



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

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Нахождение коэффициентов перехода от радиолокационной
отражаемости к количеству выпавших осадков для доплеровского
радиолокатора Meteor 50 в холодный период года »

Исполнитель **Бондаренко София Ильинична**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Саенко Андрей Геннадьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
И.о. заведующего кафедрой

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« » мая 2023 г.

Санкт–Петербург

2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Доплеровский радиолокатор	4
1.1 ДМРЛ-С обеспечивает	6
1.2 Состав ДМРЛ-С	7
1.2.1 Антенная система	8
1.2.2. Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК)	13
1.3 Устройство и работа ДМРЛ-С	16
Глава 2. Доплеровский радиолокатор Meteor 50	19
2.1. Технические характеристики Meteor 50	21
Глава 3. Измерение осадков. Осадки в зимний период	23
3.1 Классификация твердых осадков	23
3.1.1 Град	23
3.1.2. Ледяная крупа	24
3.1.3. Ледяной дождь	24
3.1.4. Снег	25
3.1.5. Снежная крупа	25
3.1.6. Снежные зерна	25
3.1.7. Ледяные иглы	25
3.2. Классификация явлений	26
Глава 4. Нахождение коэффициентов перехода	31
4.1. Осадкомер Pluvio² 200	31
4.2. Уравнение Маршалла-Пальмера	33
4.3. Сбор данных	38
4.4. Обработка первичных данных	40
4.5. Зависимость количества осадков и интенсивности	42
4.6. Нахождение коэффициентов A и b	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
Список литературы	57

ВВЕДЕНИЕ

Доплеровский радиолокатор Meteor 50 – это высокоточный радар, который используется для определения скорости и направления движения атмосферных явлений и измерения характеристик выпавших осадков, таких как: тип, интенсивность, объем и распределение во времени и пространстве. Для получения количественных характеристик осадков необходимо находить коэффициенты перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков.

Одним из методов использования для нахождения коэффициентов перехода является метод сравнения радиолокации и данных наземных метеорологических станций, которые собирают данные о количестве выпавших осадков в течение дня. Этот метод позволяет установить связь между измерениями радиолокационной отражаемости и количеством осадков.

Полученные коэффициенты перехода могут быть использованы для создания математических моделей прогнозирования количества выпавших осадков в зимний период на основе данных, полученных с помощью доплеровского радиолокатора Meteor 50. Эти модели могут быть использованы для прогнозирования снегопадов, улучшения погодных прогнозов и в других целях.

Целью данной работы является нахождение коэффициентов перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков.

Реализация цели обусловила необходимостью нахождения новых, более точных коэффициентов перехода, для корректного вычисления количества осадков.

Глава 1. Доплеровский радиолокатор

Современный доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ) – это уникальный инструмент наблюдения за погодой, который в режиме реального времени предоставляет точную информацию о расположении и характере перемещения зон сильных осадков, гроз, града, шквалов, турбулентных зон и сильных ветров на больших территориях. Новейшие ДМРЛ имеют поле зрения с радиусом 250-300 км, автоматически круглосуточные наблюдения с циклами 3-15 минут и предоставляют данные с высоким пространственным разрешением (0,5-1 км) на площади до 300000 км².



Рисунок 1 – Доплеровский метеорологический радиолокатор [10]

Радиолокационные данные являются хорошим дополнением к метеорологическим данным, полученным с помощью пассивных методов радиометрического зондирования. Эти методы дают значительно более точную информацию об атмосфере, чем пассивные методы.

Основным результатом радиолокационных метеорологических наблюдений является информация о местоположении, внутренней структуре и метеорологических характеристиках полей облаков и осадков (тип погодного явления, интенсивность и фазовый состав осадков, верхняя граница облачности (ВГО) и доплеровская скорость). Наблюдения за перемещениями и изменениями полей облачности и осадков позволяют составлять прогнозы погоды, уточнения прогнозов, штормовые предупреждения, аэродромные предупреждения и предупреждения о сдвиге ветра на различные периоды времени – от одного до трех часов для одного ДМРЛ и одни сутки для одного радиолокационного поля (РЛП), состоящего из нескольких радиолокаторов, перекрывающимися зонами наблюдений.

Современные метеорологические радары решают следующие основные практические задачи:

- определение погодных явлений, связанных с облаками и осадками, и отражать их в прогнозах погоды на очень короткие сроки, штормовыми предупреждениями, аэродромными предупреждениями и предупреждениями о сдвиге ветра;
- изменение характеристик осадков с помощью радара и его использование в гидрологических расчетах и прогнозах;
- предоставление радиолокационной информации для инициализации и проверки цифровых моделей прогноза погоды.

Метеорологический радиолокатор ДМРЛ – современный аппаратно-программный комплекс, состоящий из следующего основного оборудования:

- антенная система;
- высокочастотный приёмо-передающий тракт;
- клистронный передатчик;
- приёмник;
- центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК).

Оборудование ДМРЛ-С размещается на башне высотой 30 м и в контейнере для оборудования. На позиции размещается оборудование систем электроснабжения, охранной и пожарной сигнализации. На отдельных позициях предусмотрен дизель-генератор аварийного электроснабжения.

Мониторинг оборудования ДМРЛ, управление РЛ и вторичная обработка информации осуществляется на удаленном управляющем вычислительном комплексе (УУВК), который расположен на удалении от башни ДМРЛ (обычно десятки километров). Возможно использование двух схем размещения УУВК: в здание контейнерного типа (ЗКТ) на у основания башни и значительно дальше – в рабочем помещении оперативной группы. Специалисты служб оперативного назначения Росгидромета – Авиационная метеорологическая станция гражданская (АМСГ), Аэрологическая станция (АЭ), Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС), Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) – контролируют прием радиолокационной информации на УУВК.

1.1 ДМРЛ-С обеспечивает

- получение информации о полях облачности, осадков и связанных с ними опасных явлениях погоды (гроза, град, ливни, и т.д.), интенсивности и накопленном количестве осадков за любой промежуток времени, параметрах ветра и турбулентном состоянии атмосферы, фазовом состоянии гидрометеоров в облаках (при возможности работы в режиме двойной поляризации), содержания воды в облаках и других геофизических явлениях и процессах;
- определение высоты верхней границы радиоэха;
- отображение распределения радиолокационной отражаемости на различных высотных уровнях по типу псевдо-SARPI;
- расчет и отображение вертикального профиля скорости и направления ветра до высоты верхней границы обнаружения метеообъектов;

- отображение интенсивности осадков, позволяет оценить тип осадков (дождь, снег, град);
- отображение накопленных осадков за определенный период времени;
- определение опасных погодных явлений (град, гроза, шквальные порывы ветра, интенсивный дождь и снег, сильная турбулентность);
- отображение скорости и направления движения облачной системы;
- отображение радиолокационной отражаемости в трехмерном виде;
- вывод радиолокационной информации в необходимых кодах.

1.2 Состав ДМРЛ-С

В состав ДМРЛ-С входят:

- антенная система;
- высокочастотный тракт;
- клистронный передатчик;
- приемная система;
- центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК), в составе которого:
 - система первичной обработки сигналов радиолокатора;
 - вторичная обработка управляющего вычислительного комплекса (УВК);
 - автоматизированная система контроля и управления (АСКУ);
 - удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК);
 - система электропитания;
 - абонентский пункт (АП) (количество АП определяется договором на поставку);
 - комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП)[1].

1.2.1 Антенная система

Антенная система ДМРЛ включает в себя:

- параболическую антенну;
- радиопрозрачное укрытие (РПУ);
- опорно-поворотное устройство;
- СВЧ вращающиеся сочленения;
- датчики угловых перемещений по азимуту и углу места;
- приводы азимутального вращения и угломестного качания

1.2.1.1 Антенна

Параболическая антенна с круглым рупором, обеспечивает игольчатые диаграммы направленности по каналам вертикальной и горизонтальной поляризаций. Устройство поляризации облучателя позволяет работать в режимах:

- излучения линейной горизонтальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях (ВП и ГП);
- одновременного излучения горизонтальной и вертикальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Поляризация излучения, ширина диаграммы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, уровень боковых лепестков и коэффициенты усиления антенны ДМРЛ-С приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Основные тактико-технические характеристики ДМРЛ-С.

Наименование		Значение
1	Рабочий диапазон, МГц	от 5600 до 5650
2	Зона обзора	
	Инструментальная дальность обнаружения (км)	520
	Минимальная дальность (км), не более	1
	Угол места, град	от -2 до +91

Продолжение таблицы 1

3	Антенна	
	Тип	Зеркальная параболическая
	Ширина ДН в двух плоскостях по уровню 3дБ на каждой поляризации, град	1,0
	Коэффициент усиления, дБ, не менее	45
	Боковые лепестки, дБ, не более	минус 29
	Поляризация	линейная; ГП/ ГП+ВП
4	Передатчик	
	Тип	клисторный
	Импульсная мощность, кВт, не менее	15
	Длительность импульса, мкс	1,0; от 25 до 60
	Средняя частота зондирования, Гц	509
	Тип модуляции	МОНО/НЧМ
5	Приемник	
	Коэффициент шума, ед, не более	2,5
	Промежуточная частота, МГц	60
	Стабильность зондирующего импульса, дБ, не менее	10
6	Темп обзора, мин, не более	10
7	Наличие АСКУ	имеется
8	Надежность	
	Наработка на отказ, ч	3000
	Среднее время восстановления, ч, не более	0,5
9	Обработка	
	АЦП, бит	16
	Опорная частота, МГц	80
	Наличие АПОИ и АВОИ	АПОИ+АВОИ
10	Энергопитание	
	Напряжение, В	3 x 220/380 + 10% -15%
	Частота, Гц	50±2%
	Мощность, потребляемая аппаратурой с учетом СОРТ, кВт	не более 10

1.2.1.2 Радиопрозрачное укрытие

Для обеспечения надежности работы антенного устройства и ее привода в различных метеорологических условиях используется радиопрозрачное укрытие (РПУ). РПУ ДМРЛ-С представляет собой сферическую конструкцию без плоскостей, вторгающихся в полезную площадь обтекателя или создающих систематические отражения. Поверхность обтекателя гидрофобна и устойчива к солнечному облучению, пыли, граду, ветру с песком [1].

- РПУ устанавливается на металлическом кольце, забетонированном в фундаменте здания, или на металлической платформе (башне или кунге);

- РПУ оборудован молниеотводами и авианавигационным защитным освещением в соответствии со спецификами ИКАО;

- Внутри купола имеется вход для обслуживающего персонала и установки испытательного оборудования для проверки радиолокатора. Внутри РПУ имеется освещение купола

- Суммарное ослабление, вносимое РПУ на прием и передачу, не превышает:

- в сухом состоянии - 0,5 дБ,
- при выпадении осадков интенсивностью до 10 мм/час - 3 дБ.

1.2.1.3 Электропривод антенны

Для привода антенны используется надежный статический преобразователь на базе транзистора. Данные об угловом положении антенны ДМРЛ поступают от плат формирования кода (ПФК) на базе АЦП по углу наклона места и азимуту. На основе сравнения текущего углового положения антенны и углового положения, заданного в ПК, в ПФК формируется сигнал управления приводом, который подается на исполнительные механизмы привода, усиливаются по мощности транзисторами.

1.2.1.4 Волноводный тракт

Волноводный тракт ДМРЛ-С предназначен для:

- передачи зондирующих импульсов передатчика к входу антенны;
- фильтрации гармонических составляющих сигнала;
- переключения режимов работы изделия;
- передачи принятых сигналов от антенны к приемным устройствам;
- ответвления прямой и отраженной мощностей на выходе передатчика для измерения КСВН тракта;
- ответвления отраженной мощности на выходе передатчика для защиты (отключения) передатчика;
- для защиты малошумящих усилителей приемника (МШУ) от повреждения сигналами собственного передатчика.

Герметизированные секции используются в волноводах для повышения их электрической прочности и предотвращения проникновения влаги.

Волновод оснащен системой охлаждения клистрона. Предусмотрена возможность аварийной остановки передатчика при повышении температуры клистрона и уменьшении расхода воздуха, проходящего через клистрон.

1.2.1.5 Передающий тракт ДМРЛ-С

Передающий тракт предназначен для усиления импульсных СВЧ сигналов рабочей частоты до заданного уровня мощности.

Тракт основан на принципе внутренней когерентности и состоит из одного излучателя на основе высокостабильного усилителя мощности С-диапазона с полностью твердотельным модулятором, резонансного стабилизатора анодного напряжения 10кВ и воздушного охлаждения. На выходе формируется зондирующий сигнал длительностью от 1 мкс (короткий импульс) до 100 мкс (НЧМ-импульс) с минимальным рабочим циклом 20, усиливается до 15 кВт в передатчике. Такая конструкция обеспечивает

требуемый уровень средней мощности и радиус зоны ответственности от 1 до нескольких сотен километров. Выход передатчика оснащен делителем на 2, что позволяем излучать на двух ортогональных поляризациях.

Использование НЧМ-сигналов позволяет измерять скорость и отражательную способность без изменения частоты повторения импульсов, увеличивая динамический диапазон за счет коэффициента сжатия и устраняя неоднозначные диапазоны путем ортогональных сигналов (изменение наклона частотной модуляции). Передающий тракт предназначен для генерирования СВЧ зондирующих импульсов и передачи их на антенный блок.

1.2.1.6 Приемный тракт ДМРЛ-С

Приемная система предназначена для усиления, частотной селекции и частотного преобразования принятого эхо-сигнала, чтобы оборудование обработки сигналов и обработки информации могло работать должным образом.

Приемная система состоит из двух каналов, которые обрабатывают вертикальную и горизонтальную поляризации независимо друг от друга. Каждый канал приемника состоит из двух подканалов, которые принимают и преобразуют радиолокационные сигналы с выхода волновода. Для достижения линейного динамического диапазона 100 дБ один канал работает с выхода направленного ответвителя с ослаблением относительного основного канала 30–40 дБ. Коэффициент шума для каждого канала приемника составляет менее 3 дБ. Высокочастотный (ВЧ) модуль приемника предназначен для приема, усиления и частотного преобразования принимаемого сигнала, отраженного от метеоцели.

1.2.2. Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК)

Центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК) сопряжен с системой цифровой обработки информации приемника радиолокатора и системой управления состоянием компонентов ДМРЛ-С. ЦУВК включает в себя:

- систему первичной обработки сигналов радиолокатора;
- программное средство вторичной обработки информации УВК ДМРЛ-С (шифр ГИМЕТ-2010);
- автоматизированную систему контроля и управления РЛК (АСКУ)

1.2.2.1 Система первичной обработки

Система первичной обработки представляет собой аналого-цифровое преобразование эхо-сигнала каждого приемного канала ДМРЛ-С на промежуточной частоте, для чего используется 16-разрядный АЦП. Сочетание цифрового процессора и приемного тракта обеспечивает линейный динамический диапазон обрабатываемого сигнала около 70 дБ для каждого подканала. Совместная обработка двух подканалов обеспечивает сквозной линейный динамический диапазон не менее 100 дБ. Система оценки отражательной способности и спектральных характеристик метеорологических объектов реализована в специализированном сигнальном процессоре.

1.2.2.2 Система вторичной обработки

Система обработки вторичных метеорологических данных УВК ДМРЛ-С обеспечивает отображение информации о погоде в виде карт не реже одного раза в несколько минут:

- отражаемость в горизонтальных сечениях на различных высотных уровнях и вертикальных сечений по различным азимутам;

- высоту облачности;
- радиальную доплеровских скоростей в горизонтальных сечениях на различных уровнях высоты;
- среднеквадратичную ширину спектра скоростей;
- опасные метеоявления;
- видимость в осадках;
- интенсивность осадков;
- количество осадков за любой промежуток времени наблюдений;
- скорость и направление перемещения облачных систем;
- фазовое состояние метеорообъектов.

Любую из вышеперечисленных карт можно сохранить в виде файла, распечатать или отправить в виде кода BUFR на удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК).

1.2.2.3 Автоматизированная система контроля и управления РЛК

Система автоматического контроля и управления контролирует основные параметры ДМРЛ-С (выходной мощности, чувствительности приемника и т.д.), следит за работой всех устройств локатора и совместно с первичной системой обработки радиолокационной информации управляет режимами работы по команде оператора.

1.2.3 Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК)

УУВК используется для удаленного управления процессом наблюдения, а также для получения и обработки объемных файлов от ЦУВК с целью получения метеорологической информации для широкого круга пользователей.

Удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК) сопрягается с Центральным вычислительным комплексом (ЦУВК) через выделенный канал связи.

Оператор УУВК имеет возможность:

- ◆ дистанционного управления процессом радиолокационных наблюдений;
- ◆ дистанционной установки режимов и параметров наблюдений;
- ◆ контроля радиолокационного обзора, полноты и достоверности получаемой метеорологической информации.

Вся информация, полученная и сгенерированная на УУВК, включая файлы приема информации о состоянии ДМРЛ и режиме работы, должна архивироваться и храниться на жестком диске УУВК в течение не менее одного месяца. По истечении этого периода основная информация в соответствии с заранее запрограммированным списком переносится на жесткий диск и подлежит длительному хранению.

1.2.4 Система первичного электропитания

Система первичного электропитания обеспечивает ДМРЛ-С электроэнергией переменного тока 308 В/200 В 50Гц. Она питается от двух независимых промышленных сетевых или резервных источников питания = дизельной электростанции (ДЭС).

Основной сетевой фидер (фидер 1) подает питание на изделие, а второй фидер находится в режиме ожидания без нагрузки. Если основной фидер выходит из строя, резервный блок переключает нагрузку на резервный сетевой фидер. Если оба основных фидера выходят из строя, ДЭС (при наличии) автоматически запускается и принимает нагрузку по фидеру 2.

Во избежание сбоев в электроснабжении при переключении фидеров электроустановка ДМРЛ-С оснащена источником бесперебойного питания (ИБП), который непрерывно подает питание на всё основное оборудование ДМРЛ-С. ИБП также стабилизирует напряжение питания оборудования.

Мощность, потребляемая основным оборудованием ДМРЛ-С, не превышает 10 кВт.

1.3 Устройство и работа ДМРЛ-С

Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С работает в диапазоне «С» ($\lambda = 5,3$ см) и является высокостабильным радиолокатором, основанным на принципе внутренней когерентности.

Большинство операций по обработке сигнала осуществляется программными способами на ЭВМ.

Упрощенная структурная схема ДМРЛ-С представлена на рисунке 2:



Рисунок 2 - Упрощенная структурная схема ДМРЛ-С [11]

В радиолокаторе используется двухсигнальная система: 1 мкс обеспечивает зону покрытия от 1 до 4–10 км, а 25–60 мкс обеспечивает зону обзора от 4–10 до 250 км. Разброс частот по типам сигналов на 5-7 МГц устраняет взаимное влияние на обнаружение метеорологических объектов.

Обзор пространства осуществляется с использованием 25-ти возбужденных периодов повторения импульсов для определения однозначной скорости метеообъектов в диапазоне от минус 50 до + 50 м/с [1].

В ДМРЛ-С используется параболическая антенна с игольчатым лучом, выполненная в виде отражателя и облучателя. Устройство поляризации облучателя позволяет работать в режимах:

- излучения линейной горизонтальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях;
- одновременного излучения горизонтальной и вертикальной поляризации с одновременным приемом на вертикальной и горизонтальной поляризациях [1].

Клистронный передатчик состоит из одного шкафа клистрного усилителя мощности. Импульсная излучаемая мощность каждого частотного канала составляет не менее 15 кВт. Передатчик обеспечивает высокую стабильность частоты для эффективной работы системы селекции движущихся целей.

Четырехканальный приемник обеспечивает оптимальное отклонение, усиление, преобразование и обнаружение принятых эхо-сигналов. Вход приемника оснащен протектором и ограничителем для защиты малошумящего усилителя от высокочастотной энергии утечки собственного передающего оборудования и сигналов другого радиооборудования.

Два канала приемника являются основными каналами горизонтальной и вертикальной поляризации, а два – вспомогательными каналами, ослабленными на 30 дБ для достижения линейного динамического диапазона до 100 дБ. При работе с одной поляризацией используются два приемника: основной и дополнительный приемник горизонтальной поляризации.

В приёмнике используется супергетеродинная схема с однократным преобразованием частоты. Промежуточная частота составляет 60 МГц. Сигнал промежуточной частоты с выхода приемника подается на 16-разрядный АЦП, а затем на вход цифрового фазового детектора для формирования квадратурной составляющей эхо-сигнала. Дальнейшая обработка эхо-сигнала осуществляется в цифровом виде в блоке обработки.

Оборудование цифровой обработки сигналов фильтрует асинхронные импульсные помехи, снижает НЧМ-сигналы, обрабатывает спектр принимаемых сигналов и вычисляет поляризационные характеристики. Аппаратура цифровой обработки имеет четыре канала (в зависимости от количества каналов приема). Также в состав аппаратуры имеется приемник единого времени (ГЛОНАСС/GPS).

Первичная обработка информации (ПОИ) предоставляет информацию о метеотражениях с привязкой к пространственным координатам (дальность, азимут и угол места).

Вторичная обработка управляющего вычислительного комплекса (ВОИ УВК) ДМРЛ по локальной вычислительной сети принимает радиолокационную информацию с выхода ПОИ, производит ее идентификацию, осуществляет дальнейшую обработку и трансляцию полученной информации в коде BUFR потребителям и на удаленный управляющий вычислительный комплекс (УУВК) [1].

УУВК позволяет отслеживать и контролировать техническое состояние комплекса и возможность управления.

Оборудование ДМРЛ-С не является резервным.

Глава 2. Доплеровский радиолокатор Meteor 50

Доплеровский радиолокатор Meteor 50 создан на основе магнетрона и работает на номинальной частоте 9,375 ГГц (~ 3,2 см). Радиолокатор способен измерять атмосферные осадки, радиальные ветра и свойства частиц облаков и осадков. Он также сканирует на низких скоростях и оптимизирует передатчик и приемник для обнаружения эхо-сигналов на близком расстоянии в ясную погоду. Подобные радары используются метеорологическими службами и исследовательскими центрами по всему миру.



Рисунок 3 – Доплеровский радиолокатор Meteor 50, мобильная версия [12].

Как и все стандартные мобильные радиолокаторы, Meteor 50 DX можно транспортировать. Радиолокатор построен на колесной платформе и может быть поднят краном. Прицеп включает в себя генератор для обеспечения необходимой электроэнергии и коммуникационную инфраструктуру для дистанционного управления и мониторинга 24 часа в сутки. Такая мобильность делает Meteor 50 чрезвычайно универсальным инструментом для изучения широкого спектра атмосферных явлений по всему миру. Мобильный Meteor 50 имеет антенну диаметром 1,8 м, обеспечивающую ширину луча $1,3^\circ$ при половинной мощности, и обычно работает с установленным обтекателем.

Управление радиолокатором может осуществляться с помощью удаленного компьютера (ноутбук или сервер), который подключен по беспроводной сети Интернет к ПК, установленному на прицепе. Операционное программное обеспечение позволяет конфигурировать развертывание радиолокатора и планировать последовательность сканирования. «Ravis» — это программное обеспечение для обслуживания и калибровки, используемое для диагностики и тестирования системы и визуализации данных в режиме реального времени. Ravis также включает автоматизированный инструмент для отслеживания солнца для настройки системы. «Rainbow 5» — это программное обеспечение для планирования сканирования, визуализации и анализа данных, которое может генерировать продукты и изображения практически в режиме реального времени.

Meteor 50 работает только в режиме гибридной поляризации, также известном как режим одновременной передачи и приема, т.е. сигнал передачи разделяется на две части, одновременно передавая и принимая горизонтальную и вертикальную поляризацию.

Этот режим основан на предположении, что кроссполярные сигналы слабы по сравнению с сигналами, совпадающими по полярности, и поэтому их можно игнорировать. Поскольку кроссполярный сигнал не измеряется, коэффициент линейной деполаризации не может быть замечен.

Функциональность двойной поляризации позволяет извлекать ряд дополнительных переменных, имеющих отношение к геофизике. Это дополнительная информация может дать представление:

- о величине и форме осадков;
- улучшить идентификацию целей;
- оценить эффект затухания и распространения;

Функциональность поляриметрии также позволяет использовать ряд альтернативных методов количественной оценки осадков. Уникальным аспектом является реализация определения степени поляризации, что является относительно неизученной переменной по отношению к атмосферным

явлениям, но предыдущие исследования показали, что она обладает теми же свойствами, что и кополярный коэффициент в классификации гидрометеоров.

2.1. Технические характеристики Meteor 50

- Рабочая частота 9375 МГц $\pm$ 30 МГц;
- Разрешение диапазона по умолчанию 50м, 100м, 250м, 500м;
- Частота повторений импульса 300–3000 Гц;
- Рабочий диапазон 100 км;
- 4 импульсных режима;
- Угловое разрешение размера антенны по умолчанию 1,3° (эквивалент возможности контроля помех по ширине луча 40 дБ);
- Отражатель диаметром 1,8 м (основной), 1,2 м и 2,4 м (дополнительно);
- Поляризация горизонтальная и вертикальная в диапазоне 0° - 360°, непрерывный азимут – 6° - +182° по высоте;
- Точность углового позиционирования +0,1°;
- Скорость сканирования 0,2–6 об/мин;
- Обтекатель 2,55 м (обтекатель требуется только для экстремальных погодных условий);
- Пиковая мощность 55кВ.

2.1.1. Условия окружающей среды для работы радиолокатора Meteor 50

Таблица 2. Условия окружающей среды для корректной работы радиолокатора Meteor 50

Характеристика	Значение	Единицы измерения
Температурный диапазон с обтекателем	от -25 до +45	°C
Температурный режим без обтекателя	от –10 от +35	°C

Относительная влажность	от 10 до 95	%
Допустимая эксплуатационная ветровая нагрузка без обтекателя	155	км/ч
Допустимая эксплуатационная ветровая нагрузка с обтекателем	200	км/ч
Количество осадков	60	мм/ч
Погода	Туман, дождь, град, гроза	
Высота установки	до 3 км над уровнем моря	

Глава 3. Измерение осадков. Осадки в зимний период

Зоны осадков характеризуются рядом параметров, включая форму, размер, скорость перемещения, продолжительность жизни, стадию развития и структуру. По синоптическим характеристикам осадки можно разделить на фронтальные и внутримассовые, а также на грозовые, ливневые и дождевые. По структуре осадки могут быть ячеистыми: многоячеистыми и в виде полос.

Облака образуют жидкие, твердые и смешанные осадки. Жидкие осадки делятся на ливневые, обложные и морозящие в зависимости от физических условий, таких как образование, рассеивание, интенсивность и продолжительность.

К твердым осадкам относятся:

- град;
- ледяная крупа;
- снег;
- снежная крупа;
- снежные зерна;
- ледяной дождь;
- ледяные иглы.

Смешанные осадки состоят из различных типов осадков, выпадающих одновременно, например, дождь, смешанный со снегом, или дождь, смешанный с крупой.

3.1 Классификация твердых осадков.

3.1.1 Град

Град – это осадки в виде сферических плотных ледяных частиц (градин) диаметром 0,5-10 см, выпадающих из кучево-дождевых облаков фронтального или внутримассового происхождения. Град длится от нескольких минут до 30-

40 минут и выпадает в основном во второй половине дня, когда термическая конвекция максимальна.

Град обычно состоит из чередующихся слоев прозрачного и непрозрачного льда различной толщины, со средней плотностью $0,8-0,9 \text{ г/см}^3$. Во время катастрофических градобитий интенсивность выпадения града может достигать 1000-1500 мм/ч. Град часто покрывает поверхность Земли сплошным слоем толщиной до 20-30 см. Сильные градобития обычно сопровождаются шквальными, а иногда и ураганными ветрами. Град уничтожает посевы, повреждает различные сооружения, здания и леса, приводит к гибели животных.

Град растет в мощных восходящих потоках за счет гравитационной коагуляции зародышей града, возникших на крупной замерзшей капле или обзерненной крупе, с переохлаждённой крупно-капельной и мелкокапельной фракцией [3].

3.1.2. Ледяная крупа

Ледяная крупа выпадает в виде мелких, сферических, плотных частиц льда диаметром менее 0,5 см. Обычно она наблюдается при проливных ливнях в переходные периоды года – весной и осенью – и на больших высотах, где изотерма 0°C достаточно высока, чтобы крупа полностью растаяла и достигала поверхности в виде сильного дождя.

3.1.3. Ледяной дождь

Ледяной дождь – это небольшие прозрачные ледяные шарики диаметром от 0,1-0,3 см, образующие при падении капель дождя и их замерзании в нижних слоях воздуха с отрицательной температурой. В некоторых случаях замерзание происходит не полностью, и остается только ледяная оболочка.

3.1.4. Снег

Снег – это либо кристаллические твердые осадки размером от нескольких миллиметров до нескольких миллиметров, выпадающие из плотных слоистых облаков фронтального происхождения, либо обильный снегопад, преимущественно из слоисто-кучевых облаков, который представляет собой хлопьевидные (размером от 0,1 до 3-4 см) твердые осадки, образующиеся в результате механического объединения снежинок.

В обложном снегопаде ледяные кристаллы и снежинки также характеризуются разными размерами. В передней части зоны теплого фронта выпадают мелкие ледяные кристаллы, размеры которых составляют доли миллиметра. По мере приближения фронта начинается выпадение более крупных ледяных кристаллов и снежинок. Диаметр снежинок и снежных хлопьев может быть больше 1 см. Эти частицы выпадают со скоростью 1-2 м/с [7].

3.1.5. Снежная крупа

Снежная крупа выпадает в виде неправильной округлой формы, матово-белых снежинок или конусов размером 0,1-1,5 см и плотностью 0,1-0,3 г/см³. Они образуются в основном в кристаллических кучево-дождевых облаках в зимний сезон путем зарождения и застывания снежинок.

3.1.6. Снежные зерна

Снежные зерна – это мелкие, снежные частицы диаметром менее 0,1 мм, твердые осадки, похожие на манную крупу. Они выпадают в небольших количествах из слоистых и слоисто-кучевых облаков.

3.1.7. Ледяные иглы

Крошечные кристаллы льда размером от сотых долей миллиметра до миллиметра, а иногда и больше, парящие в воздухе над безоблачным небом или при высокой облачности, называются ледяными иглами.

3.2. Классификация явлений

Для корректного определения явления, необходимо знать комплекс первичных данных.

Комплекс информации включает в себя:

- качественную картину горизонтального распределения радиоэхо на индикаторе кругового обзора (ИКО) в радиусе 300 км;
- качественную картину горизонтального распределения радиоэхо на ИКО в радиусе 90 км под углами возвышения антенны $\varepsilon = 0,2-1^0$ при $\lg Z_1 \geq -0,3$ на уровне H_1 или ниже (для определения зон, занятых осадками);
- положение ближнего к центру экрана края радиоэхо в два момента времени при $\varepsilon = 0,2-1^0$ (для определения скорости и направления перемещения);
- величины максимальных высот радиоэхо в дискретных ячейках пространства, занятого радиоэхо, в масштаб: 300 км;
- величины отражаемости радиоэхо в $\lg Z$ в дискретных ячейках пространства, занятого радиоэхо, размером 30X30 км, в радиусе обнаружения радиоэхо (масштаб 300 км), на уровне H_1 ;
- в ближней зоне формы облаков, высоты границ облаков, вид и интенсивность осадков.

Холодный период определяется как ситуация, когда фактическая температура в радиусе обзора радиолокаторе меньше -2^0C .

В холодный период все области радиоэха с отражаемостью $\lg Z_1 \geq -0,3$, зарегистрированные на расстоянии 30 км и более и в радиусе 90 км при угле возвышения антенны $\varepsilon = 0,2-1$ и достигающих поверхности Земли, считаются зонами осадков [7].

Таблица 3. Классификация явлений, связанных с кучевообразной облачностью, по радиолокационным данным

Радиолокационная классификация конвективных облаков	Радиолокационные критерии распознавания РКО	Оцениваемая вероятность совпадения радиолокационной и визуальной информации о характере явлений, сопровождающих кучевообразные облака	Знак, обозначающий явление по радиолокационной метеорологической классификации	Метеорологическая классификация явлений, сопровождающих Сб, соответствующая радиолокационной классификации
Грозоопасные облака и грозы	Наличие четко выраженного РКО, максимальная высота РКО $H \geq 4-6$ км, $Lg Z_1 \geq 2-2,5$	От 30% до 70%		Метеонаблюдатель фиксирует грозу или ливневый снег
Ливневый снег	Наличие четко выраженного РКО, $Lg Z_1 \geq 1,3$ Наличие четко выраженного РКО, $0,7 \leq Lg Z_1 < 1,3$	До 90 км Далее 90 км На любом удалении 30-70%	  	Ливневый снег Ливневый снег или обложной дождь
Снег	Наличие радиоэхо с отражаемостью - $0,3 < Lg Z_1 < 0,7$	До 90 км Далее 90 км	 	То же

Твердые осадки в зимнее время выпадают из зоны радиоэхо кучево-образных (конвективных) облаков – РКО. Есть несколько типов РКО:

1. Зона несплошного РКО на ИКО.

Выглядит как нерегулярное рассеивание хорошо выраженных круглых или овальных ячеек или небольших полос с хорошо выраженными границами, беспорядочно расположенных по странам света. Обычно длина таких полос в

зоне РКО не превышает 90 км. Характерной особенностью такого радиоэхо является то, что на удалениях до 150 км площадь ячеек или полос радиоэхо почти не меняется, даже при изменении углов места на $0,5-1^0$ или введении изоэхо на 1-2 ступени. Если затухание ячеек велико, радиоэхо превращается в точку. На индикаторе дальность-высота (ИДВ) это радиоэхо отображается в виде вертикальных «столбов» с горизонтальными полосами толщиной более 3 км.



Рисунок 4 - Радиоэхо кучевообразных облаков неустойчивой воздушной массы на ИКО. Зона РКО.

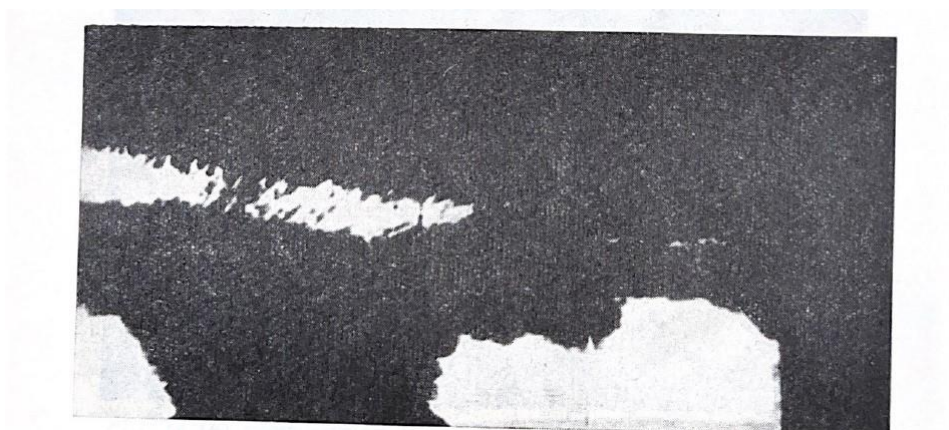


Рисунок 5 - Радиоэхо кучевообразных облаков со слоистообразными верхнего яруса (Q и C) на ИДВ.

2. Полоса РКО на ИКО.

Имеет форму очагов, ориентированных в одном направлении. Полоса – это область радиоэхо длиной не менее 90 км и с отношением длины l к ширине d (l/d) не менее 5. Если полоса состоит из отдельных очагов радиоэхо с разрывами, она считается несплошной; если разрывов нет – сплошной. Полоса РКО может стать РСО (радиоэхо слоистообразных облаков), которое исчезает при ослаблении. В этом случае ширина полосы может быть довольно широкой (в некоторых местах до 150 км). Такое часто бывает, что непрерывная полоса радиоэхо становится менее плотной с увеличением расстояния от радиолокатора. В этом случае все радиоэхо следует рассматривать как непрерывную полосу.

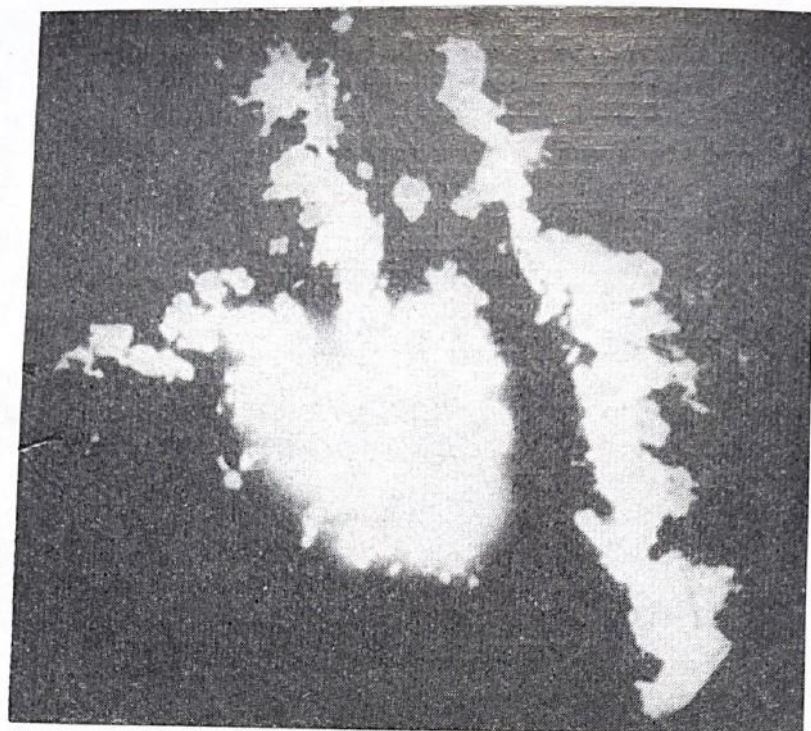


Рисунок 6 - Радиоэхо кучевообразных облаков, вытянутых в полосу (преимущественно фронтального происхождения) на ИКО.
Полоса РКО

3. Большое изолированное РКО.

Это непрерывное РКО диаметром более 60 км. Обычно этот очаг состоит из нескольких близко расположенных конвективных ячеек, которые сливаются, образуя непрерывный РКО на экране ИКО.

Если на экране ИКО присутствуют изолированные источники РКО диаметром менее 60 км, их следует классифицировать как несплошные зоны РКО.

Если РКО в виде полосы или изолированного очага располагается на расстоянии менее 30 км от центра экрана, то на ИВД картина радиоэхо будет такой же, как и у зоны несплошного РКО [7].

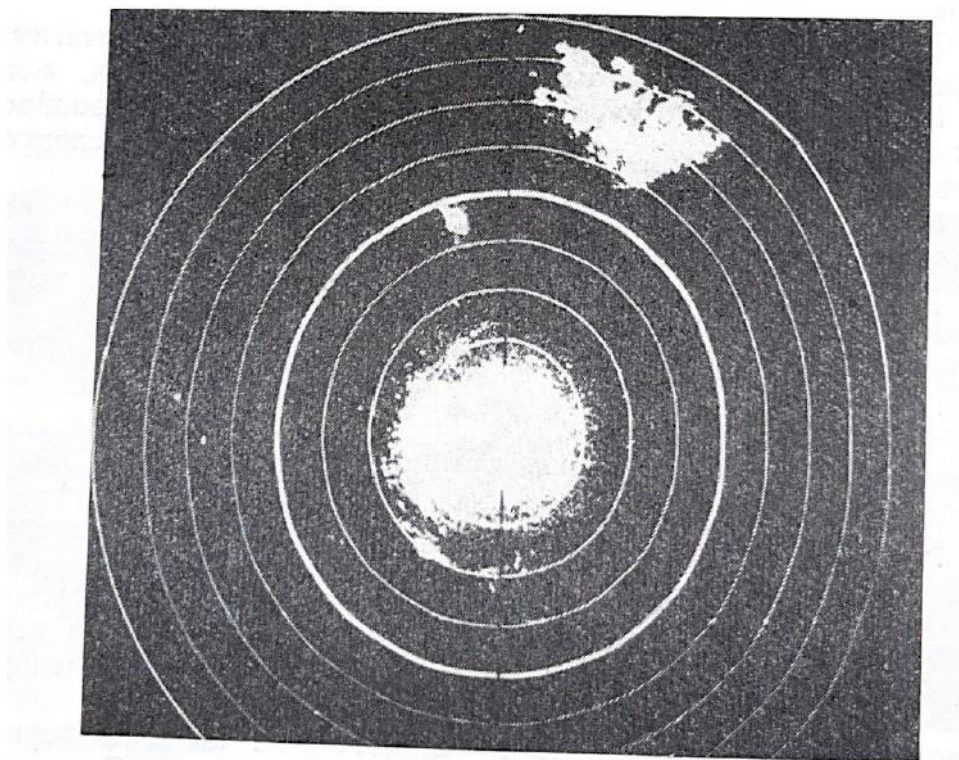


Рисунок 7 – Изолированное РКО на ИДВ. М: 100.

Глава 4. Нахождение коэффициентов перехода

ДМРЛ-С плотно применяется на российской радиометеорологической сети, на которой также установлены другие метеорологические радиолокаторы. На 09.02.2023 в России установлено 52 доплеровских метеорологических радиолокатора.

Метеорологические радиолокаторы определяют интенсивность осадков, которая требуется для определения коэффициента перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков.

В своей дипломной работе количество выпавших осадков я получила из архива сети осадкомеров ООТ Pluvio² 200, установленных в Санкт-Петербурге.

4.1. Осадкомер Pluvio² 200

Датчики атмосферных осадков предназначены для непрерывного измерения количества осадков (жидких, твердых, смешанных) и наблюдением за их интенсивностью.

Принцип действия основан на взвешивании собранных осадков и пересчет их в единицы уровня.



Рисунок 8 – Осадкомер ООТ Pluvio² 200.

Датчик осадков состоит от приемного резервуара, установленного на поддоне. Поддон устанавливается на платформе для взвешивания, под платформой установлен весовой тензодатчик на металлическом основании с фланцем, к фланцу основания крепится труба – стояк. Поддон предохраняет тензодатчик от попадания на него влаги. На приемный резервуар насаживается кожух из полипропилена ASA с улавливающим отверстием. Осадкомер Pluvio² 200 имеет площадь улавливающего отверстия 200 см²[9].

Таблица 4. Метеорологические и технические характеристики осадкомера

Наименование параметра	OTT Pluvio ² 200
Диаметр улавливающего отверстия, мм	159,6±0,4
Максимальный уровень осадков, мм	1500
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений количества осадков, мм	±1,0
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений массы осадков, г	±20
Напряжение питания, В постоянного тока	9,6...28
Потребляемая мощность, мВт	≤180
Диапазон интервала опроса, мин	1...60
Интерфейсы	SDI-12; RS-485; USB
Импульсный выход, Гц	2 или 5
Цена импульса, мм/имп	0,1
Габаритные размеры, мм, не более:	
- высота	850
- диаметр	480
Масса, кг, не более	15
Средний срок службы, лет	9

Данные для нахождения коэффициентов перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков было взято за январь, февраль и декабрь 2015 года с осадкомеров под кодовым номером, находящихся по адресам:

- 1001 – Байконурская улица, д. 12 А;
- 1002 – Коннолахтинский проспект, д. 12, к. 2Ф;

- 1003 – улица Гидростроителей, д. 2И;
- 1004 – Ленинградская улица, д. 199, к. 13;
- 1005 – 3-й Верхний переулок, д. 8Б;
- 1006 – Ораниенбаумский проспект, д. 73В;
- 1007 – Заячий проспект, д. 1;
- 1008 – Петергофское шоссе, д. 77ж;
- 1009 – Волхонское шоссе, д. 123, к. 2;
- 1010 – Шлиссельбургское шоссе, д. 79р;
- 1012 – Северская улица, д. 9, к. 2.

4.2. Уравнение Маршалла-Пальмера

Уравнение, с помощью которого можно вычислить коэффициенты перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков, выглядит так:

$$Z = A * I^b$$

где Z – радиолокационная отражаемость, $\frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3}$;

I - интенсивность осадков, мм/ч;

A и b – коэффициенты.

Оценку влияния точности определения величин в формуле для косвенных измерений провела по методическим указаниям «Обработка результатов измерений физических величин».

Для этого были выведены формулы для расчетов погрешностей:

$\Delta Z_A = \left| \frac{\partial Z}{\partial A} \right| \Delta A = |I^b| \Delta A$ - абсолютная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением коэффициента A;

$\Delta Z_I = \left| \frac{\partial Z}{\partial I} \right| \Delta I = |A b I^{b-1}| \Delta I$ - абсолютная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением интенсивности осадков;

$\Delta Z_b = \left| \frac{\partial Z}{\partial b} \right| \Delta b = |A I^b \ln I| \Delta b$ - абсолютная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением коэффициента b;

$\Delta Z = \sqrt{\Delta Z_A^2 + \Delta Z_I^2 + \Delta Z_b^2}$ - абсолютная ошибка радиолокационной отражаемости, вызванная влиянием ошибок коэффициентов A, b и интенсивности осадков;

$\delta Z_A = \frac{\Delta Z_A}{Z} 100\%$ - относительная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением коэффициента A;

$\delta Z_I = \frac{\Delta Z_I}{Z} 100\%$ - относительная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением интенсивности осадков;

$\delta Z_b = \frac{\Delta Z_b}{Z} 100\%$ - относительная ошибка, возникающая при расчете радиолокационной отражаемости, вызванная изменением коэффициента b;

$\delta Z = \frac{\Delta Z}{Z} 100\%$ - относительная ошибка радиолокационной отражаемости, вызванная влиянием ошибок коэффициентов A, b и интенсивности осадков;

Далее, с помощью этих формул, я провела расчет и выяснила какой вклад в погрешность радиолокационной отражаемости вносит точность измерений коэффициентов A , b и интенсивности осадков I .

Таблица 5. Расчет влияния точности измерений.

$A =$	2000	0,5								
$b =$	1,6	0,05								
$I =$		0,05								
$I(\text{мм/ч})$	$Z(\text{мм6/м3})$	$Z(\text{дБz})$	ΔZ_a	ΔZ_i	ΔZ_b	ΔZ	δZ_a	δZ_i	δZ_b	δZ
0,1	50,23773	17,0103	0,01256	40,1902	5,78383	40,6042	0,025	80	11,5129	80,8242
0,5	659,754	28,19382	0,16494	105,561	22,8653	108,009	0,025	16	3,46574	16,3711
1	2000	33,0103	0,5	160	0	160,001	0,025	8	0	8,00004
2,5	8664,311	39,37734	2,16608	277,258	396,951	484,197	0,025	3,2	4,58145	5,58841
5	26265,28	44,19382	6,56632	420,244	2113,62	2155	0,025	1,6	8,04719	8,20475
10	79621,43	49,0103	19,9054	636,971	9166,76	9188,88	0,025	0,8	11,5129	11,5407
50	1045640	60,19382	261,41	1673,02	204528	204535	0,025	0,16	19,5601	19,5608
100	3169786	65,0103	792,447	2535,83	729870	729875	0,025	0,08	23,0259	23,026

Для расчетов взяла значения коэффициентов $A - 2000$ и $b - 1,6$ (значения коэффициентов, заложенные на данный момент в АМРК «Метеор-Метеоячейка») с точностью 0,5 и 0,05 соответственно. Значение интенсивности осадков изменялось от 0,1 до 100 мм/ч с точностью 0,05.

В таблице выше можно увидеть, что влияние коэффициента A при разных значениях интенсивности не меняется. Ошибки, вызванные ошибкой измерения интенсивности осадков и коэффициента b влияют на точность значений.

До значений интенсивности 1 мм/ч вклад погрешности ошибки коэффициента b снижается до нуля, далее – увеличивается. Ошибка значений интенсивности осадков уменьшается при увеличении значений интенсивности. Общая ошибка отражаемости принимает свое минимальное значение 5,5 при значениях интенсивности 2,5 мм/ч.

Далее я решила провести расчеты с такими же значениями интенсивности и коэффициентов A и b , взяв при этом другие точности измерений.

Таблица 6. Расчет влияния точности измерений.

A =	2000	0,5								
b =	1,6	0,05								
I =		0,005								
I(мм/ч)	Z(ммб/м)	Z(дБз)	ΔZ_a	ΔZ_i	ΔZ_b	ΔZ	δZ_a	δZ_i	δZ_b	δZ
0,1	50,2377	17,0103	0,01256	4,01902	5,78383	7,04311	0,025	8	11,5129	14,0196
0,5	659,754	28,1938	0,16494	10,5561	22,8653	25,1849	0,025	1,6	3,46574	3,81732
1	2000	33,0103	0,5	16	0	16,0078	0,025	0,8	0	0,80039
2,5	8664,31	39,3773	2,16608	27,7258	396,951	397,924	0,025	0,32	4,58145	4,59268
5	26265,3	44,1938	6,56632	42,0244	2113,62	2114,04	0,025	0,16	8,04719	8,04882
10	79621,4	49,0103	19,9054	63,6971	9166,76	9167	0,025	0,08	11,5129	11,5132
50	1045640	60,1938	261,41	167,302	204528	204529	0,025	0,016	19,5601	19,5601
100	3169786	65,0103	792,447	253,583	729870	729871	0,025	0,008	23,0259	23,0259

В таблице 6 приведены расчеты влияния ошибок интенсивности осадков, коэффициентов A и b. В этом расчете точность измерений коэффициента A и b осталась такой же, 0,5 и 0,05 соответственно, а точность измерений интенсивности осадков стала 0,005.

Таким образом, при увеличении точности измерений интенсивности осадков, ошибка, вызванная ошибкой измерения, также уменьшается при увеличении значений интенсивности и не превышает 8% при значениях I = 0,1мм/ч.

Таблица 7. Расчет влияния точности измерений.

A =	2000	0,5								
b =	1,6	0,005								
I =		0,05								
I(мм/ч)	Z(ммб/м)	Z(дБз)	ΔZ_a	ΔZ_i	ΔZ_b	ΔZ	δZ_a	δZ_i	δZ_b	δZ
0,1	50,2377	17,0103	0,01256	40,1902	0,57838	40,1943	0,025	80	1,15129	80,0083
0,5	659,754	28,1938	0,16494	105,561	2,28653	105,586	0,025	16	0,34657	16,0038
1	2000	33,0103	0,5	160	0	160,001	0,025	8	0	8,00004
2,5	8664,31	39,3773	2,16608	277,258	39,6951	280,093	0,025	3,2	0,45815	3,23273
5	26265,3	44,1938	6,56632	420,244	211,362	470,449	0,025	1,6	0,80472	1,79114
10	79621,4	49,0103	19,9054	636,971	916,676	1116,43	0,025	0,8	1,15129	1,40218
50	1045640	60,1938	261,41	1673,02	20452,8	20522,8	0,025	0,16	1,95601	1,9627
100	3169786	65,0103	792,447	2535,83	72987	73035,4	0,025	0,08	2,30259	2,30411

В таблице выше представлены расчеты влияния точности измерений. Значения коэффициентов A и b – 2000 и 1,6. Точность измерения

коэффициента A осталась прежней – 0,5. Точность коэффициента b составляет 0,005, интенсивности осадков – 0,05.

Вклад ошибки при измерениях интенсивности при низких значениях интенсивности осадков составляет до 80%, при возрастании значений интенсивности стремиться к нулю. Ошибка, вызванная коэффициентом b составляет 0% при значениях $I = 1$ мм/ч, далее возрастает до 2,3%.

Таблица 8. Расчет влияния точности измерений.

A =	2000	0,5								
b =	1,6	0,005								
I =		0,005								
I(мм/ч)	Z(мм6/м3)	Z(дБз)	ΔZ_a	ΔZ_i	ΔZ_b	ΔZ	δZ_a	δZ_i	δZ_b	δZ
0,1	50,23773	17,0103	0,01256	4,01902	0,57838	4,06044	0,025	8	1,15129	8,08246
0,5	659,754	28,19382	0,16494	10,5561	2,28653	10,8021	0,025	1,6	0,34657	1,6373
1	2000	33,0103	0,5	16	0	16,0078	0,025	0,8	0	0,80039
2,5	8664,311	39,37734	2,16608	27,7258	39,6951	48,4677	0,025	0,32	0,45815	0,55939
5	26265,28	44,19382	6,56632	42,0244	211,362	215,599	0,025	0,16	0,80472	0,82085
10	79621,43	49,0103	19,9054	63,6971	916,676	919,102	0,025	0,08	1,15129	1,15434
50	1045640	60,19382	261,41	167,302	20452,8	20455,2	0,025	0,016	1,95601	1,95624
100	3169786	65,0103	792,447	253,583	72987	72991,8	0,025	0,008	2,30259	2,30273

В таблице 8 я также рассчитала влияние точности измерений, взяв точность коэффициента A – 0,5, коэффициента b – 0,005 и интенсивности осадков – 0,005.

Влияние коэффициента A при разных значениях интенсивности осадков не изменяется. Влияние коэффициента b не превышает 2,3% при значениях $I=100$ мм/ч. Влияние интенсивности становится максимальным при $I=0,1$ мм/ч (8%). Общая ошибка отражаемости не превышает 8% при наименьших значениях интенсивности осадков.

По данным расчетам можно сделать вывод, что при увеличении точности измерений коэффициента b и интенсивности осадков до 0,005, влияние точности измерений снижается и не превышает 8% при наименьших значениях интенсивности осадков.

4.3. Сбор данных

Сбор данных об интенсивности осадков с доплеровского метеорологического радиолокатора Meteor 50 осуществлялся вручную с автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса «Метеор - Метеоячейка», установленного в Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете.

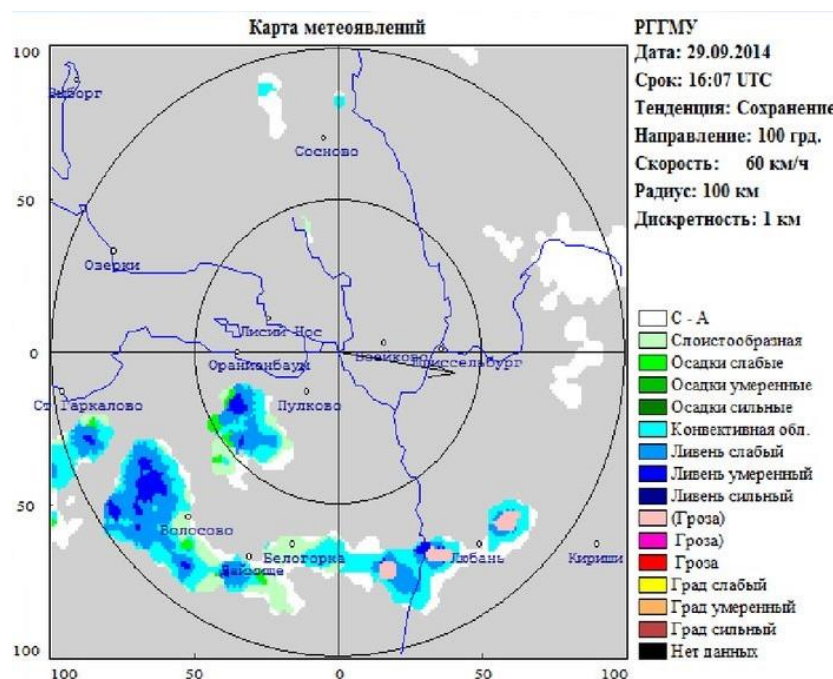


Рисунок 9 – АМРК «Метеор-Метеоячейка РГГМУ»

Из архива за январь, февраль и декабрь 2015 года были взяты данные с осадкомеров под кодовыми номерами 1001, 1002, 1003, 1004, 1005, 1006, 1007, 1008, 1009, 1010 и 1012.

1001	31.12.2014	18:05:00	0,05	1002	31.12.2014	18:05:00	0	1003	31.12.2014	18:05:00	0
1001	31.12.2014	18:10:00	0	1002	31.12.2014	18:10:00	0	1003	31.12.2014	18:10:00	0
1001	31.12.2014	18:15:00	0	1002	31.12.2014	18:15:00	0	1003	31.12.2014	18:15:00	0
1001	31.12.2014	18:20:00	0	1002	31.12.2014	18:20:00	0	1003	31.12.2014	18:20:00	0
1001	31.12.2014	18:25:00	0	1002	31.12.2014	18:25:00	0	1003	31.12.2014	18:25:00	0
1001	31.12.2014	18:30:00	0	1002	31.12.2014	18:30:00	0	1003	31.12.2014	18:30:00	0
1001	31.12.2014	18:35:00	0	1002	31.12.2014	18:35:00	0,05	1003	31.12.2014	18:35:00	0
1001	31.12.2014	18:40:00	0	1002	31.12.2014	18:40:00	0	1003	31.12.2014	18:40:00	0
1001	31.12.2014	18:45:00	0	1002	31.12.2014	18:45:00	0	1003	31.12.2014	18:45:00	0
1001	31.12.2014	18:50:00	0,06	1002	31.12.2014	18:50:00	0	1003	31.12.2014	18:50:00	0
1001	31.12.2014	18:55:00	0	1002	31.12.2014	18:55:00	0	1003	31.12.2014	18:55:00	0
1001	31.12.2014	19:00:00	0	1002	31.12.2014	19:00:00	0	1003	31.12.2014	19:00:00	0
1001	31.12.2014	19:05:00	0	1002	31.12.2014	19:05:00	0	1003	31.12.2014	19:05:00	0
1001	31.12.2014	19:10:00	0	1002	31.12.2014	19:10:00	0	1003	31.12.2014	19:10:00	0
1001	31.12.2014	19:15:00	0	1002	31.12.2014	19:15:00	0	1003	31.12.2014	19:15:00	0
1001	31.12.2014	19:20:00	0	1002	31.12.2014	19:20:00	0	1003	31.12.2014	19:20:00	0
1001	31.12.2014	19:25:00	0	1002	31.12.2014	19:25:00	0	1003	31.12.2014	19:25:00	0,08
1001	31.12.2014	19:30:00	0	1002	31.12.2014	19:30:00	0	1003	31.12.2014	19:30:00	0
1001	31.12.2014	19:35:00	0	1002	31.12.2014	19:35:00	0	1003	31.12.2014	19:35:00	0
1001	31.12.2014	19:40:00	0,05	1002	31.12.2014	19:40:00	0	1003	31.12.2014	19:40:00	0
1001	31.12.2014	19:45:00	0	1002	31.12.2014	19:45:00	0,05	1003	31.12.2014	19:45:00	0
1001	31.12.2014	19:50:00	0	1002	31.12.2014	19:50:00	0	1003	31.12.2014	19:50:00	0
1001	31.12.2014	19:55:00	0	1002	31.12.2014	19:55:00	0	1003	31.12.2014	19:55:00	0
1001	31.12.2014	20:00:00	0	1002	31.12.2014	20:00:00	0	1003	31.12.2014	20:00:00	0
1001	31.12.2014	20:05:00	0	1002	31.12.2014	20:05:00	0	1003	31.12.2014	20:05:00	0,07
1001	31.12.2014	20:10:00	0	1002	31.12.2014	20:10:00	0	1003	31.12.2014	20:10:00	0
1001	31.12.2014	20:15:00	0	1002	31.12.2014	20:15:00	0	1003	31.12.2014	20:15:00	0
1001	31.12.2014	20:20:00	0	1002	31.12.2014	20:20:00	0	1003	31.12.2014	20:20:00	0
1001	31.12.2014	20:25:00	0	1002	31.12.2014	20:25:00	0,08	1003	31.12.2014	20:25:00	0
1001	31.12.2014	20:30:00	0,06	1002	31.12.2014	20:30:00	0	1003	31.12.2014	20:30:00	0
1001	31.12.2014	20:35:00	0	1002	31.12.2014	20:35:00	0	1003	31.12.2014	20:35:00	0

Рисунок 10 – Пример архива данных осадкомеров

Далее массив данных был отсортирован. Выбирались данные о дате и времени, при которых значение количества осадков превышало 0,0.

дата	время	осадки
31.12.2014	18:05:00	0,05
31.12.2014	18:50:00	0,06
31.12.2014	19:40:00	0,05
31.12.2014	20:30:00	0,06
01.01.2015	1:35:00	0,05
01.01.2015	2:40:00	0,06
01.01.2015	3:25:00	0,05
01.01.2015	7:45:00	0,05
01.01.2015	9:00:00	0,05
01.01.2015	14:15:00	0,05
01.01.2015	15:30:00	0,05
01.01.2015	18:40:00	0,05
01.01.2015	18:50:00	0,05
01.01.2015	18:55:00	0,05
01.01.2015	19:05:00	0,05
01.01.2015	19:15:00	0,05
01.01.2015	19:20:00	0,05
01.01.2015	19:25:00	0,05
01.01.2015	19:50:00	0,08
01.01.2015	19:55:00	0,11
01.01.2015	20:00:00	0,14
01.01.2015	20:05:00	0,14
01.01.2015	20:10:00	0,14
01.01.2015	20:15:00	0,11
01.01.2015	20:20:00	0,21

Рисунок 11 – Пример отсортированных данных архива за январь 2015 года для осадкомера 1001.

В АМРК «Метеор-Метеоячейка» я выбирала нужные даты и время и снимала данные об интенсивности осадков (I, мм/ч) и об отражаемости на уровне Н1 (Z1, дБз).

дата	время	осадки, мм	z1, дБз	интерс I, мм/час
01.02.2015	0:25:00	0,09	10	0,06
01.02.2015	0:30:00	0,09	10	0,03
01.02.2015	0:50:00	0,05	12	0,07
01.02.2015	1:30:00	0,05	0	0
01.02.2015	1:55:00	0,05	0	0
01.02.2015	2:10:00	0,05	0	0
01.02.2015	2:35:00	0,05	19	0,21
01.02.2015	2:40:00	0,05	19	0,21
01.02.2015	2:45:00	0,06	0	0
01.02.2015	2:55:00	0,05	12	0,07
01.02.2015	3:15:00	0,05	25	0,49
01.02.2015	3:20:00	0,11	25	0,49
01.02.2015	3:25:00	0,11	21	0,28
01.02.2015	3:30:00	0,05	23	0,37
01.02.2015	3:40:00	0,05	16	0,13
01.02.2015	3:50:00	0,05	8	0,04
01.02.2015	4:15:00	0,05	19	0,21
01.02.2015	4:35:00	0,08	23	0,37
01.02.2015	4:40:00	0,1	23	0,37
01.02.2015	4:45:00	0,06	22	0,32

Рисунок 12 – Пример снятых данных об отражаемости и интенсивности за февраль 2015 года для осадкомера 1001.

4.4. Обработка первичных данных

Т. к. данные об отражаемости Z1 в АМРК «Метеор-Метеоячейка» представлены в единицах измерения дБз, для последующего корректного определения коэффициента перехода понадобился перевод в мм⁶/м³:

$$Z_{\text{дБз}} = 10 \lg Z \frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3}$$

$$Z \frac{\text{мм}^6}{\text{м}^3} = 10^{\frac{Z_{\text{дБз}}}{10}}$$

z1, дБз	интерс l, мм/час	z1 мм ⁶ /м ³
10	0,06	10
10	0,03	10
12	0,07	15,84893192
0	0	1
0	0	1
0	0	1
19	0,21	79,43282347
19	0,21	79,43282347
0	0	1
12	0,07	15,84893192
25	0,49	316,227766
25	0,49	316,227766
21	0,28	125,8925412
23	0,37	199,5262315
16	0,13	39,81071706
8	0,04	6,309573445
19	0,21	79,43282347
23	0,37	199,5262315
23	0,37	199,5262315
22	0,32	158,4893192
22	0,32	158,4893192
16	0,13	39,81071706
19	0,21	79,43282347
18	0,18	63,09573445
16	0,13	39,81071706

Рисунок 13 – Пример перевода отражаемости из Z дБз в Z мм⁶/м³ за февраль 2015 года для осадкомера 1001.

Данные из архива осадкомера были даны с размерностью мм/5 мин, поэтому, для корректного нахождения коэффициента перехода, потребовался перевод данных об осадках в мм/час. Для этого я вручную складывала данные о количестве осадков за время, разница между которыми была 5 минут. Если разница во времени превышала 5 минут, данные об осадках записывались первоначальные. Далее сложенные данные умножались на 6, вследствие чего получилась размерность мм/час.

дата	время	осадки, мм/5 мин	осадки, мм/час
01.02.2015	0:20:00	0,05	0,3
01.02.2015	0:50:00	0,05	0,3
01.02.2015	1:30:00	0,05	0,3
01.02.2015	2:30:00	0,08	0,48
01.02.2015	2:35:00	0,05	0,78
01.02.2015	2:50:00	0,06	0,36
01.02.2015	3:20:00	0,06	0,36
01.02.2015	3:25:00	0,05	0,66
01.02.2015	3:30:00	0,09	0,84
01.02.2015	3:35:00	0,05	0,84
01.02.2015	4:05:00	0,06	0,36
01.02.2015	4:25:00	0,06	0,36
01.02.2015	4:35:00	0,05	0,3
01.02.2015	4:45:00	0,05	0,3
01.02.2015	4:50:00	0,05	0,6
01.02.2015	4:55:00	0,05	0,6
01.02.2015	5:00:00	0,05	0,6
01.02.2015	5:05:00	0,04	0,54
01.02.2015	5:10:00	0,05	0,54
01.02.2015	5:15:00	0,1	0,9
01.02.2015	5:20:00	0,1	1,2
01.02.2015	5:25:00	0,09	1,14
01.02.2015	5:30:00	0,05	0,84
01.02.2015	5:35:00	0,07	0,72
01.02.2015	5:40:00	0,05	0,72
01.02.2015	5:55:00	0,08	0,48
01.02.2015	6:00:00	0,04	0,72

Рисунок 14 - Пример изменения дискретности данных об осадках за февраль 2015 года для осадкомера 1002.

4.5. Зависимость количества осадков и интенсивности

Для корректного нахождения коэффициента перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков для начала нужно построить графики зависимости количества осадков и интенсивности осадков. Графики построены по данным с АМРК «Метеор-Метеоячейка» и архива осадкомеров.

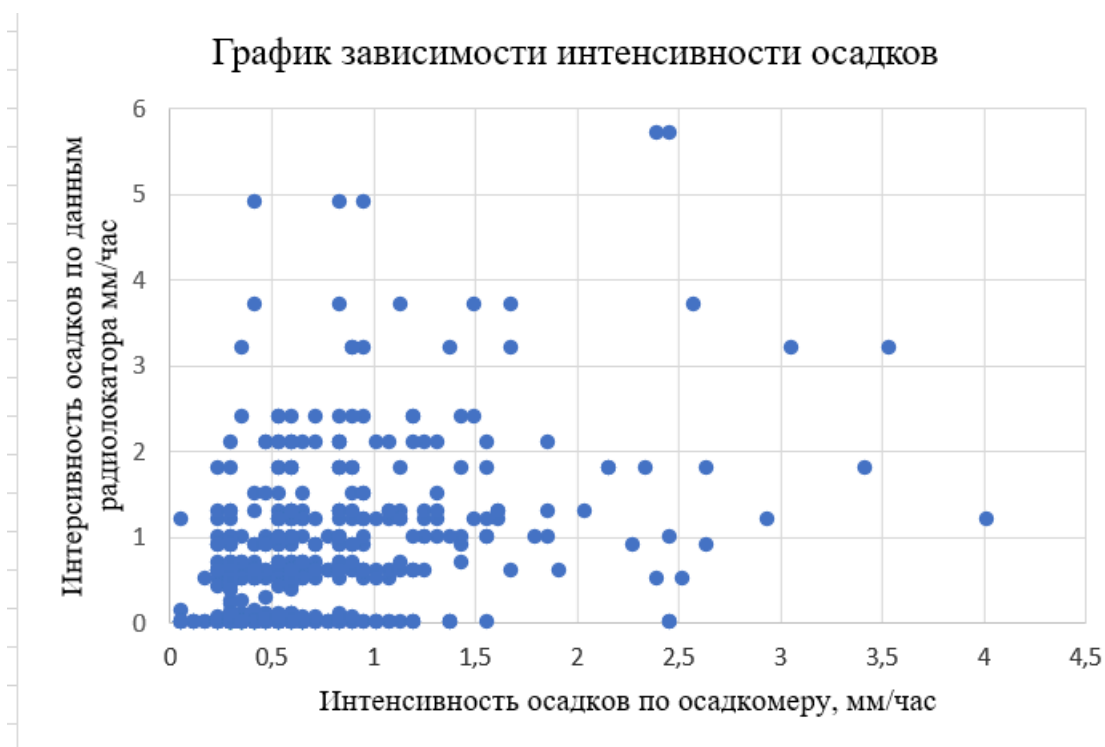


Рисунок 15 – График зависимости количества осадков и интенсивности осадков за январь 2015 года для осадкомера 1002.

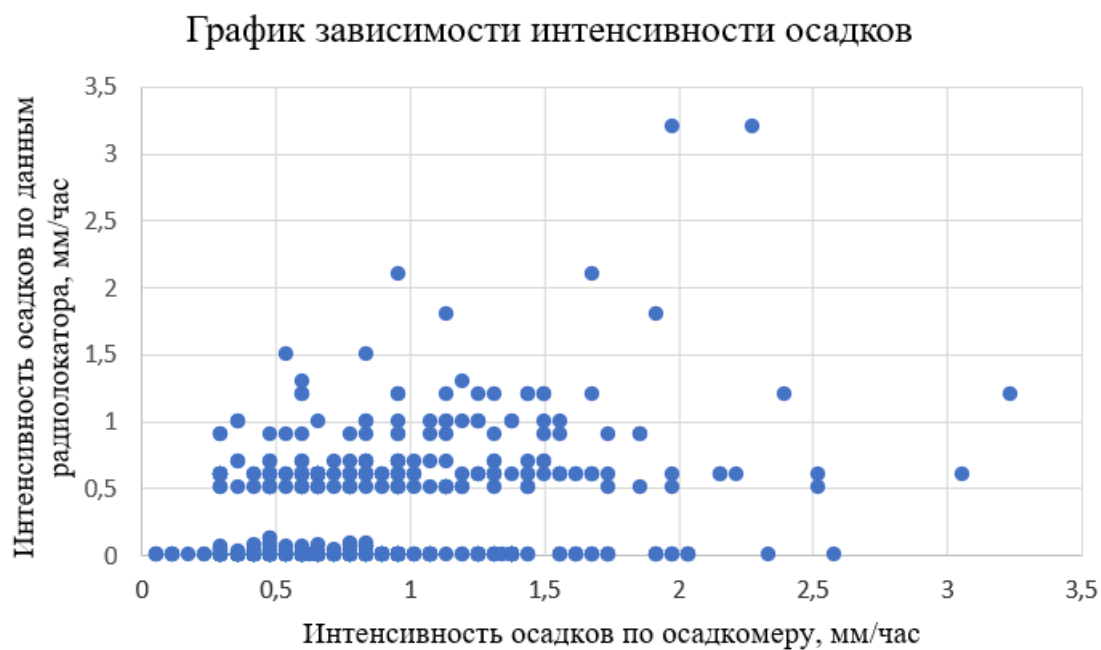


Рисунок 16 – График зависимости количества осадков и интенсивности осадков за январь 2015 года для осадкомера 1006.

На рис. 15 видно, что данные на графике расположены не подчиняются линейной зависимости, большая их часть располагается вдоль осей абсцисс и ординат. Такое распределение может свидетельствовать об ошибках при снятии данных с осадкомера и радиолокатора.

На рис. 16 часть данных «прибита» к оси абсцисс. Это говорит об ошибке снятия данных с осадкомера. Одной из таких ошибок может быть ветровая ошибка. Осадкомер Pluvio² 200 работает по весовому принципу. При сильном ветре он может выдавать значения при отсутствии осадков. Также немаловажной ошибкой может быть неверный расчет радиолокатора. В момент осадков, зарегистрированных осадкомером, радиолокатор не регистрирует данные об интенсивности и отражаемости.

4.6. Нахождение коэффициентов A и b

Из уравнения Маршалла-Пальмера я вывела уравнения для нахождения коэффициентов A и b:

Первоначальное уравнение Маршалла-Пальмера:

$$Z = A I^b$$

где Z – радиолокационная отражаемость, мм⁶/м³;

A – коэффициент A;

I – интенсивность осадков, мм/ч;

b – коэффициент b;

Преобразовала уравнение:

$$I^b = \frac{Z}{A}$$

Из уравнения выше выразила интенсивность осадков I:

$$I = \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{b}}$$

Т.к. в уравнение две неизвестных, составила систему уравнений для их нахождения. Для этого ввела I_1 и Z_1 как интенсивность осадков и радиолокационную отражаемость в 1 момент времени, I_2 и Z_2 – интенсивность осадков и радиолокационная отражаемость во 2 момент времени:

$$\begin{cases} I_1 = Z_1^{\frac{1}{b}} \times \left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{b}} \\ I_2 = Z_2^{\frac{1}{b}} \times \left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{b}} \end{cases}$$

Где I_1 – интенсивность осадков в 1 момент времени, мм/ч;

I_2 – интенсивность осадков во 2 момент времени, мм/ч;

Z_1 – радиолокационная отражаемость в 1 момент времени, мм⁶/м³;

Z_2 – радиолокационная отражаемость во 2 момент времени, мм⁶/м³;

Разделила уравнение на $Z_1^{\frac{1}{b}}$ и $Z_2^{\frac{1}{b}}$ соответственно:

$$\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{b}} = \frac{I_1}{Z_1^{\frac{1}{b}}}$$

В результате получила два уравнения с одинаковыми левыми частями:

$$\frac{1}{A} = \frac{I_1^b}{Z_1} \quad \frac{1}{A} = \frac{I_2^b}{Z_2}$$

Приравняла левые части уравнений:

$$\frac{I_1^b}{Z_1} = \frac{I_2^b}{Z_2}$$

По свойству отношений поменяла нижнюю часть первой дроби и верхнюю часть второй дроби. Поскольку и числитель, и знаменатель находятся в одинаковой степени, объединила их под общую степень:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^b = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Из уравнения выше выразила коэффициент b:

$$b = \log_{\frac{I_1}{I_2}} \frac{Z_1}{Z_2}$$

Подставила выражение для нахождения коэффициента b в 3 уравнение и выразила уравнение для коэффициента A

$$A = \frac{Z_1}{I_1^b}$$

Далее из массива данных я выбирала периоды снегопада. Снегопад – временной отрезок, в котором осадки выпадали каждые 5 минут на протяжении не менее получаса.

дата	время	осадки
01.01.2015	19:20:00	0,09
01.01.2015	19:25:00	0,1
03.01.1900	19:30:00	0,06
01.01.2015	19:35:00	0,08
01.01.2015	19:40:00	0,04
01.01.2015	20:00:00	0,09
01.01.2015	20:05:00	0,16
01.01.2015	20:10:00	0,16
01.01.2015	20:15:00	0,25
01.01.2015	20:20:00	0,21
01.01.2015	20:25:00	0,2
01.01.2015	20:30:00	0,21
01.01.2015	20:35:00	0,21
01.01.2015	20:40:00	0,15
01.01.2015	20:45:00	0,11
01.01.2015	20:55:00	0,08
01.01.2015	21:50:00	0,08
01.01.2015	22:25:00	0,08
01.01.2015	22:55:00	0,09
01.01.2015	23:05:00	0,05
01.01.2015	23:20:00	0,08
01.01.2015	23:25:00	0,05
02.01.2015	4:10:00	0,08
02.01.2015	5:10:00	0,09
02.01.2015	5:50:00	0,08
02.01.2015	9:45:00	0,08
02.01.2015	9:50:00	0,1

Рисунок 17 – Пример периода снегопада за январь 2015 года для осадкомера 1010.

Рассчитывая для таких периодов для всего массива данных, я получила коэффициенты A и b для каждого снегопада.



Рисунок 18 - График расчета коэффициентов А и b за снегопад с 23:45

1 февраля 2015 года по 13:25 2 февраля 2015 года для 1005 осадкомера.

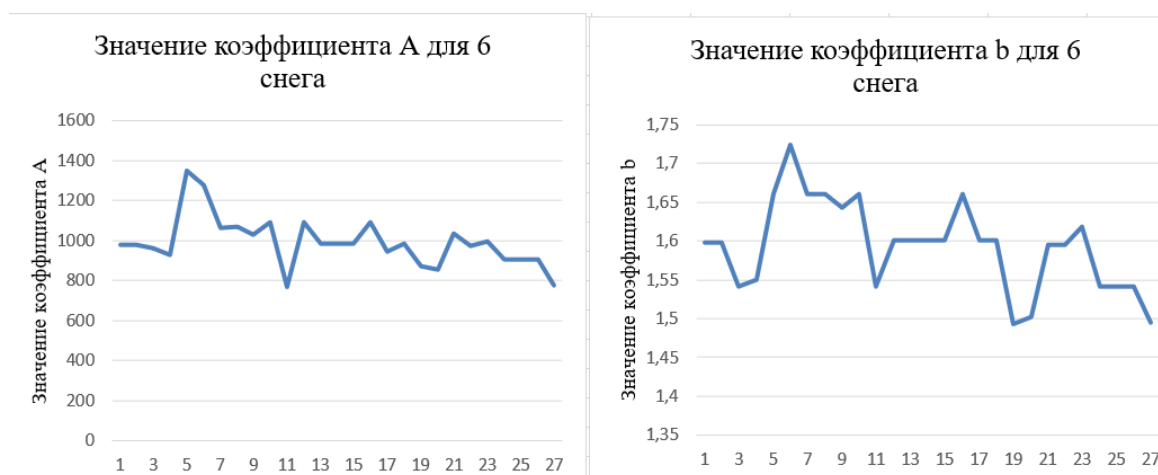


Рисунок 19 - График расчета коэффициентов А и b за снегопад с 08:25

16 декабря 2015 года по 13:45 16 декабря 2015 года для 1012 осадкомера.

На рис. 18 среднее значение коэффициента А составляет 50, также происходят выбросы до значений 350. Значение коэффициента b лежит в диапазоне от 0,1 до -0,7.

Такие погрешности могут вызваны некорректной установкой осадкомеров Водоканала, либо прохождением циклона вблизи Санкт-Петербурга.

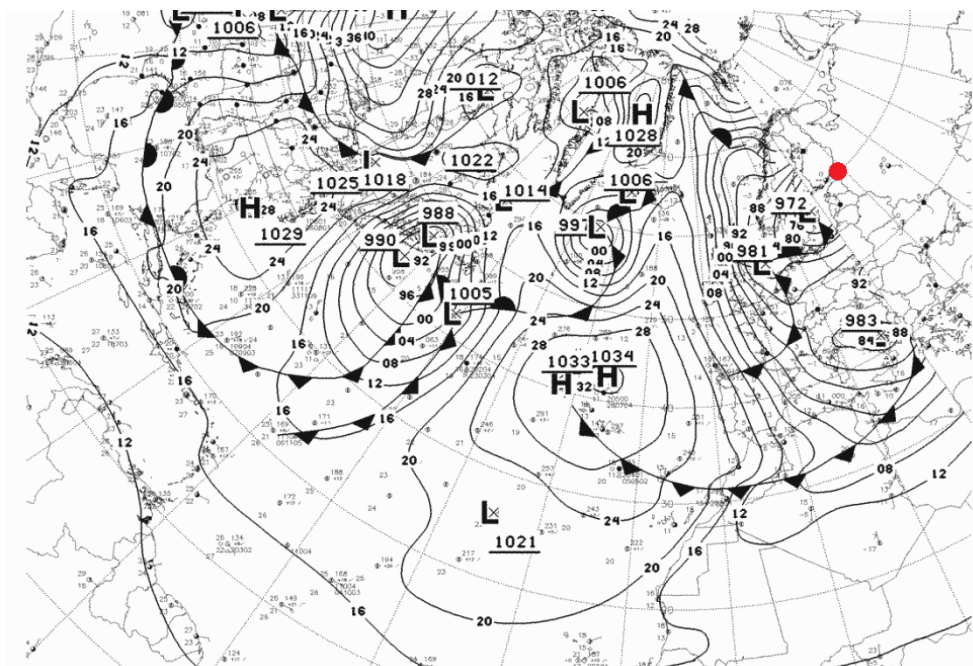


Рисунок 20 – Архив погоды за 1 февраля 2015 года (красным цветом отмечен Санкт-Петербург).

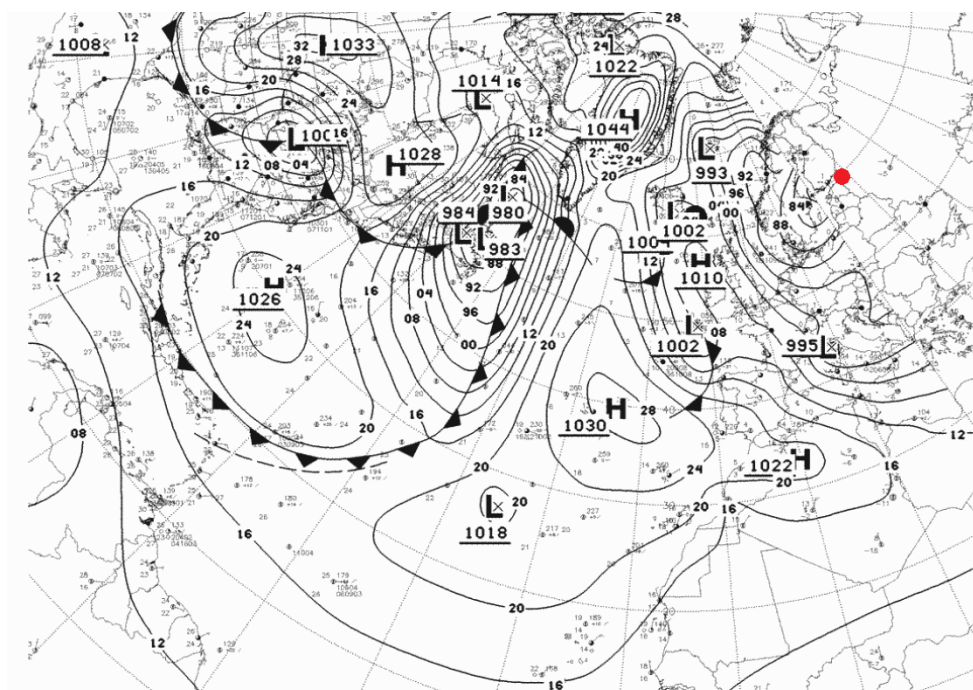


Рисунок 21 – Архив погоды за 2 февраля 2015 года (красным цветом отмечен Санкт-Петербург).

На рис. 20 и рис. 21 представлена карта архива погоды с немецкого сайта www.wetterzentrale.de. По данным картам видно, что за момент 1 и 2 февраля

2015 года, город Санкт-Петербург находился вблизи центра циклона. Такая метеорологическая ситуация могла выдать ошибки измерений данных радиолокатора, что в итоге повлияло на расчет коэффициентов и выдало аномальные значения.

На рис. 19 видно, что значения коэффициента A варьируется в пределах 800-1200, коэффициента b – 1,5-1,7, что близко к значениям коэффициентов, заложенных на данный момент в АМРК «Метеор-Метеоячейка».

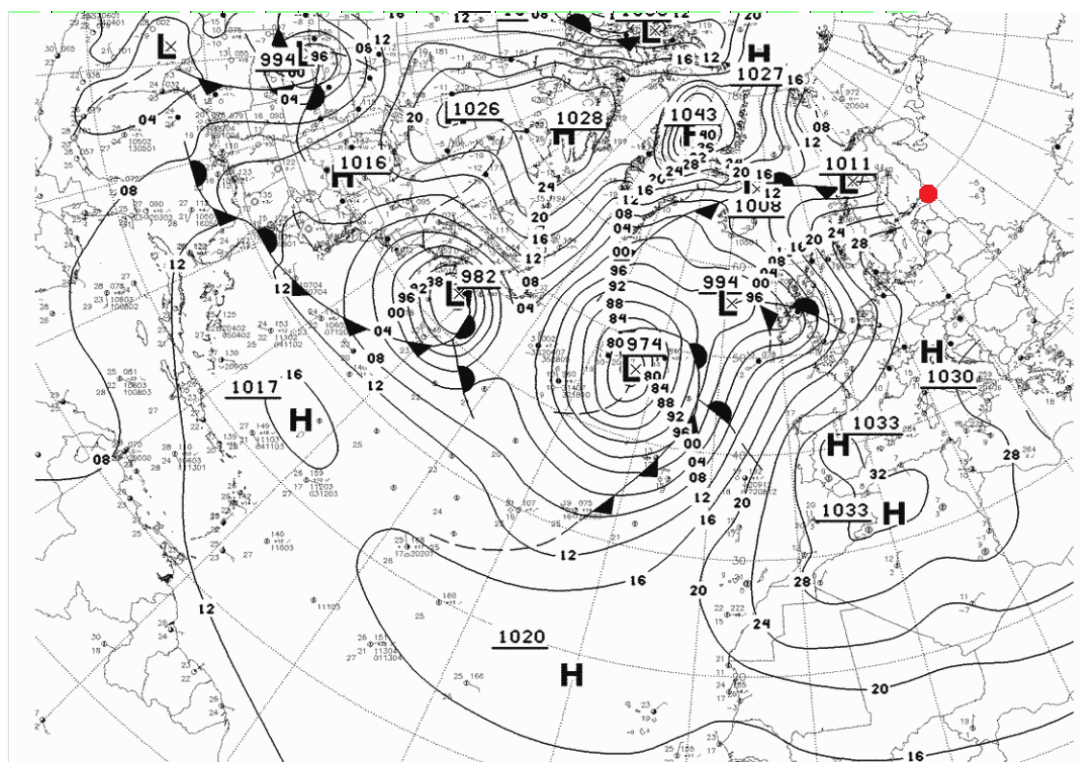


Рисунок 22 – Архив погоды за 16 декабря 2015 года (красным цветом отмечен Санкт-Петербург).

На рис. 22 представлена карта архива погоды с немецкого сайта www.wetterzentrale.de. По данным картам видно, что за момент 16 декабря 2015 года город Санкт-Петербург находился в районе гребня антициклона. При такой метеорологической обстановке осадкомер и радиолокатор корректно сняли измерения, что способствовало правильным расчетам коэффициентов A и b .

Рассчитав таким образом коэффициенты A и b за все снегопады каждого месяца каждого осадкомера, высчитала среднее значение коэффициентов для каждого месяца каждого осадкомера.

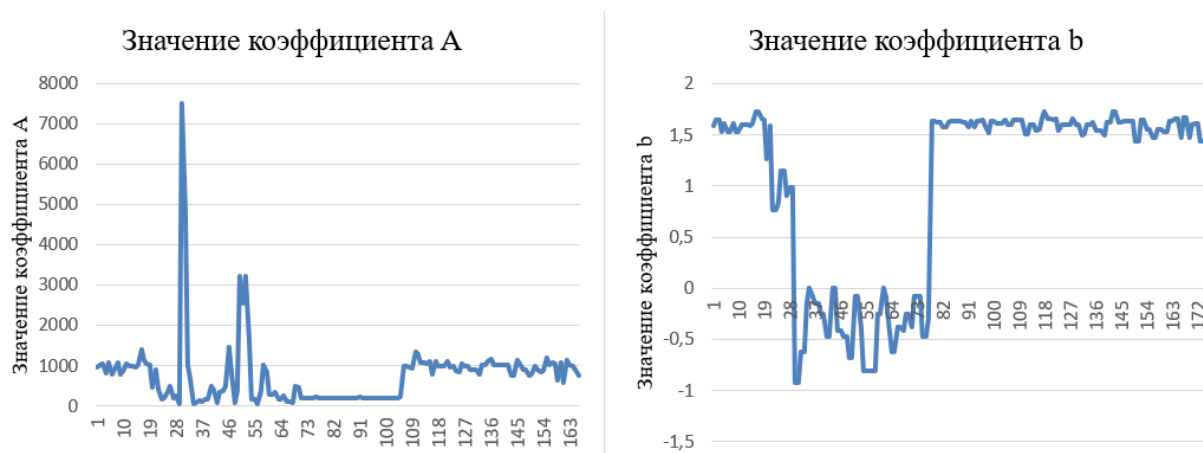


Рисунок 23 – График значений коэффициентов A и b за декабрь 2015 года для осадкомера 1012.

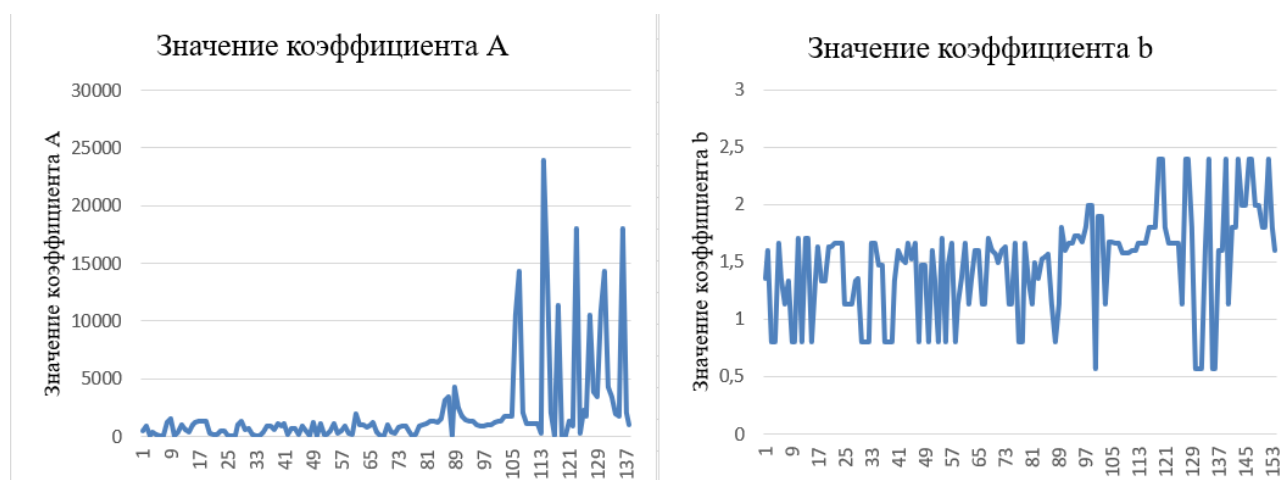


Рисунок 24 – График значений коэффициентов A и b за февраль 2015 года для осадкомера 1003.

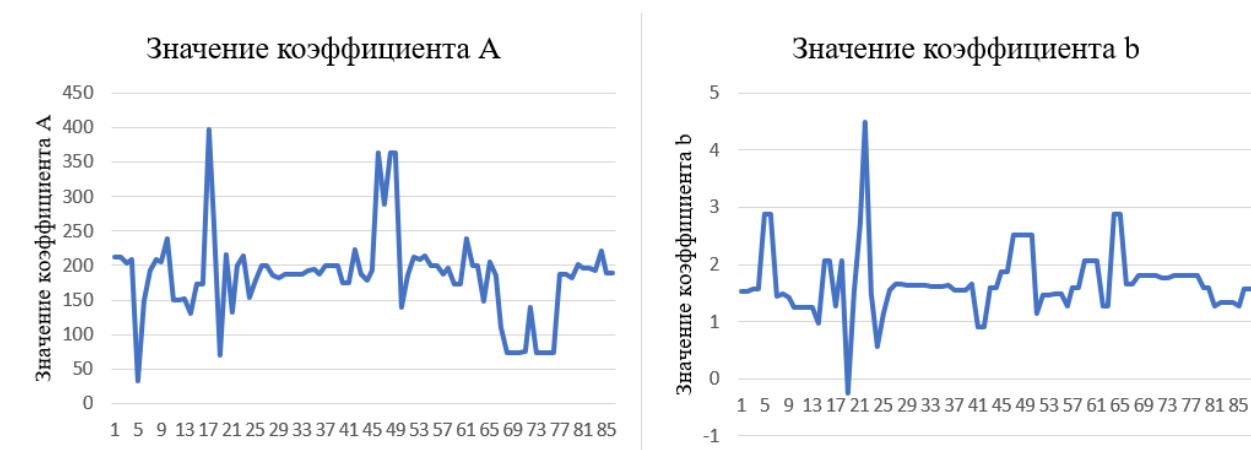


Рисунок 25 – График значений коэффициентов А и b за январь 2015 года для осадкомера 1009.

Основывая на рис. 23, 24 и 25 можно сделать вывод, что по моим расчетам коэффициент b получается приближенным, к коэффициенту b, заложенному в АМРК «Метеор-Метеоячейка». Значения коэффициента А сильно разнятся. Некоторые значения коэффициента А могут доходить до 25000. Такие выбросы могут возникать вследствие некорректного измерения данных осадкомером. Также такие погрешности могут быть вызваны некорректными измерениями данных радиолокатором.

Далее я рассчитала средние коэффициенты А и b для каждого осадкомера за все месяца.

Таблица 5. Средние значения коэффициентов А и b

Кодовый номер осадкомера	Коэффициент А	Коэффициент b
Январь 2015 года		
1001	5564,1	0,709
1002	225,1	1,320
1003	1910,2	1,667
1004	2116,1	1,687
1005	347,4	1,603
1006	328,1	1,725
1007	433,6	1,688
1008	1612,3	1,527
1009	184,4	1,681
1010	3699,5	1,659
Февраль 2015 года		
1001	892,6	1,576
1002	2231,2	1,622
1003	1971,7	1,478
1004	1251,2	1,609
1005	944,9	0,921
1006	1135,6	1,505
1007	3104,9	1,619
1008	494,7	1,589
1009	2029,7	1,685
1010	199,9	0,99
Декабрь 2015 года		
1012	745,7	1,018

Среднее значение коэффициента А за все месяца получился 1496,3;

Среднее значение коэффициента b за все месяца получился 1,469.

Получив новые значения коэффициентов, я рассчитала зависимость радиолокационной отражаемости от интенсивности осадков.

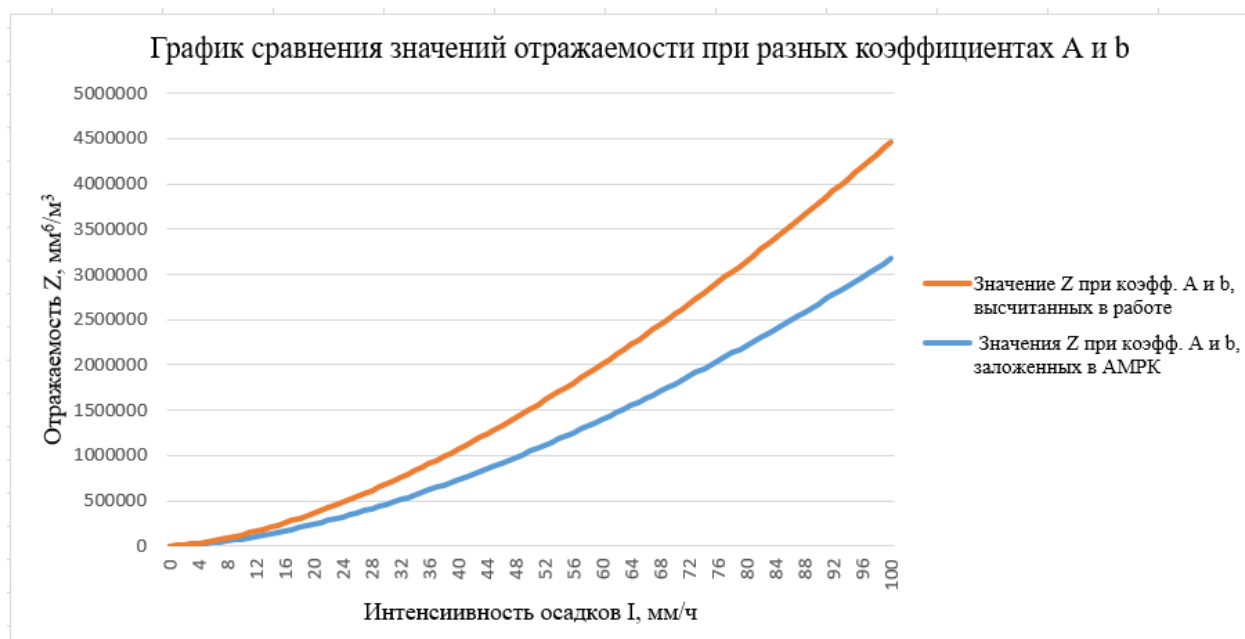


Рисунок 26 – График сравнения значений отражаемости при разных коэффициентах A и b.

На рис. 26 представлен график сравнения значений отражаемости при коэффициентах A и b, заложенных в АМРК «Метеор-Метеоячейка», и коэффициентах, рассчитанных в данной работе.

При одинаковых значениях отражаемости АМРК «Метеор-Метеоячейка» завышала значения интенсивности осадков. Такие данные нам показывают, что при завышенных значениях интенсивности осадков программа АМРК «Метеор-Метеоячейка» может выдавать некорректные значения выпавших осадков.

Для корректного получения данных можно изменить шаг измерения данных о радиолокационной отражаемости. Данные с радиолокатора можно получать как с ручного режима, так и с АМРК. В ручном режиме шаг измерения составляет 6 дБ, АМРК – 4 дБ.

$$6 \text{ дБ} = 3,9 \text{ мм}^6/\text{м}^3;$$

$$4 \text{ дБ} = 2,5 \text{ мм}^6/\text{м}^3;$$

Шаг измерения радиолокационной отражаемости в ручном режиме и с АМРК «Метеор-Метеочейка» превышает среднее значение погрешности δZ , которые я высчитала в п. 4.2 «Уравнение Маршалла-Пальмера».

Для того, чтобы шаг не превышал значения погрешности δZ , я рассчитала, подходят ли шаги в 1 дБ и 2 дБ для измерения.

$$1 \text{ дБ} = 1,25 \text{ мм}^6/\text{м}^3;$$

$$2 \text{ дБ} = 1,58 \text{ мм}^6/\text{м}^3;$$

Таким образом, для уменьшения погрешности измерений радиолокационной отражаемости, что в следствие влияет на завышенные значения интенсивности осадков, шаг измерения Z следует уменьшить до 1 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе я провела расчёты по нахождению коэффициента перехода от радиолокационной отражаемости к количеству выпавших осадков для доплеровского радиолокатора Meteor 50 в холодный период года.

В результате проведенной работы можно сделать выводы, что для получения значений радиолокационной отражаемости с точностью до 8% и менее, необходимо, чтобы коэффициент b и интенсивность осадков измерялись с точностью 0,005. Точность коэффициента A может составлять 0,5.

Рассчитывалось, что предложенная методика нахождения коэффициентов A и b может быть оперативно использована для пересчета коэффициентов в конкретном снегопаде, для более точного определения осадков. Но получилось, что мгновенные значения коэффициентов A и b сильно меняются, что не подходит для небольшого промежутка времени. Данная методика подходит для пересчетов коэффициентов для большого промежутка времени.

Коэффициенты A и b , которые были рассчитаны в данной работе, получились меньше заложенных в АМРК «Метеор-Метеоячейка». По моим предположениям, АМРК на данный момент завышает значения интенсивности осадков. Следовательно, программа, завышая значения интенсивности осадков, выдает ошибочные данные о количестве осадков, выпавших за установленный промежуток времени.

Список литературы

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная Геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» (ФБГУ «ГГО»). «Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета» в целях штормооповещения и метеобеспечения авиации. Санкт-Петербург, 2013, 137с.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Ленинград.: Гидрометеиздат, 1988, 512 с.
3. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993, 356с.
4. Боровиков А. М. и др. Радиолокационные измерения осадков. Ленинград, Гидрометеиздат, 1967. 140 с.
5. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). «Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике». Москва, 2019, 129 с.
6. Dr. Monika Pfeifer. Selex System Integration GmbH, Company Presentation. 55 с.
7. Atmospheric Measurement Techniques. The NCAS Mobile Dual-Polarisation Doppler X-Band Weather Radar (NXPol). 2018, 28 с.
8. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. Ленинград, Гидрометеиздат, 1974. 329 с.

9. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Свидетельство об утверждении типа средств измерений DE.C.27.010.A №34342/1 от 27.12.2013.

10. Рисунок 1. Доплеровский метеорологический радиолокатор

[Доплеровский метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С» \(lemz.ru\)](http://lemz.ru)

11. Рисунок 2. Упрощенная структурная схема ДМРЛ

[4.7.2. Структура первичной рлс \(studfile.net\)](http://studfile.net)

12. Рисунок 3. Доплеровский радиолокатор Meteor 50, мобильная версия

[Index of /wp-content/uploads/2015/01/ \(indomiliter.com\)](http://indomiliter.com/wp-content/uploads/2015/01/)