	36	28	16	2		5250	10,1	592	0,115346
			8:26					39	39	37	33	23	7		5500	10,1	608	0,12794
			8:36					34	35	35	34	26	13		5500	4,9	576	0,131105
		3.06	8:46					35	35	32	26	19	7		5500	5,7	608	0,1177
10	3.06		11:06					23	23	21	16	3			4250	1	32	0,075774
			11:17					19	19	18	11				3750	0,6	32	0,061697
			11:26					18	18	16	10				3750	0,5	32	0,058832
			11:36					12	13	18	19	12			4750	0	0	0,075312
			11:46					27	27	25	21	14			4750	1,8	32	0,093509
			11:56	Залив	справа	СВ	Внутримас.	19	19	20	21	16			4750	0,6	96	0,086123
			12:06					23	23	23	23	16			4750	1	96	0,091986
			12:17					19	19	19	16	8			4500	0,6	64	0,076491
			12:26					20	21	21	20	14			4250	0,6	32	0,086068
			12:36					22	23	25	20	11			4250	0,9	32	0,087494
		3.06	12:46					12	14	16	15	12			4250	0	0	0,072334
11	3.06		14:36					18	18	18	13				3750	0,5	32	0,06238
			14:46					30	29	28	25	5			4250	3,2	48	0,091475
			14:56					30	31	29	20				4250	3,2	48	0,08096

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			15:06					31	30	29	22				4000	3,2	64	0,082011
			15:17					30	28	22	10				3500	3,2	96	0,070611
			15:26	Суша	слева	СВ	Внутримас.	24	24	24	15				3500	1,2	64	0,071954
			15:36					18	23	22	13				3750	0,5	16	0,067387
			15:46					31	31	30	24				3750	3,2	48	0,085579
			15:56					38	34	32	21				4000	8,7	112	0,083984
			16:06					38	35	32	21				4000	8,7	80	0,086523
		3.06	16:17					31	26	19	12				4000	3,2	112	0,060183
12	6.06		19:17					32	35	28	15				4250	3,7	64	0,076592
			19:26					27	29	24	13				4000	1,8	48	0,071294
			19:36					26	30	28	16				3750	1,5	80	0,078066
			19:46					24	27	26	20				4250	1,2	80	0,076984
			19:56					30	30	25	20				4250	3,2	48	0,07855
			20:06	Суша	слева	В	Внутримас.	32	31	27	18				4000	3,7	80	0,078222
			20:17					29	29	26	9				3750	2,4	80	0,0722
			20:26					21	26	16	5				3750	0,7	80	0,05948
			20:36					21	22	20	12				3750	0,7	64	0,065803
			20:46					25	23	18	7				3500	1,3	80	0,062078
		6.06	20:56					19	18	12	1				3500	0,6	48	0,046731
13	27.06		18:26					29	29	29	27	21	16	10	7000	2,4	160	0,137504
			18:36					36	36	36	34	29	16	7	7000	6,5	128	0,145568
			18:46					31	31	31	30	27	19	9	6750	3,2	240	0,14084
			18:56					31	31	31	32	28	19	10	6000	3,2	304	0,14306
			19:06					37	37	37	35	30	23	18	7500	7,6	240	0,170169

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							H _z max	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			19:17	Суша	слева	В	Внутримас.	34	34	34	31	25	19	14	7250	4,9	480	0,158179
			19:26					37	37	37	34	27	18	10	8000	7,6	432	0,15081
			19:36					36	36	36	35	30	24	14	8000	6,5	448	0,163606
			19:46					32	32	31	32	25	10	12	7750	3,7	384	0,145254
			19:56					26	26	26	23	19	15	12	7500	1,5	448	0,134251
		27.06	20:06					30	30	29	24	20	7		6250	3,2	480	0,109875
14	15.07		6:26					12	12	12	4				3250			0,044862
			6:36					23	23	19	9				3000	1	96	0,063899
			6:46					20	20	19	8				3250	0,6	96	0,060654
			6:56					22	22	16	16	2			4250	0,9	208	0,070913
			7:06					22	22	21	18	5			4000	0,9	272	0,078457
			7:17	Ладога	справа	С	Внутримас.	27	27	26	25	8			4000	1,8	320	0,091558
			7:26					30	30	30	24	10			4750	3,2	416	0,09666
			7:36					32	32			9			4000	3,7	448	0,033051
			7:46					32	32	32	27	16			5000	3,7	480	0,103962
			7:56					28	28	28	23				4750	2,1	464	0,068081
		15.07	8:06					26	26	26	21					1,5	416	0,065168
15	15.07		6:46					22	22	22	19	9			4250	0,9	48	0,083235
			6:56					29	29	29	26	15			4250	2,4	128	0,100187
			7:06					28	28	28	26	15			4250	2,1	112	0,099013
			7:17					29	29	29	29	19			4500	2,4	80	0,104286
			7:26					30	30	30	30	19			4750	3,2	144	0,105919
			7:36	Суша	справа	СЗ	Фронтальн.	35	35			20	7		5250	5,7	304	0,048495
			7:46					37	37	37	36	31			4250	7,6	352	0,123094

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			7:56					31	31	31	28				4000	3,2	320	0,072748
			8:06					25	25	25	27					1,3	288	0,065429
			8:17					25	25	25	22	11			4250	1,3	240	0,09037
		15.07	8:26					33	33	33	33	21				4,2	256	0,111908
16	15.07		7:56					27	27	26	18				4000	1,8	112	0,06512
			8:06					24	24	25	14					1,2	192	0,061326
			8:17					36	36	34	24	8			4500	6,5	80	0,100828
			8:26					40	40	34	26	17				11,6	128	0,110964
			8:36					32	32	30	22	11			5000	3,7	192	0,093723
			8:46	Суша	справа	С	Фронтальн.		36	36	31				5250		320	0,052247
			8:56					33	33	33	23	10			4250	4,2	384	0,09953
			9:06					31	31	31	25	16			4750	3,2	432	0,102663
			9:17					28	28	28	21	15			4000	2,1	240	0,096407
			9:26					20	20	20	16	2			4000	0,6	160	0,071565
		15.07	9:36					38	38	38	29				3750	8,7	192	0,096438
17	17.07		16:36					42	37	30	25	16	13		5750	15,5	288	0,121764
			16:46					40	43	44	38	36	15		5750	11,6	272	0,147194
			16:56					40	40	35	28	23	13		5750	11,6	304	0,130166
			17:06					50	50	45	37	32	22	6	7000	49,1	368	0,162746
			17:17					45	42	37	31	24	16	9	6500	23,9	384	0,148227
			17:26	Суша	справа	В	Внутримас.	45	46	44	37	30	9		6000	23,9	448	0,13365
			17:36					49	45	41	36	30	20	12	7250	42,5	464	0,168449
			17:46					49	46	35	30	25	22	16	8250	42,5	496	0,175071
			17:56					48	48	43	33	29	28	24	8500	36,8	544	0,205251

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VIL
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			18:06					36	35	36	32	22	15	13	8000	6,5	560	0,151884
		17.07	18:17					49	49	42	34	27	18	5	7000	42,5	608	0,153406
18	2.08		1:26					29	29	23					2750	2,4	32	0,059588
			1:36					30	30	22	8				3500	3,2	64	0,069922
			1:46					33	33	33	21				3250	4,2	96	0,08654
			1:56					32	32	32	21				3250	3,7	208	0,085416
			2:06					38	38	37	31				3500	8,7	224	0,097064
			2:17	Залив	справа	В	Внутримас.	37	37	30	9				3250	7,6	128	0,079574
			2:26					30	30	28	15				3750	3,2	336	0,078323
			2:36					35	35	23	9				3250	5,7	336	0,074696
			2:46					33	33	29	20				3250	4,2	160	0,084066
			2:56					33	33	25	14				4000	4,2	176	0,077288
		2.08	3:06					32	32	30	18				3500	3,7	176	0,082624
19	7.08		20:46					32	32	26	16	1			4250	3,7	288	0,082082
			20:56					37	39	35	25				4000	7,6	192	0,092143
			21:06					40	39	34	24				4000	11,6	208	0,090232
			21:17					36	36	28	20				3500	6,5	208	0,085556
			21:26					38	34	31	23				3500	8,7	112	0,088317
			21:36	Залив	слева	В	Внутримас.	43	40	30	5				3250	17,9	208	0,078614
			21:46					33	40	35	21				3750	4,2	208	0,090442
			21:56					45	40	34	23				3500	23,9	272	0,093613
			22:06					39	40	36	28				3500	10,1	128	0,096077
			22:17					40	40	29	13				3500	11,6	144	0,083954
		7.08	22:26					39	38	29	13				3500	10,1	128	0,082909

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VIL
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
20	8.08		15:56					21	21	21	20	16	6		5500	0,7	64	0,096439
			16:06					25	25	25	24	21	7		5250	1,3	144	0,107651
			16:17					24	24	24	21	15			4000	1,2	144	0,091496
			16:26					29	29	29	29	20	20		5250	2,4	64	0,123962
			16:36					27	27	34	33	29	19		5500	1,8	368	0,130534
			16:46	Суша	слева	СВ	Внутримас.	30	30	30	30	25	19	12	6500	3,2	592	0,141097
			16:56					38	38	38	35	26	8		5000	8,7	656	0,131079
			17:06					32	32	32	31	26	13		5000	3,7	672	0,126688
			17:17					31	31	31	31	30	29	25	8250	3,2	688	0,193011
			17:26					34	34	34	34	29	28	18	8250	4,9	688	0,17831
		8.08	17:36					34	34	34	34	30	26	16	8250	4,9	608	0,172145
21	11.05		12:18					37	39	34	15	-6			4000	7,6	64	0,096961
			12:27					44	49	44	29	15			4500	20,7	96	0,131326
			12:37					38	36	35	23	15			4500	8,7	112	0,117199
			12:47					39	39	36	27	13			4250	10,1	80	0,119994
			12:57					38	38	31	23	9			4250	8,7	64	0,112185
			13:07	Суша	слева	З	Внутримас.	28	30	29	23	8			4250	2,1	160	0,102606
			13:18					30	30	24	15				3500	3,2	160	0,085359
			13:27					30	30	24	15				3500	3,2	160	0,085359
			13:37					43	43	39	26	10			4250	17,9	112	0,121888
			-					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		11.05	-					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	17.05		1:37					26	25	28	27	23	16	9	6750	1,5	64	0,138983
			1:47					35	35	36	32	25	22	15	7250	5,7	208	0,172449

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			1:57					35	35	35	33	31	27	15	6750	5,7	240	0,167336
			2:07					36	36	36	33	30	26	20	7500	6,5	352	0,184106
			2:18					38	38	38	36	33	30	25	8750	8,7	368	0,20654
			2:27	<i>Залив</i>	<i>справа</i>	<i>СЗ</i>	<i>Внутримас.</i>	38	39	40	36	32	28	23	9000	8,7	480	0,220827
			2:37					40	40	40	38	34	33	30	10250	11,6	560	0,24202
			2:47					39	39	39	38	36	33	31	10500	10,1	672	0,248236
			2:57					42	42	42	41	38	35	33	10750	15,5	688	0,260402
			3:07					43	43	43	40	38	36	33	10500	17,9	784	0,262679
		17.05	3:18					51	51	51	46	42	41	37	11000	56,7	848	0,279298
23	15.06		13:07					16	16	16	20	21	18	13	6250			0,121808
			13:18					23	23	23	23	24	19	13	6250	1	144	0,137104
			13:27					27	27	27	26	26	20	15	6000	1,8	128	0,147353
			13:37					37	37	38	39	38	34	28	7750	7,6	144	0,204469
			13:47					38	38	38	37	35	30	23	7750	8,7	272	0,197245
			13:57	<i>Суша</i>	<i>слева</i>	<i>СВ</i>	<i>Внутримас.</i>	34	34	35	36	33	31	27	7500	4,9	288	0,195473
			14:07					26	26	27	30	30	28	24	9000	1,5	400	0,19562
			14:18					31	31	31	31	31	22	15	6250	3,2	288	0,158675
			14:27					29	29	29	29	29	21	15	6250	2,4	272	0,15357
			14:37					25	25	26	26	20	19	8	6750	1,3	192	0,136413
		15.06	14:47					21	21	21	20	18	12	7	6000	0,7	224	0,120466
24	19.06		17:37					15	15	15	14	13	12		5000			0,093168
			17:47					20	20	20	20	20	19		5250	0,6	48	0,113778
			17:57					23	23	23	22	20	16		5250	1	96	0,117867
			18:07					27	27	27	26	22	16	13	6750	1,8	176	0,141787

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			18:18					38	38	38	36	36	30	25	7000	8,7	224	0,198257
			18:27	Суша	справа	ЮВ	Внутримас.	32	32	32	32	31	16	16	7000	3,7	288	0,173268
			18:37					35	35	35	30	32	27	18	6750	5,7	288	0,168215
			18:47					26	26	26	26	24	18	9	6500	1,5	176	0,139709
			18:57					23	23	23	22	21	14	5	6500	1	256	0,125802
			19:07					19	19	19	18	16	12	3	6250	0,6	176	0,110904
		19.06	19:18					25	25	25	24	21	16	11	7000	1,3	144	0,144623
25	22.06		12:18					23	23	22	14	11			4250	1	32	0,090481
			12:27					20	20	20	16	10			4250	0,6	32	0,086761
			12:37					27	28	30	31	21			4500	1,8	160	0,113808
			12:47					31	31	31	30	23	12	1	6000	3,2	144	0,135765
			12:57					26	26	24	23	18			4250	1,5	192	0,104001
			13:07	Суша	справа	В	Фронтальн.	21	21	21	19	12			4250	0,7	176	0,091516
			13:18					19	19	18	14	8			4000	0,6	32	0,081779
			13:27					21	24	25	19	16	6		5000	0,7	96	0,107242
			13:37					25	26	26	23	13	6		5000	1,3	128	0,111032
			13:47					24	25	26	24	18	11		5000	1,2	304	0,117559
		22.06	13:57					26	26	26	25	20			4750	1,5	128	0,107111
26	23.06		18:07					31	30	25	6				3750	3,2	112	0,079723
			18:18					33	33	31	22				3750	4,2	64	0,095334
			18:27					39	38	31	20				4000	10,1	160	0,098938
			18:37					42	41	37	20	11			4250	15,5	160	0,117511
			18:47					37	37	36	24	12			4000	7,6	144	0,116202
			18:57	Залив	слева	С	Внутримас.	28	28	27	9				3500	2,1	80	0,080882

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			19:07					36	35	27	11				3250	6,5	80	0,089056
			19:18					24	23	16	2				3000	1,2	112	0,063672
			19:27					31	28	23					2750	3,2	32	0,068211
			19:37					22	22	20					2750	0,9	32	0,059297
		23.06	19:47					24	26	23	7				3500	1,2	16	0,074381
27	25.06		1:47					32	37	34	33	26	13		6000	3,7	96	0,140213
			1:57					31	34	42	45	40	24	12	6000	3,2	64	0,173377
			2:07					33	39	38	37	28	15		5750	4,2	96	0,147116
			2:18					30	35	35	32	27	16	3	6250	3,2	288	0,147256
			2:27					34	36	34	34	27	21	13	6000	4,9	306	0,161183
			2:37	Суша	справа	СЗ	Внутримас.	39	39	36	30	24	11		5750	10,1	480	0,141189
			2:47					34	35	35	34	27	16	5	6000	4,9	640	0,152101
			2:57					39	43	42	36	27	16		5000	10,1	672	0,152588
			3:07					38	39	37	36	29	22	11	6500	8,7	720	0,166373
			3:18					31	34	32	30	22	14		6000	3,2	624	0,134893
		25.06	3:27					39	39	40	38	30	20	5	6000	10,1	672	0,163337
28	2.08		8:07					27	30	29	13	14			5250	1,8	80	0,100643
			8:18					28	29	27	21	14			4000	2,1	96	0,104411
			8:27					25	26	25	23	13			4750	1,3	208	0,100965
			8:37					26	29	28	24	12			5000	1,5	240	0,104171
			8:47					24	26	26	16	10			4750	1,2	272	0,095017
			8:57	Ладога	справа	З	Внутримас.	24	27	26	21	6			4500	1,2	304	0,095073
			9:07					28	32	32	28	9			4500	2,1	352	0,108113
			9:18					27	30	29	25	5			4250	1,8	288	0,10048

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hзmax	Осадки		VII
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
			9:27					33	35	30	19	3			4250	4,2	320	0,100575
			9:37					32	31	27	16				3750	3,7	256	0,088796
		2.08	9:47					25	27	24	16				3500	1,3	224	0,082186
29	9.08		12:07					23	23	32	32	31	24		5750	1	48	0,136754
			12:17					10	13	19	18	15			4250			0,080332
			12:27					25	35	37	37	33	32	21	6750	1,3	64	0,171931
			12:37					36	41	40	39	28	18	3	6500	6,5	160	0,159083
			12:47					30	38	40	39	30	23	11	6750	3,2	144	0,165947
			12:57	Суша	слева	ЗВ	Внутримас.	33	35	21	14		1		6750	4,2	304	0,090178
			13:07						44	46	44	43	38	27	8250			0,19031
			13:18					31	37	38	41	38	33	28	12000	3,2	384	0,242416
			13:27					27	36	40	41	41	34	24	11500	1,8	416	0,225295
			13:37								45	45	44	35	10750			0,163259
		9.08	13:47								37	32	29	24	12500			0,157598
30	10.08		8:17					32	32	29	15				4000	3,7	112	0,089579
			8:27					37	37	34	24				3500	7,6	96	0,101114
			8:37					31	29	27	16	1			4000	3,2	208	0,090873
			8:47					34	33	27	14	3			4000	4,9	160	0,095777
			8:57					27	27	24	14				3750	1,8	256	0,081927
			9:07	Ладога	слева	В	Внутримас.	31	33	31	22				3000	3,2	256	0,094444
			9:17					38	39	26	26	7			4250	8,7	256	0,110138
			9:27					27	28	28	18				3250	1,8	80	0,08675
			9:37					29	29	29	22				3250	2,4	80	0,090808
			9:47					25	25	25	14				3500	1,3	48	0,08048

Продолжение таблицы Б.1

№	Дата		Время	Место	Слияние	Направление	Тип обл.	Zmax							Hzmax	Осадки		VIL
	Нач.	Конец						1	2	3	4	5	6	7		I	S	
		10.08	9:57					23	25	26	18				3500	1	64	0,082363
31	29.08		7:37					37	41	40	37	33	27	13	7500	7,6	192	0,179192
			7:47					36	38	34	31	28	22	12	7000	6,5	192	0,168331
			7:57					30	32	32	30	22	15	9	6500	3,2	192	0,146258
			8:07					34	35	33	29	21	15		6500	4,9	192	0,136729
			8:17					27	33	32	28	21	14	3	6500	1,8	192	0,137586
			8:27	<i>Ладога</i>	<i>Слева</i>	<i>ЮВ</i>	<i>Внутримас.</i>	25	30	28	24	19	13	6	6000	1,3	304	0,132889
			8:37					26	33	31	23	18	9		6000	1,5	224	0,122636
			8:47					28	31	29	21	12	2		5250	2,1	224	0,11007
			8:57					31	33	34	31	25	16	7	6250	3,2	192	0,149005
			9:07					29	31	33	28	22	16	3	6500	2,4	112	0,139841
		29.08	9:18					20	21	23	20	15	13	4	6750	0,6	80	0,117001

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Архив данных, составленный в процессе исследования оценки продолжительности и интенсивности ливневых осадков

Таблица В.1

№ п/п	Место	$\Delta\tau$ [мин]	V [км/мин]	Z [dBz]					H ₁ [км]	I ₁ [мм/ч]	S ₁ [км ²]	VI _{L1} [кг/м ²]
				0-1	1-2	2-3	3-4	4-5				
1	Залив	40	0,75	18	18	18	9		3500	0,5	32	0,0592
2	Суша	30	0,93	22	22	19	3		3500	0,9	32	0,0573
3	Суша	60	0,18	26	26	26	21	9	4500	1,5	144	0,0895
4	Ладога	50	0,50	21	22	19	12		3250	0,7	16	0,0652
5	Суша	79	0,33	23	23	23	23	19	5250	1	64	0,1068
6	Суша	70	0,04	30	29	26	14		3750	3,2	32	0,0762
7	Суша	30	0,90	19	19	16	8		3500	0,6	16	0,0580
8	Суша	29	0,03	20	20	20	16	15	4250	0,6	16	0,0834
9	Суша	79	0,44	36	36	38	21	11	4000	6,5	112	0,1034

Продолжение таблицы В,1

№ п/п	Место	Δτ [мин]	V [км/мин]	Z [dBz]					H ₁ [км]	I ₁ [мм/ч]	S ₁ [км ²]	VII ₁ [кг/м ²]
				0-1	1-2	2-3	3-4	4-5				
10	Суша	71	0,58	30	30	30	30	27	6500	3,2	144	0,1416
11	Суша	80	1,03	33	33		33	31	4750	4,2	80	0,1009
12	Суша	60	0,88	21	21	21	16		3250	0,7	32	0,0687
13	Суша	90	0,17	27	29	31	23	8	4000	1,8	64	0,0938
14	Суша	70	0,74	23	23	23	21	12	4750	1	64	0,0880
15	Залив	40	0,10	24	24	23	18	7	4250	1,2	48	0,0830
16	Ладога	50	0,44	31	31	30	22		3750	3,2	48	0,0844
17	Суша	69	0,33	21	26	26	21	18	4750	0,7	48	0,0948
18	Суша	81	0,37	34	41	43	35	20	4000	4,9	64	0,1200
19	Суша	70	0,09	35	35	35	33	25	4250	5,7	80	0,1164
20	Суша	60	0,20	26	26	26	21	9	4500	1,5	144	0,0895
21	Суша	120	0,41	33	35	32	27	21	4750	4,2	32	0,1095
22	Залив	80	0,03	27	27	27	25	20	5750	1,8	80	0,1141
23	Суша	50	0,14	21	21	23	21		3750	0,7	48	0,0730
24	Суша	80	0,24	26	26	22	13		4250	1,5	64	0,0710

Продолжение таблицы В,1

№ п/п	Место	Δτ [мин]	V [км/мин]	Z [dBz]					H ₁ [км]	I ₁ [мм/ч]	S ₁ [км ²]	VII ₁ [кг/м ²]
				0-1	1-2	2-3	3-4	4-5				
25	Ладога	70	0,11	23	23	23	16		3250	1	48	0,0713
26	Залив	50	0,32	18	20	21	21	15	4000	0,5	16	0,0862
27	Суша	50	0,02	23	23	23	22	16	4500	1	32	0,0915
28	Суша	60	0,02	22	22	22	22	20	5500	0,9	80	0,1085
29	Суша	90	0,19	27	32	29	19	12	4000	1,8	32	0,0952
30	Суша	70	0,24	20	26	29	29	22	5500	0,6	16	0,1250
31	Залив	60	0,33	27	27	27	26	21	5250	1,8	64	0,1166
32	Суша	70	1,03	21	23	20	7		3250	0,7	48	0,0622
33	Суша	50	0,46	20	24	28	27	21	4750	0,6	32	0,0994
34	Залив	80	0,18	18	22	20	11		3750	0,5	16	0,0642
35	Суша	40	0,21	21	21	18	8		3500	0,7	32	0,0609
36	Залив	60	0,39	29	29	29	27	18	4250	2,4	80	0,0906
37	Суша	30	0,16	20	22	20	16	3	4500	0,6	48	0,0730
38	Ладога	80	0,26	29	29	25	19	11	4500	2,1	48	0,0825
39	Суша	30	0,54	17	16	8			3000	0,3	32	0,0389

Продолжение таблицы В,1

№ п/п	Место	Δτ [мин]	V [км/мин]	Z [dBz]					H ₁ [км]	I ₁ [мм/ч]	S ₁ [км ²]	VIL ₁ [кг/м ²]
				0-1	1-2	2-3	3-4	4-5				
40	Суша	90	0,09	26	27	27	22	14	4500	1,9	48	0,0843
41	Суша	70	0,18	19	19	19	19	16	6750	0,6	80	0,0845
42	Суша	40	0,18	22	22	21	16		3500	0,9	32	0,0695
43	Залив	60	0,27	27	27	27	26	21	5250	1,8	64	0,1017
44	Суша	29	0,10	20	20	20	16		3500	0,6	16	0,0673
45	Ладога	70	0,48	29	29	27	27	18	5250	1,9	96	0,0693
46	Суша	40	0,22	18	18	18	16	14	4250	0,5	16	0,0694