

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова

УДК 551.501.815:551.577.2

На правах рукописи

Попов Виктор Борисович

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ОСАДКОВ ПО НАЗЕМНЫМ И  
РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук  
Тарабукин Иван Алексеевич

Санкт-Петербург – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Атмосферные осадки, методы их измерения и оценки, методы восстановления поля осадков.....	11
1.1 Атмосферные осадки .....	11
1.2 Особенности измерения осадков при помощи стационарных наблюдений .	14
1.3 Особенности измерения осадков с применением радиолокатора .....	15
1.4 Методы восстановления полей осадков, основанные на комбинировании радиолокационных и наземных измерений.....	24
Глава 2. Район исследования и исходные данные .....	33
2.1 Краткая физико-географическая и климатическая характеристика Санкт-Петербурга и пригородов .....	33
2.2 Сеть наземных плювиографов АИС «Осадки».....	35
2.3 Метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С» .....	37
2.4 Исходных данные и их предварительная обработка .....	40
Глава 3. Восстановление полей осадков по данным АИС «Осадки» и «ДМРЛ-С»....	45
3.1 Оценка качества восстановления полей осадков .....	45
3.2 Восстановление полей количества осадков по данным «ДМРЛ-С» .....	46
3.3 Анализ пространственной структуры количества осадков.....	51
3.4 Методы пространственной интерполяции.....	56
3.5 Восстановление полей количества осадков по данным плювиографов....	61
3.6 Анализ пространственной структуры невязки радиолокационных и стационарных оценок осадков.....	64
3.7 Восстановление полей количества осадков комбинированным методом.	66

Глава 4. Сравнительный анализ методов.....	68
4.1 Сравнение статистических характеристик методов восстановления поля количества осадков .....	68
4.2 Анализ отдельных случаев.....	74
Глава 5. Исследование поля осадков на территории Санкт-Петербурга .....	89
5.1 Характеристики пятен осадков.....	89
5.2 Характеристики осадков при слиянии облаков .....	92
Заключение .....	103
Список сокращений и условных обозначений .....	106
Список используемых источников .....	108
Приложение А .....	121
Приложение Б .....	123
Приложение В.....	127

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Сфера применения данных о пространственной структуре атмосферных осадков чрезвычайно широка. В первую очередь это расчеты, связанные с проектированием и работой городских канализационных сетей, водно-дорожных линий, плотин, разного рода дамб и перекрытий. Решение целого ряда гидрологических и сельскохозяйственных задач, в частности, расчет стока и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, исследования влияния осадков на эрозию почв, на различные промышленные и технические сооружения также существенно зависят от информации о поле количества осадков. Данные о пространственной структуре осадков применяются в авиационной метеорологии, например, для оценки дальности видимости посадочных огней и вероятности встречи самолетов с сильным дождем. Исследование данной метеорологической характеристики актуально ещё потому, что на европейской территории России существует восходящий тренд годовых сумм жидких осадков. Согласно [11], с 1936 по 2010 годовые суммы жидких осадков на данной территории увеличились на 14%.

Хотя сведения об осадках нужны во многих отраслях экономики, в настоящее время существует крайне мало оперативно-действующих схем расчета полей количества осадков, особенно с высоким пространственно-временным разрешением. Это связано прежде всего с тем, что количество осадков является очень изменчивой в пространстве и времени метеорологической характеристикой.

С целью повышения точности определения количества атмосферных осадков, выпавших на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» была создана сеть наземных пювигрофов АИС «Осадки». Сеть включает в себя 34 датчика атмосферных осадков OTT Pluvio<sup>2</sup> 200. От каждого датчика поступает информация о накопленном количестве выпавших атмосферных осадков раз в пять минут в оперативном режиме.

Ещё одним средством получения данных об атмосферных осадках является метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С», расположенный в 10 км от Санкт-Петербурга.

Наличие таких средств оценки характеристик осадков на одной территории позволяет провести исследование по комбинированию измерений двух источников для восстановления полей количества осадков в данном регионе с наименьшей погрешностью.

**Целью** диссертационной работы является повышение качества восстановления полей характеристик осадков за счет объединения радиолокационных данных и измерений плювиографов с высоким пространственно-временным разрешением.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Сравнить существующие методы восстановления полей количества осадков, на основе комбинирования радиолокационных и наземных измерений.
2. Подобрать оптимальные параметры восстановления полей количества осадков тремя методами: только по данным плювиографов, по радиолокационным измерениям и с помощью комбинирования данных этих источников.
3. Провести сравнительный анализ и апробацию полей количества осадков, восстановленных тремя методами: только по данным датчиков осадков, по радиолокационным измерениям и с помощью комбинирования данных этих источников.
4. Использовать метод комбинирования радиолокационных и наземных измерений для исследования пространственного распределения характеристик осадков на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые проанализирована пространственная структура количества осадков за час и невязок стационарных и радиолокационных измерений для

территории СПб и ближайших пригородов. Показана статистическая неоднородность этих характеристик и получены радиусы корреляции.

2. Впервые для территории СПб и ближайших пригородов был адаптирован метод восстановления полей количества часовых осадков с высоким пространственным разрешением на основе интерполяции невязки (разницы между радиолокационными и стационарными измерениями). Показаны преимущества и недостатки данного метода по сравнению с методом интерполяции осадков и радиолокационным методом.

3. Впервые проведено исследование пятен количества конвективных осадков, выпавших за час на территории СПб и ближайших пригородов. Результаты анализа показали, что на основе только данных относительно густой сети АИС «Осадки» удастся обнаружить лишь меньшую часть всех пятен.

4. Разработана новая методика восстановления полей интенсивности осадков на основе динамического подбора коэффициентов уравнения Маршалла-Пальмера. С помощью этой методики удалось определить изменение максимальной интенсивности и потока осадков при слиянии конвективных облаков для территории СПб и ближайших пригородов.

#### **Теоретическая значимость:**

1. Проведенное исследование позволяет более полно использовать радиолокационные и наземные наблюдения для оценки характеристик атмосферных осадков с высоким временным и пространственным разрешением.

2. Разработанная методика восстановления полей интенсивности осадков может быть использована для исследования развития облаков и процессов осадкообразования.

#### **Практическая значимость:**

Адаптивный метод интерполяции невязки может быть использован в оперативной практике для оптимизации работы инфраструктуры Санкт-Петербурга.

В первую очередь, это относится к системам водоотведения и автодорожным службам. А также, восстановленные поля количества осадков могут быть использованы в задачах краткосрочного прогноза погоды.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа пространственной структуры количества осадков за час и невязки (разницы между часовыми суммами радиолокационных и стационарных осадков).

2. Выбор коэффициентов уравнения Маршалла–Пальмера для восстановления полей количества осадков радиолокационным методом. Выбор метода и подбор параметров пространственной интерполяции количества осадков для сети АИС «Осадки». Выбор метода и подбор параметров пространственной интерполяции невязки количества осадков между данными «ДМРЛ-С» и сети АИС «Осадки».

3. Результаты сравнения метода комбинирования данных «ДМРЛ-С» и АИС «Осадки» с радиолокационным методом и методом пространственной интерполяции количества осадков.

4. Результаты анализа распределений площади и потока пятен количества осадков конвективного характера.

5. Методика оценки полей интенсивности осадков на основе подбора коэффициентов уравнения Маршалла–Пальмера по радиолокационным и наземным измерениям. Результаты применения данной методики при исследовании слияния мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков.

**Обоснованность и достоверность результатов** обеспечивается всесторонним анализом предшествующих научных работ в области комбинирования радиолокационных и наземных измерений, корректностью постановки научной задачи исследования, оценкой качества восстановленных полей апробированным методом перекрестной проверки, корректным использованием радиолокационных и

наземных данных для формирования исходной выборки, а также тем, что полученные результаты согласуются с результатами других независимых исследований по данной тематике.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в подготовке и обработке исходных материалов, адаптации и разработке методик, анализе и обобщении полученных результатов, создании программного обеспечения и базы данных.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались:

- на рабочем совещании ФГБУ «ЦАО», посвящённом развитию единой радиолокационной сети Росгидромета в 2016 году;
- на итоговой сессии ученого совета ФГБУ «ГГО» в 2017 году;
- на семинарах аспирантуры ФГБУ «ГГО» (2015-2018 гг.).

Также, на основе материалов диссертации автор стал победителем двух грантов Правительства Санкт-Петербурга для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, в 2016 и 2017 годах.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 научные работы в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, а также приравняемые к публикациям 3 авторских свидетельства: одно на базу данных и два на программы для ЭВМ. Кроме того, материалы диссертации были использованы в 5 производственно-технических документах.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований:

1. Дорوفеев Е.В, Львова М.В., Попов В.Б., Тарабукин И.А. Использование сопоставления метеорологических радиолокационных данных с целью относительной калибровки метеорологических радиолокаторов. - Труды ГГО, 2014, вып. 572, г. с. 153—161.



2. Попов В.Б., Синькевич А.А. Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России. — Труды ГГО, 2017, вып. 585, с. 39—55.

3. Синькевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А. и др. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков. — Метеорология и гидрология, 2018, № 8, с. 19—32.

Авторские свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности:

1. Программа для ЭВМ «СПО ПАС «Метеонаблюдатель». Номер регистрации (свидетельства): 2013619335 от 20.12.13.

2. Программа для ЭВМ «Временной ход радиолокационной отражаемости и интенсивности осадков» Номер регистрации (свидетельства): 2015660235 от 20.10.15.

3. База данных «Атмосферные осадки». Номер регистрации (свидетельства): 2015621482 от 20.10.15.

Производственно-техническая документация:

1. Производство метеорологических радиолокационных наблюдений с применением ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормооповещения и метеообеспечения авиации. Методическое письмо. — СПб: ООО «Д' АРТ», 2014, 177 с.

2. Методическое письмо об итогах работы в 2013 году функционирующей сети «МРЛ-Штормооповещения» и сети «ДМРЛ-С», создаваемой в рамках ФЦП. — СПб: «Моби Дик». 53 с.

3. Методическое письмо об итогах работы в 2014 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета. — СПб: ООО «Д' АРТ». 50 с.

4. Методическое письмо об итогах работы в 2015 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета. — СПб: ООО «Д' АРТ». 47 с.

5. Методическое письмо об итогах работы в 2016 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета. — СПб: ООО «Амирит». 48 с.

**Использование результатов диссертации.** Адаптивный метод восстановления полей количества осадков за час по измерениям АИС «Осадки» и «ДМРЛ-С» был внедрен в опытную эксплуатацию Гидрометцентра Санкт-Петербургского ЦГМС-Р.

Предложенная в диссертационной работе методика восстановления полей интенсивности осадков по измерениям АИС «Осадки» и «ДМРЛ-С» была использована при выполнении двух грантов: РФФИ-17-05-00965 Теоретические и экспериментальные исследования роли электрических сил в формировании опасных явлений в конвективных облаках (гроза, шквал, град, катастрофические ливни и др.); РФФИ-16-05-00197 Теоретические и экспериментальные исследования роли фидерных облаков в формировании динамических, микрофизических и электрических характеристик кучево-дождевых облаков и осадков из них. Результаты исследований отображены в монографии «Слияние конвективных облаков».

Использование результатов диссертации подтверждены соответствующими актами внедрения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников и трех приложений. Общий объем работы составляет 130 страниц, работа иллюстрирована 37 рисунками и 12 таблицами. Список используемых источников содержит 110 наименований.

# Глава 1. Атмосферные осадки, методы их измерения и оценки, методы восстановления поля осадков

## 1.1 Атмосферные осадки

Под атмосферными осадками в метеорологии понимают воду в жидком или твердом состоянии, выпадающую из облаков или осаждающуюся из воздуха на поверхность земли и на предметы. Количество атмосферных осадков характеризуется их суммой. Сумма осадков измеряется высотой слоя воды, который образовался бы на участке горизонтальной поверхности непосредственно или в результате таянья кристаллов льда при условии, что вода не стекает, не испаряется и не просачивается через поверхность. Интенсивность осадков – слой осадков, выпадающих за единицу времени, обычно за 1 мин [57].

Осадки могут выпадать из облаков (капли мороси и дождя, отдельные снежные кристаллы и их агрегаты, обзерненные снежные кристаллы, крупинки, ледяные капли и градины), а также выделяться непосредственно из воздуха (роса, иней, жидкий и твердый налет, изморозь). Данное исследование посвящено жидким осадкам из облаков, выпадающим в теплый период года (с мая по сентябрь).

Частицы атмосферных осадков формируются в облаках в результате действий нескольких основных процессов: конденсации и/или сублимации водяного пара, коагуляции частиц друг с другом, расщепления и дробления частиц, их таянья и замерзания [34].

В работе Орловой [37] осадки делятся по морфологическому признаку на три класса:

1. *Морозящие осадки* образуются в пограничном слое атмосферы от 1000 до 700 гПа при охлаждении воздуха. Интенсивность осадков, как правило, очень небольшая, чаще всего она колеблется в интервале 0,18–0,36 мм/ч. В период

значительной трансформации интенсивность морозящих осадков возрастает до 0,72–0,9 мм/ч.

2. Интенсивность *обложных осадков* определяется максимальным значением массовой доли влаги (удельной влажности) на уровне 1,5 км (850 гПа). Наибольшая интенсивность обложных осадков достигает значение 2,5 мм/ч. Обложные осадки связаны с прохождением обширных циклонов (радиусом 500–600 км) или медленно смещающихся фронтов, имеющих интенсивность, не превышающую 1–1,5 мм/ч. При небольших циклонах (радиусом 100–300 км) или быстро движущихся фронтах интенсивность обложных осадков составляет 1,5–2,5 мм/ч, а продолжительность 3–5 ч. Продолжительность обложных осадков 10–12 ч и более связана с прохождением обширных циклонов и медленно смещающихся фронтов.

3. *Ливневые осадки* образуются в кучево-дождевых облаках в конвективном слое от 5 до 10 км (летом). Вертикальная мощность самого кучево-дождевого облака примерно в 1,5 раза больше этого слоя. Поэтому высота столба воздуха, в котором формируется кучево-дождевое облако, может достигать 15–16 км. Средняя максимальная интенсивность ливневых осадков составляет примерно 4,8–6 мм/ч и более.

Интенсивность обложных и ливневых осадков связана с восходящими упорядоченными и конвективными движениями в атмосфере, интенсивность же морозящих осадков определяется изменением температуры воздуха вследствие его трансформации.

Алибегова [7] предложила для практических приложений несколько более подробную типизацию жидких осадков. В этой работе выделяются мелкокапельные обложные, крупнокапельные обложные и мелкокапельные ливневые осадки (таблица 1.1). При этом границу между последними двумя подтипами определяет отношение

продолжительности  $t$  осадков (дождя) большой интенсивности  $I_{max}$  (1,8–3 мм/ч) к общей продолжительности дождя  $T$ .

Таблица 1.1 – Классификация типов и подтипов жидких осадков по [7]

Тип осадков	Интенсивность, мм/ч	$t_{II}/T_{II}$
Морось	0,6	
Мелкокапельные обложные	0,6–1,2	
Крупнокапельные обложные	1,8; 2,4; 3	$t > T/10$
Мелкокапельные ливневые	1,8; 2,4; 3	$t < T/10$
Ливневые	>3	

Поле атмосферных осадков – это участки подстилающей поверхности, увлажненные выпавшими за различные интервалы времени осадками. В каждой точке поле осадков характеризуется их суммой, которая обычно измеряется толщиной слоя воды в миллиметрах [34].

Облака, в которых зарождаются и растут частицы атмосферных осадков, неоднородны в пространстве и изменчивы во времени. Характерные размеры участков кучевых облаков с однородными свойствами имеют порядок нескольких десятков метров [32, 48, 58], а слоистых несколько сотен метров [30, 32]. Поэтому можно ожидать, что зоны осадков также не однородны в пространстве и изменчивы во времени, а характерные размеры участков однородности такие же, как и в облаках.

Специфические свойства полей жидких осадков (ярко выраженная пространственная и временная изменчивость, пятнистость и дискретность) делают задачу исследования этого явления очень сложной [7]. Известно, что геометрические характеристики полей жидких осадков разного происхождения различаются весьма сильно. Внутримассовые ливневые дожди, как правило, имеют ярко выраженную очаговую структуру и чаще всего выпадают на площадях в несколько десятков, а

иногда и сотен квадратных километров. Обложные осадки, связанные с фронтальными системами, охватывают площади в несколько десятков, а иногда и сотен квадратных километров. Однако большая пространственная неоднородность и пятнистость присуща и этому типу осадков. Правда, как установлено в [42] эта пятнистость имеет более закономерный, волнообразный характер.

В работе [12] исследовалась повторяемость случаев выпадения дождей с разной площадью на северо-западе европейской территории СССР. Полученные данные показывают, что ливни чаще всего (60%) охватывают площади не более 10000 км<sup>2</sup>. Реже всего (8%) на данной территории проходят крупномасштабные обложные дожди с площадью >40000 км<sup>2</sup>.

## **1.2 Особенности измерения осадков при помощи стационарных наблюдений**

Традиционным методом измерения осадков является использование осадкомеров, расположенных преимущественно на метеорологических станциях и гидрологических постах. Они собирают осадки, выпадающие на верхнюю, открытую поверхность сосуда. Количество накопленных осадков измеряется особым градуированным стаканом, который показывает толщину слоя выпавших осадков в миллиметрах.

Существуют и самопишущие приборы – пювниографы, непрерывно регистрирующие прирост количества осадков, а также суммарные дождемеры, приспособленные для накопления осадков в течение длительного времени.

Качество измерения осадков наземным методом достаточно высокое. Так, по исследованиям американских ученых [106] при толщине слоя осадков в 25 мм относительная погрешность измерения составляет 5%, при слабых осадках – менее 3 мм – 12%, а в среднем оценивается в 9%. Для сравнения, ошибка измерения осадков радиолокационными методами колеблется от 25 до 100% [66, 106].

При всех своих преимуществах осадкомерный способ имеет и свои недостатки. Среди них:

1. Осадкомер не является в полной мере репрезентативным даже на небольшой территории в силу того, что площадь сечения осадкомерного сосуда на несколько порядков меньше, чем расстояние между приборами. Таким образом, чтобы не пропустить через сеть осадкомеров ни одного дождя, особенно в теплый период года, в условиях конвекции, необходима очень большая плотность сети. Например, американские ученые [106] выяснили, что для надежного обнаружения (более 90%) дождей с количеством осадков более 13 мм необходима плотность сети 1 осадкомер на  $570 \text{ км}^2$ , а при слабых осадках 0,25–1,3 мм сеть должна уже иметь разрешение 1 осадкомер на  $65 \text{ км}^2$ .

2. Организация, построение и эксплуатация густой сети осадкомеров является весьма дорогостоящим мероприятием. Для ее поддержания необходим либо большой штат наблюдателей, либо совершенное автоматизированное оборудование. В связи с этим использование сети необходимой густоты возможно лишь на небольших территориях для проведения научных экспериментов и обеспечения особо важных локализованных объектов (как, например, водозабор, канализация, водопровод, метрополитен и другие коммуникации больших городов).

3. При достаточно высокой точности измерений в точке, в целом осадкомерная сеть мало пригодна для высококачественного воспроизведения тонкой структуры поля конвективных осадков на относительно больших территориях.

### **1.3 Особенности измерения осадков с применением радиолокатора**

Радиолокация – область радиотехники, в которой излучение и отражение электромагнитных волн используется для обнаружения объектов (целей), а также для измерения их координат, параметров их движения, количественных характеристик и т. д. [43]. В метеорологической радиолокации объектами радиолокационного

зондирования являются метеоцели, в частности, взвешенные и падающие в атмосфере капли и кристаллы воды.

Радиолокационный метод имеет ряд практических ограничений применения, в частности, точность оценки интенсивности осадков не велика. Однако этот метод имеет ряд очевидных преимуществ, обусловленных возможностью обследования обширных площадей и проведения нескольких миллионов измерений в минуту [22]. Форнесиро и др. [75] утверждают, что «метеорологические радиолокационные наблюдения в настоящее время являются самым надежным методом дистанционного зондирования осадков».

Ниже приводится краткая информация о процессе оценки распределения капель по размеру по данным радиолокационных измерений. Особое внимание уделяется нахождению интенсивности осадков. Более полная информация можно найти в монографиях, посвящённых радиолокационной метеорологии [10, 13, 22, 40].

Основными элементами радиолокатора являются: антенна, приемник, передатчик, антенный переключатель и устройство, приводящее антенну в движение и определяющее направление визирования.

Метеорологический радиолокатор сканирует окружающую атмосферу с помощью вращения антенны относительно вертикальной оси, меняя азимут в то время, когда антенна постепенно меняет угол наклона по вертикали (угол места). Так, что выборка измерений сигнала, отраженного от атмосферного объема, осуществляется серией конусов. Типовая схема зондирования представлена на рисунке 1.1.



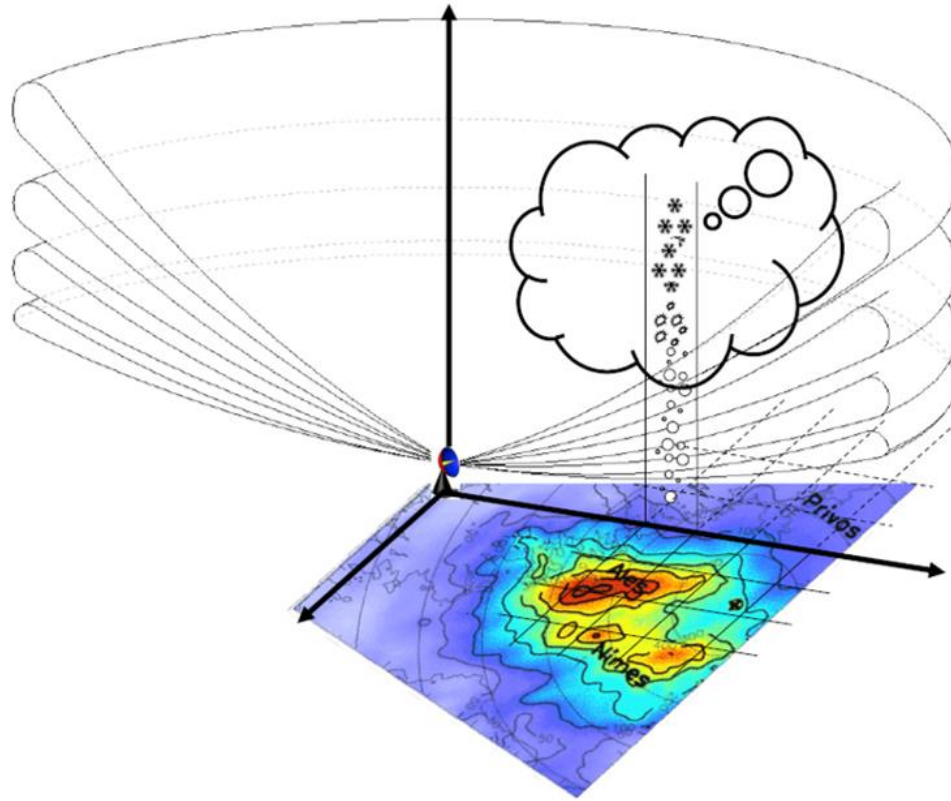


Рисунок 1.1 – Иллюстрация принципа радиолокационного зондирования атмосферы

Антенный переключатель подключает к антенне поочередно передатчик, затем приемник. Передатчик радиолокатора испускает электромагнитный импульс. Когда луч прерывается объектом (каплей), часть его энергии рассеивается во все стороны, в том числе и в направлении где находится антенна. Количество излучения, рассеянного от объекта и вернувшейся в приемник, зависит от мощности выходного излучения передатчика и физических свойствах метеоцели. "Размер" цели, которую "видит" радиолокатор называется эффективной площадью рассеивания, она отличается от площади сечения объекта. Эффективная площадь рассеивания капли воды,  $\sigma_b$ , в приближении к рэлеевскому рассеиванию находится по формуле:

$$\sigma_b = \frac{\pi^5 |K_w|^2 Z}{\lambda^4} \quad (1.1)$$

, где  $|K_w|$  – показатель преломления воды,  $Z$  – радиолокационная метеорологическая отражаемость и  $\lambda$  – длина волны излучения, формируемого радиолокатором.

Общепринято [10, 13, 22, 40, 70, 83], что радиолокационная оценка осадков может производиться путем измерения отражаемости  $Z$  этих осадков при минимальном угле места антенны (от приземного слоя до высоты нулевой изотермы). Отражаемость измеряется в  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ . Эта характеристика может меняться до шести порядков, поэтому, как правило, удобно выражать  $Z$  в дБ.

$$dBZ = 10 \log_{10} Z \quad (1.2)$$

Использование одной лишь отражаемости ещё не позволяет в действительности связать мощность отраженного сигнала с такими важными метеорологическими параметрами, как, например, интенсивность осадков или водность. Более важной характеристикой, которая должна быть известна, наряду с фазовым составом, является распределение частиц по размерам.

Наибольшее распространение в научной литературе по осадкам нашла функция распределения капель по размерам Маршалла–Пальмера [13]:

$$\begin{aligned} N(D) &= N_0 e^{-\Lambda D} \text{ при } D < 6 \text{ мм,} \\ N(D) &= 0 \text{ при } D > 6 \text{ мм,} \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $N(D)dD$  – число капель диаметром от  $D$  до  $D+dD$  в единичном объеме воздуха;  $N_0=0,06 \text{ см}^{-4}$  – нормировочный параметр,  $\Lambda$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – параметр, зависящий от интенсивности  $I$  ( $\text{мм/ч}$ ) осадков:

$$\Lambda = 41I^{0,21}. \quad (1.4)$$

Метеорологическая радиолокационная отражаемость выражается через распределение капель по размерам:

$$Z = \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D)D^6 dD, \quad (1.5)$$

где  $N(D)dD$  – число рассеивателей в интервале диаметром  $dD$  в единичном объеме,  $D_{min}$  и  $D_{max}$  – минимальный и максимальный диаметры капель в сканируемом объеме, соответственно.

Интенсивность осадков может быть рассчитана, на основе формулы:

$$I = \frac{\pi}{6} \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^3 v(D) dD, \quad (1.6)$$

где  $v(D)$  - предельная скорость капли в чистом воздухе.

Скорость  $v(D)$  как функция от диаметра может быть аппроксимирована по степенному закону  $v \approx D^\beta$ , где  $\beta \in 0,5-1$  в зависимости от размера капель [10]. В этом случае связь между  $Z$  и  $I$  можно представить в виде [5, 10, 18, 22, 36, 43]:

$$Z = A \cdot I^B \quad (1.7)$$

Представленная зависимость была получена с помощью микрофизических исследований распределения частиц осадков по размерам в городе Оттава(Канада) Маршаллом и Пальмером [88].

Авторами были получены коэффициенты  $A = 200$  и  $B = 1,6$ . Проведенные в разных районах земного шара проверки соотношения  $(Z-I)$  показали, что коэффициенты  $A$  и  $B$  изменяются в широких пределах и зависят от многочисленных факторов, и в первую очередь, от типа осадков и особенностей синоптических процессов в районе наблюдений.

Радиолокационные данные в плане оценки характеристик атмосферных осадков обладают следующими достоинствами:

1. Имеют большое пространственное разрешение. Современные ДМРЛ способны обеспечивать покрытие территории в радиусе до 100 км с разрешением 1x1 км. При среднем размере конвективной ячейки 3-10 км [7] можно гарантировать обнаружение практически всех очагов дождя в радиусе обзора.

2. Характеризуются высоким временным разрешением. Время сканирования территории составляет в среднем 5,8 минут. Это также имеет существенное значение, так как время жизни конвективной ячейки может составлять менее получаса, а изменчивость в процессе развития очень высока. При интенсивных процессах нет ни одного похожего кадра радиоэха при дискретности наблюдений в 10 минут.

С другой стороны, существует один серьезный недостаток радиолокационных изменений - низкая точность получаемых значений слоя осадков. Средний коэффициент корреляции между данными МРЛ и данными осадкомеров составляет в среднем 0,7 [66]. Средняя ошибка измерений при помощи МРЛ составляет 25-30%, но в отдельных случаях может достигать 100% и более [66, 106]. Можно назвать несколько причин такого рода несоответствия [10, 22, 40, 61, 71, 108]:

1. Недостаточно качественная калибровка локатора. Калибровка производится для исключения систематических ошибок в измерениях радиолокатора. Калибровка должна производиться путем сопоставления результатов зондирования МРЛ и густой осадкомерной сети, желательно в течение года. В нашей стране сегодня это практически невозможно. Поэтому калибровка производится по существующей в месте установки МРЛ сети метеорологических станций. В этом случае для достижения хороших результатов для всех сезонов может потребоваться несколько лет. В работе [23] показано, что недостаток калибровки радиолокатора может приводить к разнице оценки радиолокационной отражаемости между двумя локаторами более 4 dBZ.

2. Существенная неопределенность коэффициентов формулы для перевода отражаемости радиосигнала в интенсивность осадков. Недостаточное количество информации о распределении гидрометеоров по размерам не позволяет точно интерпретировать данные МРЛ. Поэтому для получения из радиоэха метеорологической информации об интенсивности осадков используется соотношение, полученное на основе эмпирического распределения капель по размерам Маршалла-Пальмера. Коэффициенты переводной формулы существенно изменяются от одного дождя к другому. Причем, как установлено Хафом [81], большей изменчивостью обладают внутримассовые осадки по сравнению с циклональными и фронтальными. Между тем, внутримассовые осадки летом

определяют до 30% и более случаев выпадающих дождей для территорий с континентальным климатом, который характерен для большей части России.

3. Высота радиолокационного луча над земной поверхностью,  $h$ , растет нелинейно из-за сферичности Земли и преломления радиоволн атмосферой (рефракции).

На рисунке 1.2 показано соотношение расстояния от МРЛ и высоты подъема луча на типовых углах места.

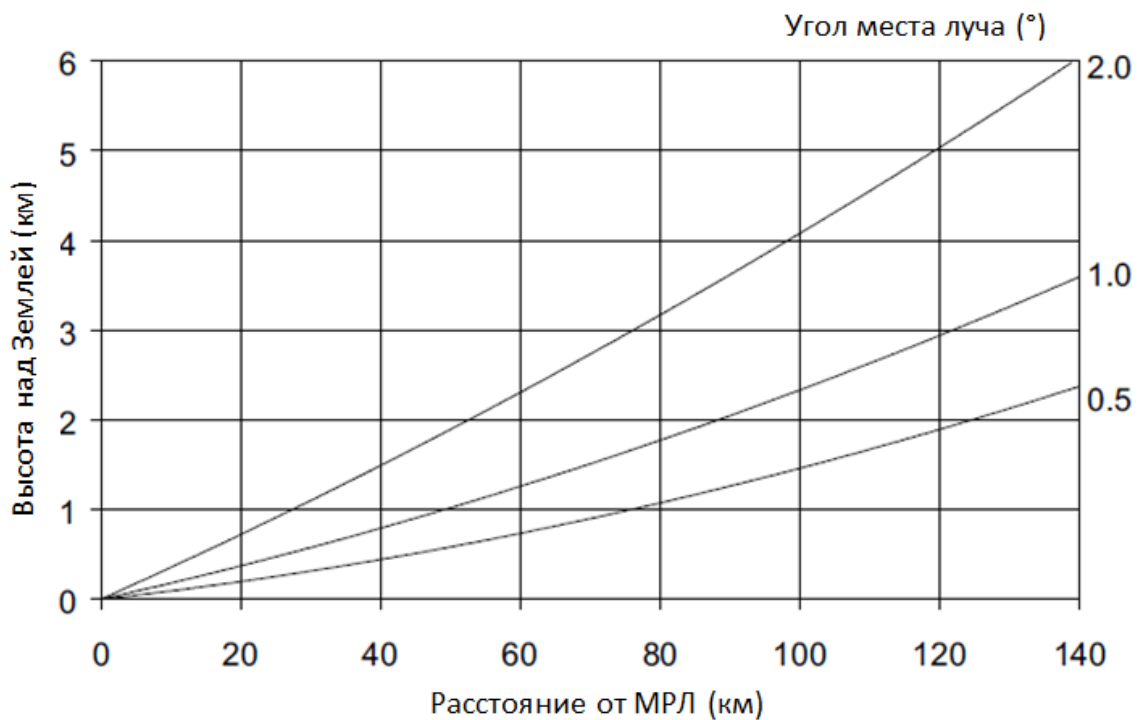


Рисунок 1.2 – Высота расположения радиолокационного луча в зависимости от расстояния до МРЛ и угла места

По рисунку 1.2 видно, что МРЛ оценивает интенсивность осадков по измерениям радиолокационной метеорологической отражаемости, находящейся на некотором возвышении от Земли, при этом для потребителя гидрометеорологической информации интересна интенсивность у поверхности Земли.

Изменчивость вертикального профиля осадков была определена в качестве основного источника ошибок с первых попыток использования метеорологической радиолокационной информации в гидрологии [79, 104] и не смотря на активное исследование до сих пор не решена полностью. Остин [62] выделяет шесть причин, по которым оценка интенсивности осадков по профилю высоты не может дать качественную оценку количества осадков в нижней точке:

- повышения интенсивности радиоэха из-за наличия «яркой полосы» (повышенная отражаемость при прохождении слоя таяния);
- мнимый рост интенсивности дождя, вызванный падением его сквозь туман или облачность низкого уровня, которые также имеют радиолокационную отражаемость;
- испарение капель, падающих через сухой воздух, расположенный под нижней границей облачности;
- изменчивость скорости падения капель дождя в связи с высотным изменением в атмосферном давлении;
- изменчивость скорости падения капель из-за восходящих и нисходящих потоков;
- изменчивость скорости падения капель из-за ветра.

4. Ошибки пространственной неопределенности. Наблюдаемая радиолокатором отражаемость усреднена по большому пространственному объему. Интенсивность радиолокационного луча имеет нормальное распределение [92], как показано на рисунке 1.3, которая симметрична во всех направлениях относительно оси луча.

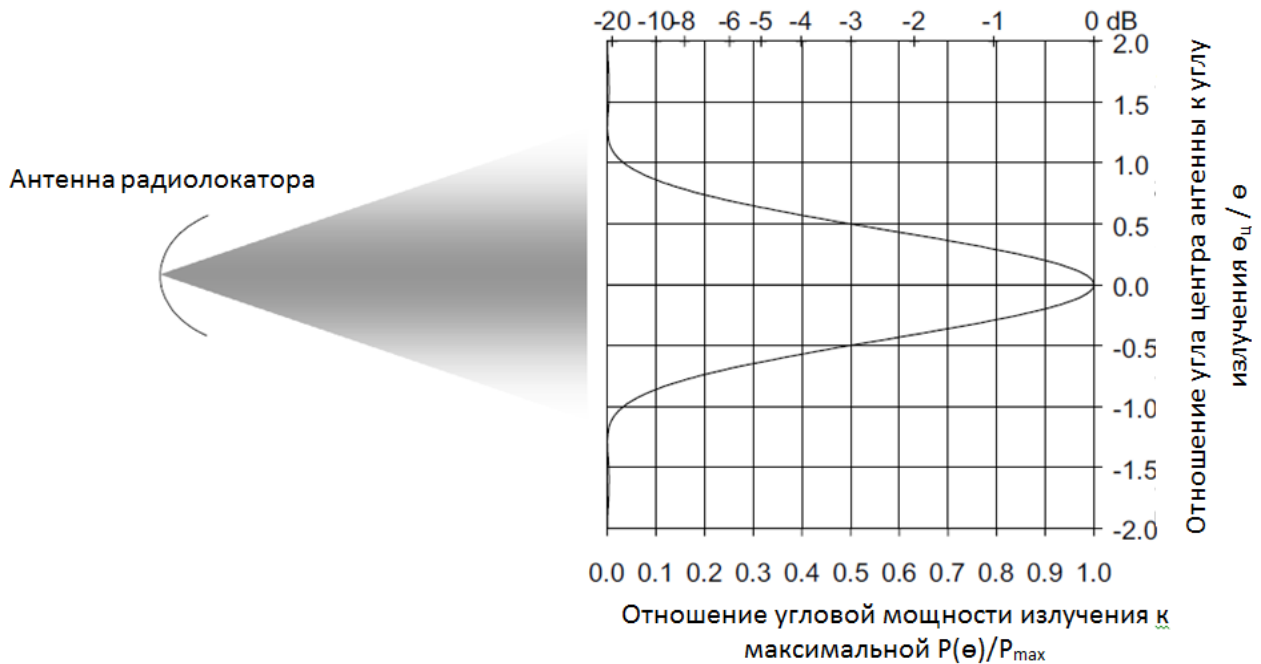


Рисунок 1.3 – Угловое распределение мощности для типичного радиолокационного излучения

Излучение радиолокатора имеет фиксированную угловую ширину диаграммы направленности (обычно,  $1^\circ$ – $2^\circ$ ). При этом с увеличением расстояния от радиолокатора увеличивается линейная ширина луча. В таблице 1.2 приведены значения линейной ширины луча при ширине диаграммы направленности  $1^\circ$ .

Таблица 1.2 – Изменение линейной ширины луча в пространстве в зависимости от расстояния для диаграммы направленности шириной  $1^\circ$  градус

Расстояние до объекта (км)	10	50	100	150	200	250	300	350
Линейная ширина луча (м)	174	870	1740	2610	3480	4350	5220	6090

Отраженный луч радиолокатора объединяет в себе мелкомасштабные особенности осадков и характеризует среднюю мгновенную отражаемость объема. При осреднении лучом добавляется ошибка измерения, вызванная процессами, происходящими на масштабах, меньших, чем объем сканирования в конкретной точке. Это пространственная погрешность выборки увеличивается с увеличением

дистанции от МРЛ до объекта. Соответственно увеличение погрешности на больших расстояниях от радара вызывает недооценку интенсивности осадков по вертикальному профилю.

5. Мощность радиолокационного излучения падает вследствие вибрации частиц в атмосфере и поглощения радиоволн молекулами воды. Чувствительность сигнала радиолокатора к затуханию зависит от длины волны излучения, интенсивности и характера осадков. Значительное ослабление может также иметь место, если РПУ теряет свои водоотталкивающие свойства и покрывается слоем воды во время дождя.

Ослабление является серьезной проблемой для радиолокаторов, передающих в X-диапазоне (длина волны 2,5–3,75 см), проблемой для радиолокаторов, передающих в C-диапазоне (длина волны 3,75–7,5 см) и не проблемой для радиолокаторов, передающих в S-диапазоне (длина волны 7,5–15 см).

#### **1.4 Методы восстановления полей осадков, основанные на комбинировании радиолокационных и наземных измерений.**

Давно известны главные отличительные особенности радарных и осадкомерных данных. Этими отличиями объясняются и основные ошибки отдельных «сенсоров». Осадкомеры могут давать точную информацию в довольно частой последовательности, но их плотность размещения недостаточна для анализа и прогноза конвективных ситуаций в атмосфере и редко может удовлетворять потребителя (раздел 1.2). В то же время радары дают информацию по большому пространственному объему, но сами оценки осадков сопряжены со значительными трудностями, приводящими зачастую к серьезным ошибкам (раздел 1.3).

Существуют ряд исследований по сопоставлению радиолокационных и стационарных данных об осадках. Коллер [69] утверждает, что необходима сеть с высокой плотностью датчиков дождя для достижения приемлемого качества сравнения с радиолокационными данными. Скиннер и др. [95] подчеркнули важность



сравнения оценок осадков чтобы определить систематические смещения в значениях радиолокационных осадков, прежде чем использовать их для любого гидрологического анализа. Борга и др. [65] указали, что оценки радиолокаторов смещены вниз по сравнению с оценками осадкомеров. Йанг и др. [107] сравнили стационарные и радиолокационные данные об осадках во время летнего наводнения и обнаружили, что радиолокационные измерения позволили зафиксировать пространственную картину осадков лучше, чем дождевые датчики, подчеркнув потенциальную применимость метеорологических радиолокационных измерений для контроля наводнений в оперативном режиме. В трехлетнем исследовании Джонсона и др. [82] для 8 бассейнов на южных равнинах США, было показано, что радиолокатор недооценил количество осадков на 5–10% по сравнению с осадкомерными измерениями.

Естественно было стремление получить «совместный продукт», в котором отрицательные стороны двух методов оценки осадков были бы минимизированы, а достоинства объединены. Есть большое количество методов по комбинированию радиолокационных и стационарных измерений осадков с целью получения поля количества осадков с приемлемым качеством. Можно выделить три основных семейства методов, которые оказались наиболее действенными:

*Среднее смещение поля (Mean Field Bias, MFB).* В моделях с линейной регрессией ошибки считаются аддитивными. Но для нелинейных процессов, таких как осадки, ошибки часто оказываются мультипликативными по своей природе.

Среднее смещение поля – это мультипликативное смещение между величиной «истинного» значения осадков и восстановленной величиной [26, 60, 80, 96, 97].

$$Q_R^{True}(x, t) = MFB(t) \cdot Q_R(x, t) \cdot \varepsilon(x, t), \quad (1.8)$$

где  $Q_R^{True}(x, t)$  – «истинное» значение количества осадков в точке  $x$  за время  $t$ ,  $Q_R(x, t)$  – значение количества осадков в точке  $x$  за время  $t$  по данным радиолокатора,  $MFB(t)$  –

мультипликативное смещение за время  $t$  (одно для всего поля),  $\varepsilon(x, t)$  – случайная погрешность в точке  $x$  за время  $t$ .

Есть несколько способов оценки  $MFB$  за каждый момент времени.

*Способ 1.*  $MFB$  в момент времени  $t$  оценивается путем минимизации суммы квадратов невязки(разницы) между стационарными  $Q_G$  и радиолокационными  $Q_R$  наблюдениями с возможными весами  $w$  для учета различий в точности радиолокационных осадков (например, в зависимости от диапазона количества осадков) или количества датчиков внутри радиолокационных пикселей.

$$\sum_{i=1}^n w_i \cdot \{Q_G(x_i, t) - MFB(t) \cdot Q_R(x_i, t)\}^2 = \min. \quad (1.9)$$

Решение уравнения дает:

$$MFB(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Q_G(x_i, t) \cdot Q_R(x_i, t)}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Q_R(x_i, t)^2} \quad (1.10)$$

*Способ 2.* Вместо того, чтобы рассматривать радиолокационные и стационарные наблюдения как детерминированные, можно также принять вероятностную связь и получить  $MFB$  с использованием метода максимального правдоподобия. Но это означает принятие некоторых довольно сильных предположений:

– радиолокационные оценки количества осадков имеют логнормальное распределение:

$$Q_R \sim \text{Log}N(\mu_R, \sigma_R^2) \leftrightarrow \ln(Q_R) \sim N(\mu_R, \sigma_R^2); \quad (1.11)$$

– случайная погрешность  $\varepsilon$  имеет логнормальное распределение со средним значением 0:

$$\varepsilon \sim \text{Log}N(0, \sigma_\varepsilon^2) \leftrightarrow \ln(\varepsilon) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2); \quad (1.12)$$

– случайная погрешность  $\varepsilon$  не зависит от  $Q_R$ .

Используя приведенные выше предположения и некоторые основные свойства логнормального распределения, можно показать, что:

$$Q_R \cdot \varepsilon \sim \text{LogN}(\mu_R, \sigma_R^2 + \sigma_\varepsilon^2),$$

$$Q_R^{True} = MFB \cdot Q_R \cdot \varepsilon \sim \text{LogN}(\mu_R + \ln(MFB), \sigma_R^2 + \sigma_\varepsilon^2). \quad (1.13)$$

Другими словами, искомые значения количества осадков также имеют логнормальное распределение со средним значением  $\mu_R + \ln(MFB)$  и дисперсией  $\sigma_R^2 + \sigma_\varepsilon^2$ .

Это приводит к следующей оценке  $MFB$  путем максимизации функции правдоподобия:

$$MFB(t) = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\{Q_G(x_i, t)\} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\{Q_R(x_i, t)\}\right). \quad (1.14)$$

*Способ 3.* Вместо того, чтобы оценивать  $MFB$  отдельно на каждом временном шаге, можно также моделировать  $MFB$  как зависящий от времени процесс с помощью цепи Маркова.

Например, можно предположить, что логарифм среднего смещения поля является  $AR(1)$ -процессом:

$$\ln\{MFB(t)\} = a_1 \cdot \ln\{MFB(t-1)\} + W(t), \quad (1.15)$$

где  $W(t)$  – стационарная Гауссова случайная величина со средним 0.

$MFB$  в момент времени  $t$  оценивается как условное ожидание, учитывая все доступные радиолокационные и станционные наблюдения в настоящем, прошлом и/или будущем.

К сожалению, для этого метода нет аналитического решения. Но можно получить числовые аппроксимации.

Коррекция  $MFB$  радиолокационных данных с использованием осадкомерных датчиков очень распространена. С помощью этого метода можно устранить систематические смещения в радиолокационной оценке осадков (например, связанные с калибровкой или с неточным  $Z-I$  соотношением) [109]. Это простой, быстрый способ, с помощью которого значительно снижается погрешность

восстановления радиолокационного поля осадков. Однако коррекция *MFB* имеет свои ограничения:

- критично количество доступных осадкомеров для коррекции;
- пространственное распределение датчиков должно быть изотропным;
- *MFB* применяется для коррекции всего поля, не учитывая его локальных особенностей, которые могут зависеть от расстояния до локатора и направления.

*Кригинг с внешним дрейфом (Kriging with External Drift, KED)*. Семейство методов Кригинга – геостатистические методы пространственной интерполяции данных, основанные на пространственной корреляционной структуре искомого поля. В многомерном Кригинге используются основная и дополнительная переменные для построения поля [59, 64, 78, 86, 91, 99, 100]. Для задачи комбинирования радиолокационных и наземных измерений лучше всего себя зарекомендовал вид многомерного Кригинга – Кригинг с внешним дрейфом.

Кригинг с внешним дрейфом – метод оценивающий искомую переменную по основной переменной, с трендом, который моделируется как линейная функция гладкой дополнительной переменной. Цель метода Кригинг: обеспечить наилучшую возможную оценку неизвестной случайной функции с использованием комбинации как первичных, так и вторичных данных.

В задаче восстановления полей осадков тренд моделируется с помощью радиолокационного поля осадков:

$$m(x) = a \cdot Q_R(x) + b, \quad (1.16)$$

где  $a$  и  $b$  - неизвестные коэффициенты предполагаются постоянными в окрестности оцениваемой точки и вычисляются при решении системы уравнений Кригинга.

Кригинг с внешним дрейфом работает по следующему алгоритму:

1. находится модель линейной регрессии между данными осадкомеров и радиолокационными данными для определения коэффициентов тренда;

2. рассчитываются невязки (разница между стационарными осадками и значением тренда) для каждого местоположения осадкомеров;
3. вычисляется пространственная автоковариация невязок и подбирается подходящая модель автоковариации;
4. с использованием Кригинга невязки интерполируются в каждую искомую точку;
5. поле осадков получается, как сумма поля невязок и поля радиолокационного тренда.

Данный метод лучше всего работает, когда невязки имеют четкую тенденцию (например, из-за топографии).

Однако, KED имеет некоторые ограничения:

- нахождение адвективной модели ковариации может быть не простой задачей;
- тренд невязок может приводить к отрицательным значениям в искомом поле;
- критичен выбор модели тренда;
- геостатистические методы дорогостоящи в плане вычислений;
- геостатистические подходы также чувствительны к плотности и качеству данных, используемых в расчетах вариограммы, и могут иногда приводить к плохим результатам.

*Метод интерполяции невязок.* Данный метод основан на пространственной интерполяции разницы между наземными и радиолокационными оценками количества осадков [67, 74, 101, 110]. Он схож с методом Кригинг с внешним дрейфом. В данном методе также рассчитывается невязка в местах расположения датчиков. Но при нахождении невязки из стационарных измерений вычитается не значение тренда, а непосредственно значение радиолокационных оценок осадков. Как будет показано в главе 3, линейная связь между радиолокационными и стационарными

значениями количества часовых осадков с приемлемой точностью явно не прослеживается, поэтому нет возможности построить достаточно хороший тренд. Ещё одним отличием метода интерполяции невязки от Кригинга с внешним дрейфом является возможность использования различных типов интерполяторов, в том числе и детерминистических.

Метод интерполяции невязок работает следующим образом. Для каждого срока вначале рассчитываются «невязки радиолокационных осадков» для каждого  $i$ -го осадкомера:

$$E(x_i) = Q_R(x_i) - Q_G(x_i). \quad (1.17)$$

Затем методом пространственной интерполяции невязка воспроизводится в каждом пикселе радарной области и вычитается из поля радиолокационных оценок осадков. Таким образом, происходит коррекция поля количества осадков, восстановленного на основе радиолокационных наблюдений измерениями датчиков осадков.

Для интерполяции используют различные методы: детерминистические и статистические. Например, Вэр в своей магистерской диссертации [101] сравнивал методы обратных расстояний, мультиквадратической интерполяции и Обычный Кригинг для восстановления суточных сумм осадков методом интерполяции невязки. После сравнения методов по среднеквадратическому отклонению наилучшим оказался метод обратных расстояний. В исследованиях [67, 110] использовал метод обратных расстояний. В монографии швейцарского автора Эрдина [74] для восстановления суточных сумм осадков сравнивались метод Обычный Кригинг для интерполяции невязки и Кригинг с внешним дрейфом. Автор указывает на то, что КЕД оказался лучше для горной местности Швейцарии, но метод интерполяции невязки более точно определяет факт выпадения или отсутствия осадков.

Также стоит упомянуть отечественный *метод вариационного согласования радиолокационных и осадкомерных данных*. Метод был предложен Вельтищевым и

Корольковым [15]. На первом этапе строится поле первого приближения  $P_1$  методом интерполяции невязки. Это поле первого приближения, а также поле количества осадков, полученное при переводе радиолокационной отражаемости в интенсивность осадков, используются для построения функционала. Функционал, подлежащий минимизации, представлен в виде:

$$J = \iint \left[ A(P - P_1)^2 + B \left( \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial P_0}{\partial x} \right)^2 + B \left( \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial P_0}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (1.18)$$

, где  $P_0$  – поле количества осадков по радиолокационным данным,  $P$  – искомое поле осадков.

Из структуры функционала видно, что его минимизацией авторы хотели достигнуть наименьшей в квадратическом смысле ошибки по всей области анализа, причем, в построенном таким образом поле будет присутствовать некоторый компромисс между близостью градиентов в этом поле и поле радиолокационных осадков  $P_0$  и близостью абсолютных величин к полю первого приближения  $P_1$ .

*Выбор метода комбинирования радиолокационных и наземных измерений.* В работе [77] проводилось сравнение методов комбинирования радиолокационных и стационарных данных для восстановления поля суточных сумм осадков в Бельгии. Сравнивались: МФВ, интерполяция невязок и КЕД. При сравнении данных методов с восстановлением осадков только по радиолокационной отражаемости среднее абсолютное отклонение поля уменьшилось для метода МФВ на 25%, интерполяции невязки – на 34%, КЕД – на 38%.

Метод МФВ не будет рассматриваться в данном исследовании так, как в нем не учитываются локальные особенности осадков, а только глобальное смещение. Несмотря на популярность метода КЕД [59, 64, 78, 86, 91, 99, 100], ряд авторов [73, 77, 98, 109] делают свой выбор в пользу интерполяции невязки, считая что этот метод достаточно эффективен в плане вычисления и имеет удовлетворительную погрешность.

В методе вариационного согласования авторы предполагали, что поле осадков, полученное радиолокационным методом, приемлемо воспроизводит горизонтальный градиент искомого поля, хотя не было приведено доказательств, подтверждающих этот факт. К тому же, в данном методе при расчете искомого поля осадков радиолокационное поле учитывается дважды: при интерполяции невязки (поле  $P_1$ ) и при построении функционала (поле  $P_0$ ), а значения количества осадков на станциях только один раз (поле  $P_1$ ). Поэтому данный метод сильно зависит от качества радиолокационных данных.

Таким образом, в данном исследовании для восстановления поля осадков комбинированным методом будут рассматриваться два наиболее действующих метода: Кригинг с внешним дрейфом и интерполяция невязки. По первичному анализу исходных данных в главе 3 будет выбран один из них.



## Глава 2. Район исследования и исходные данные

### 2.1 Краткая физико-географическая и климатическая характеристика Санкт-Петербурга и пригородов

Санкт-Петербург расположен на северо-западе Российской Федерации (рисунок 2.1). Координаты центра:  $59^{\circ}57'$  с.ш.  $30^{\circ}19'$  в.д. Занимая прилегающее к устью реки Невы побережье Невской губы Финского залива и многочисленные острова Невской дельты, город протянулся с северо-запада на юго-восток на 90 км. Высота города над уровнем моря по районам: центр: 1–5 м, север: 5–30 м, юг и юго-запад: 5–22 м. Самое высокое место в черте города: Дудергофские высоты в районе Красного Села с максимальной высотой 176 м.

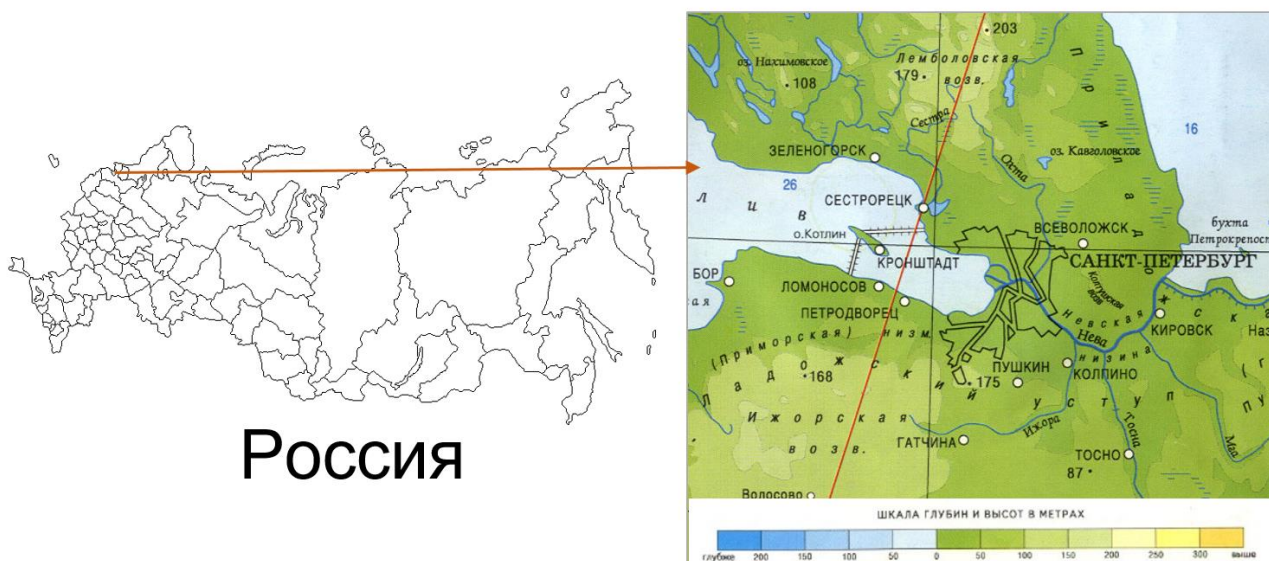


Рисунок 2.1 – Расположение Санкт-Петербурга на карте Российской Федерации и топографическая карта города с окрестностями

Окрестности Санкт-Петербурга представляют собой ступенчатую равнину, высота которой в большинстве случаев не превышает 50–100 м над уровнем моря. Наибольшие высоты сосредоточены в более отдаленных окрестностях на центральной

возвышенности Карельского перешейка (205 м над уровнем моря) и на Ижорской возвышенности Ордовикского плато (до 150–160) м над уровнем моря.

Климат Санкт-Петербурга – умеренный и влажный, переходный от морского к континентальному. Основной особенностью климата здесь является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс, которые, в зависимости от района формирования, подразделяются на морские, континентальные и арктические. Морские воздушные массы поступают с запада, юго-запада или северо-запада при перемещении через северо-западные районы России атлантических циклонов. Циклоны приносят пасмурную, ветреную погоду и осадки. С востока, юга или юго-востока входит сухой континентальный воздух. В антициклонах, сформировавшихся в этих воздушных массах, устанавливается малооблачная и сухая погода, летом жаркая, а зимой холодная. С севера и северо-востока, главным образом со стороны Карского моря, приходит сухой и всегда очень холодный арктический воздух, формирующийся надо льдом. Вторжения арктических воздушных масс сопровождаются наступлением ясной погоды и резким понижением температуры воздуха. Несмотря на частую смену воздушных масс, основное влияние на климат Петербурга оказывает Атлантический океан: ветры западных направлений являются преобладающими [28].

Одной из особенностей петербургского климата является его повышенная влажность; относительная влажность в среднем за год составляет почти 80 %. Для Петербурга характерна высокая облачность (в течение года наблюдается около 30 безоблачных дней), туманы преобладают осенью и в начале зимы (до 27 дней). Частыми являются ветры преимущественно западных направлений, средняя годовая скорость ветра составляет 3 м/с [35]. Средняя годовая температура воздуха на территории Санкт-Петербурга составляет 4,4°C. Самый холодный месяц – февраль (средняя суточная температура – 7,9°C), самый теплый – июль (17,8°C). Средняя годовая сумма осадков – 670 мм, количество осадков на 200–250 мм превышает

испарение. Большая часть осадков выпадает с апреля по октябрь с максимумом в августе и минимумом в марте. [9].

Количество осадков, выпадающих в разных частях города и окрестностях, существенно различается. В городе были выделены его северная, южная и западная части, в окрестностях – побережье Финского залива и более континентальная часть (северная, восточная и южная).

Сравнение, проведенное по средним многолетним данным, показывает, что в северной части города и в северной зоне окрестностей осадков выпадает больше, чем в центре на 11 и 21% соответственно. В устье Невы, на побережье Финского залива, а также на южной окраине города, наоборот, осадков выпадает меньше, чем в центре (на 5–7 %). В южных пригородах в районе Пулковских высот количество осадков примерно такое же, как и в центральной части города, а далее на юг, на границе Ордовикского плато превышает его на (7–8 %). Таким образом, в среднем за год различие между количеством осадков в северной и южной частях города составляет 16% [29].

## **2.2 Сеть наземных пловниографов АИС «Осадки»**

С 2014 года в Петербурге внедряется автоматизированная информационная система (АИС) «Осадки» – важная часть проекта по внедрению системы управления водоотведением Санкт-Петербурга, создание которой предусмотрено утвержденной правительством города схемой водоснабжения и водоотведения [4]. Установленные в рамках создания АИС «Осадки» 34 осадкомера обеспечивают необходимое покрытие города и ближайших пригородов для измерения количества выпавших атмосферных осадков. Более объективная и точная информация об объемах поверхностного стока дает возможность разработать и спроектировать систему отведения поверхностного стока и сооружений для их очистки с максимальной точностью и минимальными затратами. Использование АИС «Осадки» обеспечивает оперативную передачу

данных, позволяет рассчитать и формировать отчеты по объемам поверхностного стока и водному балансу для территорий города и ближайших пригородов с учетом пространственной неоднородности выпадения атмосферных осадков.

*Структура сети АИС «Осадки».* Сеть включает в себя 34 датчика атмосферных осадков OTT Pluvio<sup>2</sup> 200 и 7 метеостанций (в составе: станции погодные автоматические WS300 и анемометры ультразвуковые Ventus-UMB). Расположение измерительного оборудования представлено на рисунке 2.2. Плотность у сети относительно высокая: 34 прибора на 3000 км<sup>2</sup> или один прибор на 88 км<sup>2</sup>, среднее расстояние между приборами 9,4 км. В основной части города (без пригородов) плотность сети больше: 16 станций на 825 км<sup>2</sup> или один прибор на 51 км<sup>2</sup>, среднее расстояние между приборами 7,1 км.

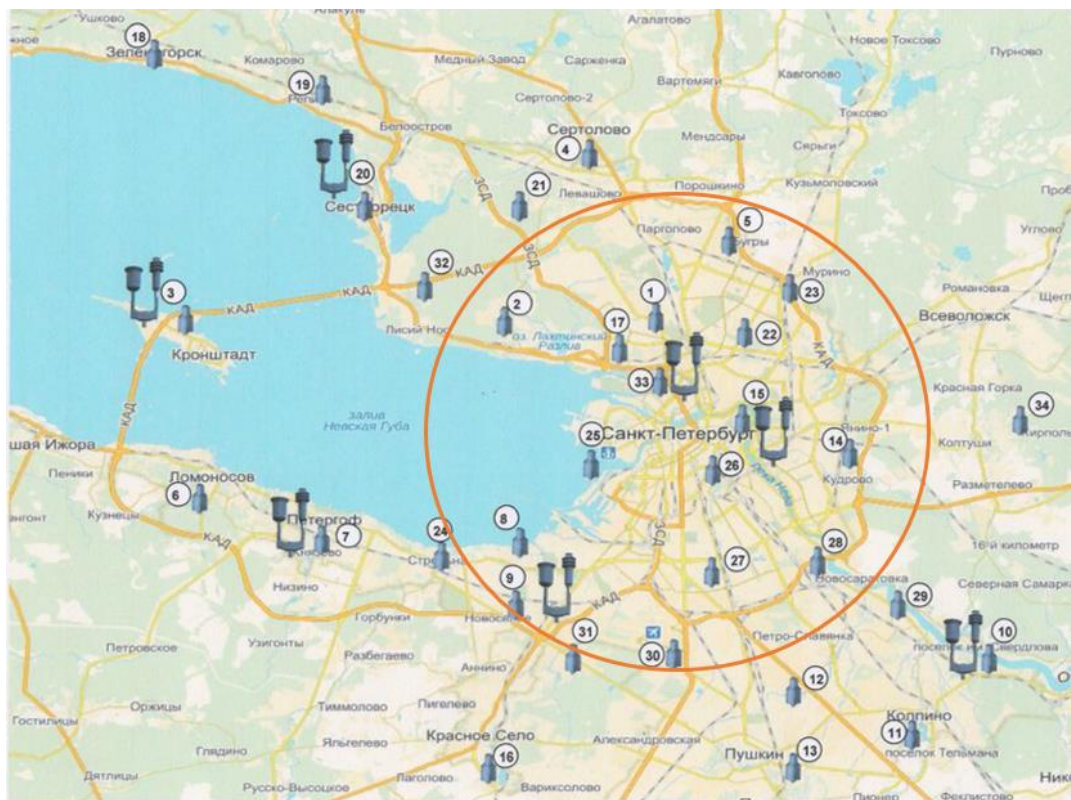


Рисунок 2.2 – Расположение метеорологического оборудования АИС «Осадки». Эллипсом выделена основная часть города

*Характеристики ОТТ Pluvio<sup>2</sup> 200.* Датчик осадков разработан немецкой компанией ОТТ Hydromet, которая производит гидрометрические и метеорологические приборы. Плувиограф предназначен для непрерывного автономного наблюдения за количеством и интенсивностью осадков. В отличие от осадкомеров других производителей Pluvio измеряет вес осадков в "емкости". Большинство из существующих осадкомеров других производителей работают по другому принципу: накапливают воду или снег и при достижении некоторого веса опрокидывают чашку, то есть считают количество опрокидываний. По мнению разработчиков, то, что Pluvio измеряет вес "емкости" вне зависимости от количества воды в ней является основным его преимуществом перед конкурирующими образцами [89].

Каждые 6 секунд ОТТ Pluvio<sup>2</sup> 200 вычисляет содержание собирательного сосуда с использованием нескольких исходных величин. Специальный алгоритм фильтрации защищает от некорректных результатов измерения, вызванных такими эффектами, как ветер. Эти 6-секундные значения интенсивности добавляются к накопленной сумме осадков по ОТТ Pluvio<sup>2</sup> 200. Датчики работают в автоматическом режиме и обеспечивают получение информации о количестве атмосферных осадков один раз в пять минут и/или по запросу. Погрешность измерения количества осадков прибором  $\pm 0,1$  мм или  $\pm 1$  % от измеренного значения.

### **2.3 Метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С»**

В исследовании использовались радиолокационные данные, полученные с помощью «ДМРЛ-С» – метеорологического радиолокатора, работающего на длине волны 5,3 см. Доплеровский метеорологический радиолокатор с двойной поляризацией «ДМРЛ-С» предназначен для обеспечения метеорологической информацией об облачности, осадках и связанных с ними явлениях погоды прогностических органов Росгидромета, АМЦ, АМСГ и Центров УВД гражданской

авиации, а также других потребителей радиолокационной метеорологической информации [44, 51, 52, 53, 54, 55].

В «ДМРЛ-С» используется круговая схема сканирования. В каждом обзоре радиолокатор последовательно проводит азимутальное круговое сканирование атмосферы на нескольких углах места антенны в диапазоне от 0 до 90°.

Радиолокатор «ДМРЛ-С» обеспечивает одновременное измерение следующих радиолокационных характеристик:

- радиолокационной отражаемости на горизонтальной поляризации;
- радиолокационной отражаемости на вертикальной поляризации;
- радиальной скорости;
- ширины доплеровского спектра радиальных скоростей;
- дифференциальной фазы;
- коэффициента кросскорреляции.

Радиолокатор имеет следующие основные технические характеристики: мощность в импульсе не менее 900 кВт, ширина диаграммы направленности 1°, период между радиолокационными обзорами 10 мин, инструментальная дальность обнаружения: 250 км, максимальная высота обнаружения 20 км [55]. Для обработки и визуализации данных, полученных от «ДМРЛ-С», используется программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010», обеспечивающее получение метеорологических радиолокационных продуктов с пространственным разрешением до 1 км [16].

Для расчетов интенсивности и сумм осадков в «ДМРЛ-С» используется радиолокационная отражаемость  $Z_I$ , измеренная на высоте 600 м над уровнем установки ДМРЛ. В разделе 1.3 указывается на то, что высота радиолокационного луча над земной поверхностью, растет нелинейно из-за сферичности Земли и преломления радиоволн атмосферой (рефракции). Радиолуч на нижнем угле на удалении 60 км поднимается на 220 м, то на 100 км от «ДМРЛ-С» – уже на 600 м, а на

250 км, соответственно, на 3750 м. Таким образом, достоверно осадки определяются в радиусе 100 км. За пределами 100 км измеренная  $Z_I$  может характеризовать как осадки, так и облачность. Пример карты  $Z_I$  представлен на рисунке 2.3.

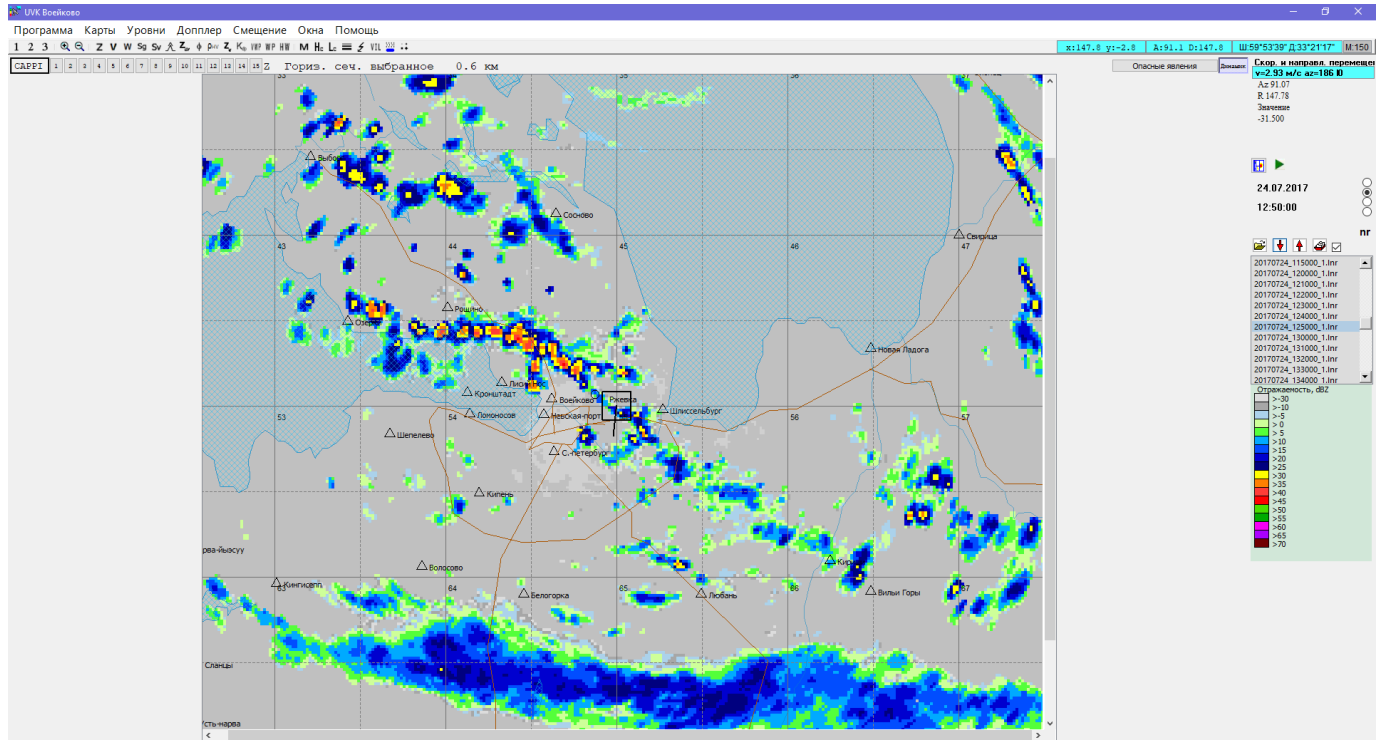


Рисунок 2.3 – Пример карты радиолокационной отражаемости в приземном слое, построенной в ПО «ГИМЕТ-2010», по радиолокационному зондированию атмосферы «ДМРЛ-С» Воейково

В России существует сеть таких локаторов [24]. В данном исследовании использован ближайший к Санкт-Петербургу прибор, который был установлен в 2014 году в поселке Воейково Ленинградской области и находится в 10 км восточнее города. Высота над уровнем моря места установки радиолокатора 75 м, плюс 30 м высота башни, на которой расположена антенна «ДМРЛ-С».

## 2.4 Исходных данные и их предварительная обработка

В данном исследовании для восстановления поля осадков использовались значения количества осадков, полученные от pluviографов OTT Pluvio<sup>2</sup> 200 и поля количества осадков оцененные по данным «ДМРЛ-С».

Для хранения данных об осадках использовалась база данных «Атмосферные осадки» [47] под управлением СУБД PostgreSQL. Для формирования выборки использовался язык программирования C++ с применением библиотек Qt. Для реализации пространственной интерполяции применялась программная библиотека с открытым исходным кодом Geoprack [63], написанная на языке C++. Для расчета статистических характеристик и создания графиков использовался Microsoft Excel 2013. Построение графика «ящик с усами» происходило в программе StatSoft STATISTICA. Обработка и визуализация радиолокационной информации осуществлялась в ПО «ГИМЕТ-2010» [16]. Визуализация построенных полей осадков осуществлялась в программе СПО ПАС «Метеонаблюдатель» [46].

Для расчета часовых сумм атмосферных осадков  $Q_G$ , полученных на основе данных pluviографов, складывались 5-минутные значения количества атмосферных осадков, начиная со значения, полученного в 05 мин предыдущего часа, и заканчивая значением, полученным в 00 мин соответствующего часа (например, часовую сумму атмосферных осадков за 15 ч получают сложением 5-минутных значений, полученных с 14:05 по 15:00):

$$Q_G = \sum_{k=1}^{12} q_k, \quad (2.1)$$

где  $q_k$  – количество осадков за 5 минут (мм), полученное от pluviографа,  $k$  – номер 5-минутного измерения.

В случае если общее количество осадков по всем датчикам за конкретный срок не превышало 1 мм, такой срок не использовался в исследовании. Это сделано для



того, чтобы исключить из выборки случаи выпадения незначительных «следов» осадков.

Поле количества осадков за час, полученное радиолокационным методом, рассчитывается на основе поля радиолокационной метеорологической отражаемости  $Z_I$ , измеренного на минимальном угле места. Отражаемость берется с 10 мин предыдущего часа по 00 мин соответствующего часа. Вначале отражаемость переводится в интенсивность осадков по формуле Маршалла-Пальмера (1.7). Затем, для каждого радиолокационного пикселя, количество осадков  $Q_R$  рассчитывается путем накопления значений интенсивности осадков в текущем часе по формуле:

$$Q_R = \sum_{k=1}^6 I_k \cdot t, \quad (2.2)$$

где  $I_k$  – интенсивность осадков (мм/ч), полученная при переводе из радиолокационной отражаемости,  $t$  – время обзора (10 мин),  $k$  – номер 10-минутного обзора.

Для исследования использовалась не вся зона эффективного обнаружения осадков радиолокатором (раздел 2.3), а только та её часть, где расположены плювиографы. На рисунке 2.4 представлено место расположения выбранной зоны. Её горизонтальные размеры составили  $74 \times 74$  км. Также на карте отмечено расположения «ДМРЛ-С», приборов АИС «Осадки» и зоны эффективного обнаружения осадков. Максимальное расстояние между радиолокатором и плювиографами составляет 60 км. В работе [2] утверждается, что если метеостанции расположены в радиусе 60 км от радиолокатора, то при сопоставлении данных двух «сенсеров» исключается влияние уширения и перелета луча; искажений, вносимых линией таянья снега под уровнем изотермы  $0^\circ\text{C}$ ; а также затуханием радиоволн в облаках, осадках и газах атмосферы (раздел 1.3). Таким образом вся сеть АИС «Осадки» расположена в приемлемой зоне для калибровки радиолокационных данных.

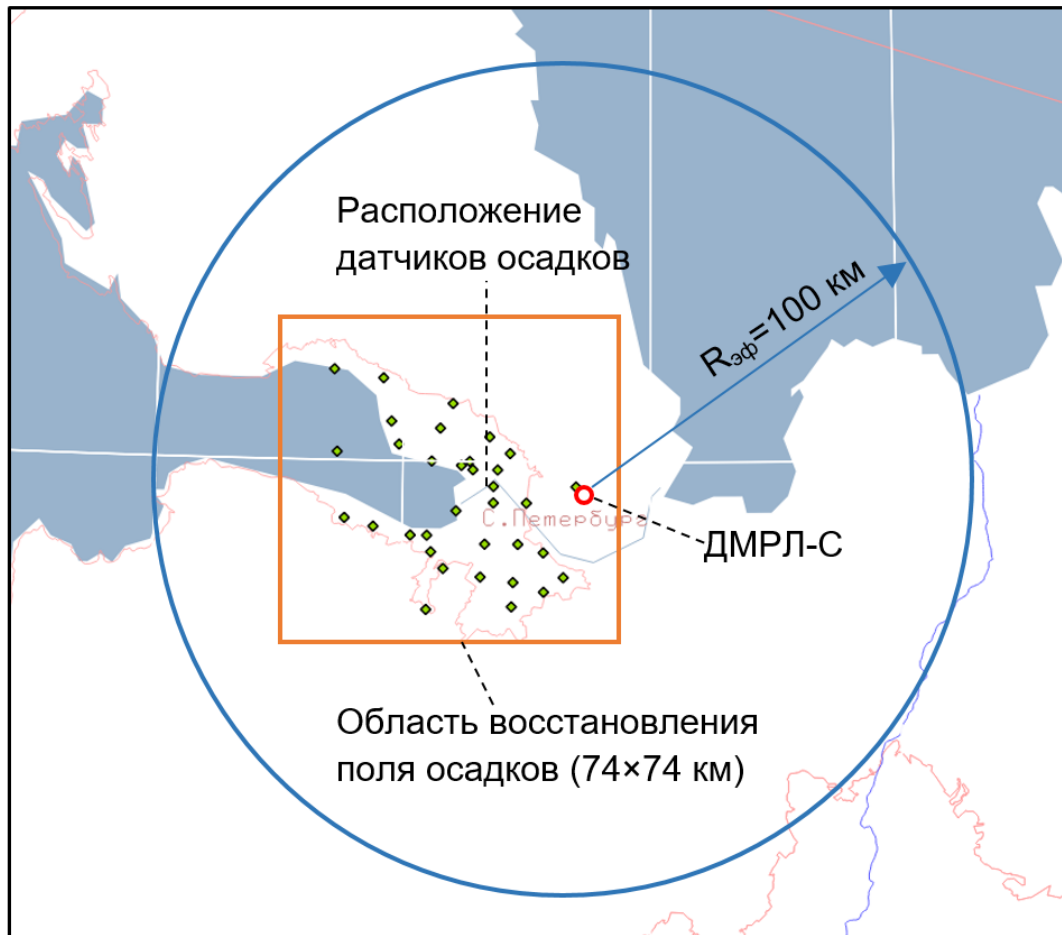


Рисунок 2.4 – Взаимное расположение: АИС «Осадки», «ДМРЛ-С», зоны восстановления поля осадков, зоны эффективного обнаружения осадков радиолокатором

В исходную выборку попадали только сроки, имеющие 100% полноту исходных данных. Т.е. для каждого часа должны были быть все 12 5-минутных измерения количества осадков по всем датчикам и все 6 10-минутных карт радиолокационной отражаемости в приземном слое.

Несмотря на то, что исследуемые средства оценки характеристик осадков работают с 2014 года, в работе использовались синхронные оценки осадков радиолокатором и сетью наземных измерителей только за 2016 и 2017 года. Это связано с тем, что в 2014 и 2015 годах радиолокационные измерения отражаемости на «ДМРЛ-С» подвергались существенному искажению в результате действия активных помех. Источники помех были устранены только к 2016 году [53, 54].

Настоящее исследование ограничивается теплым периодом года, включающим все месяцы с мая по сентябрь. Теплый период был выбран для того, чтобы сфокусироваться на жидких осадках и минимизировать возможность влияния «яркой полосы» на ошибки определения осадков по радиолокационным данным (раздел 1.3). По этой причине из исходной выборки также были исключены случаи выпадения града, которые фиксировал локатор в зоне восстановления осадков. Всего таких сроков оказалось 4.

В итоге за два теплых периода выборка составила 1306 часовых сроков. Приведем статистические характеристики выборки по значениям количества осадков  $Q_G$ , измеренных пьювиографами: количество  $N$ , среднее  $\bar{Q}_G$ , медиана  $Me(Q_G)$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma(Q_G)$ , коэффициент вариации  $C_V(Q_G)$  и максимальное количество осадков  $Q_{Gmax}$ . Все характеристики представлены в таблице 2.1. В таблице есть разделение по интервалам максимального количества осадков, который был зафиксирован в конкретный срок хотя бы на одной станции. Интервалы были выбраны таким образом, чтобы условно соответствовать разным типам осадков. Первый интервал характеризует морось, второй и третий обложные осадки, два последних ливневой характер осадков (раздел 1.1).

Таблица 2.1 – Статистические характеристики количества осадков

Интервал $Q_{Gmax}$ [мм]	$N$	$\bar{Q}_G$ [мм]	$Me(Q_G)$ [мм]	$\sigma(Q_G)$ [мм]	$C_V(Q_G)$	$Q_{Gmax}$ [мм]
$\leq 0,6$	18326	0,02	0	0,07	308%	0,6
0,6 – 1,5	9588	0,13	0	0,26	197%	1,48
1,5 – 3	7786	0,42	0,13	0,59	138%	2,99
3 – 5	4148	0,71	0,11	1,07	152%	4,99
> 5	4522	1,64	0,49	2,49	152%	22,05
<b>Общее</b>	<b>44404</b>	<b>0,35</b>	<b>0</b>	<b>1,03</b>	<b>297%</b>	<b>22,05</b>

По значениям среднего и медианы из таблицы 2.1 видно, что чаще всего количество осадков имеет незначительную интенсивность. Почти половина случаев выпадения осадков в Санкт-Петербурге приходится на морось. Количество случаев выпадения осадков убывает с увеличением максимального значением количества осадков за час. Разброс значений осадков велик,  $C_V$  для всех интервалов больше 100%.

## Глава 3. Восстановление полей осадков по данным АИС «Осадки» и «ДМРЛ-С»

### 3.1 Оценка качества восстановления полей осадков

Для оценки качества работы методов восстановления пространственного распределения количества осадков использовался метод перекрестной проверки (Cross Validation) [20].

Суть данного алгоритма сводится к тому, что из исходного набора данных удаляется одно наблюдение исследуемой переменной  $Z_i$ , и затем, используя оставшиеся данные и выбранный алгоритм восстановления, рассчитывается значение в точке этого наблюдения. Далее проводится сравнение восстановленного и измеренного значения с помощью невязки. Невязка – разность между восстановленным  $\hat{Z}_i$  и наблюдаемым значением  $\hat{Z}_i - Z_i$ , рассматривается как погрешность восстановления. Процесс повторяется для каждой измеренной точки. На основе анализа этих рассогласований можно сделать выводы о погрешности восстановления полей пространственных характеристик (в нашем случае, количества осадков).

Для количественного анализа качества восстановления полей осадков в данном исследовании используется ряд статистических показателей, обобщающих все значения невязки: среднеквадратическое ( $RMSE$ ), среднее абсолютное ( $MAE$ ), систематическое ( $ME$ ) отклонения.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i)^2}, \quad (3.1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}_i - Z_i|, \quad (3.2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - Z_i), \quad (3.3)$$

где  $n$  – число измерений,  $i$  – номер измерения.

Среднеквадратическое и среднее абсолютное отклонение дают информацию о качестве метода по всей исследуемой области. При сравнении, метод имеющий наименьшие  $RMSE$  и  $MAE$  будет считаться более качественным. Значение систематического отклонения позволяет оценить качество восстановления метода с точки зрения завышения или занижения количества осадков в точке. Чем ближе этот показатель к 0, тем меньше смещено восстановленное поле от реального.

Кроме анализа статистических показателей, в данном исследовании также методом наименьших квадратов [1] рассчитывались коэффициенты модели линейной регрессии  $\hat{Z} = aZ + b$ , их стандартные отклонения и коэффициент детерминации  $R^2$ .

Коэффициент детерминации определяет долю объясненной дисперсии. Чем ближе этот параметр к 1, тем четче проявляется зависимость между восстановленными и фактическими значениями количества осадков. С другой стороны,  $R^2$  определяет только количественно степень линейной зависимости между двумя переменными, с помощью коэффициентов линейной регрессии  $a$  и  $b$  можно оценить характер этой зависимости. Чем ближе  $a$  к 1 и  $b$  к 0, тем точнее работает исследуемый метод восстановления полей осадков.

### **3.2 Восстановление полей количества осадков по данным «ДМРЛ-С»**

В разделе 1.3 представлена связь между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков (1.7). Для качественного восстановления полей осадков по данным радиолокатора необходимо подобрать коэффициенты  $A$  и  $B$  из данного соотношения наиболее подходящие для исследуемой территории. Известны две работы, в которых оценивались параметры  $Z-I$  соотношения (1.7) для исследуемого района – северо-запада России. Это работа Сальмана [45], в которой исследовались

обложные и ливневые дожди в Ленинградской области и работа Боровикова и др. [10], в которой исследовались все типы дождей в г. Валдай. В первой работе были получены коэффициенты  $A=220$ ,  $B=1,54$ ; во второй –  $A=230$ ,  $B=1,5$ .

На основе полей радиолокационной метеорологической отражаемости были рассчитаны поля количества осадков за час  $Q_R$  (раздел 2.4) для всей выборки. Для перевода отражаемости в интенсивность осадков сравнивались три набора коэффициентов  $Z-I$  соотношения: коэффициенты, полученные Маршаллом и Пальмером (раздел 1.3), и две комбинации коэффициентов, полученные отечественными исследователями для северо-западной части страны.

Для сравнения различных комбинаций коэффициентов, значения  $Q_R$  в местах расположения плювиографов, сопоставлялись со значениями  $Q_G$ . Для сопоставления использовались статистические характеристики из раздела 3.1. Данные характеристики были рассчитаны для всей выборки и отдельно по 6 градациям максимального значения  $Q_G$ . Результаты расчёта представлены в приложение А отдельно для 2016 и 2017 года. Разбить на отдельные года пришлось из-за систематических различий в радиолокационных данных, которые могут быть связаны с изменением алгоритма расчета радиолокационной отражаемости на «ДМРЛ-С» Воейково в 2017 году.

На рисунке 3.1 нанесены совместные оценки количества осадков по плювиографам и по «ДМРЛ-С» для исследуемых комбинаций коэффициентов  $A$  и  $B$  отдельно по двум годам. Также, на графиках нанесены линии тренда, выделена зона расположения 95% точек с  $Q_G > 0,1$  мм и проведены вспомогательные биссектрисы, соответствующие совпадению результатов радиолокационных и наземных оценок осадков.

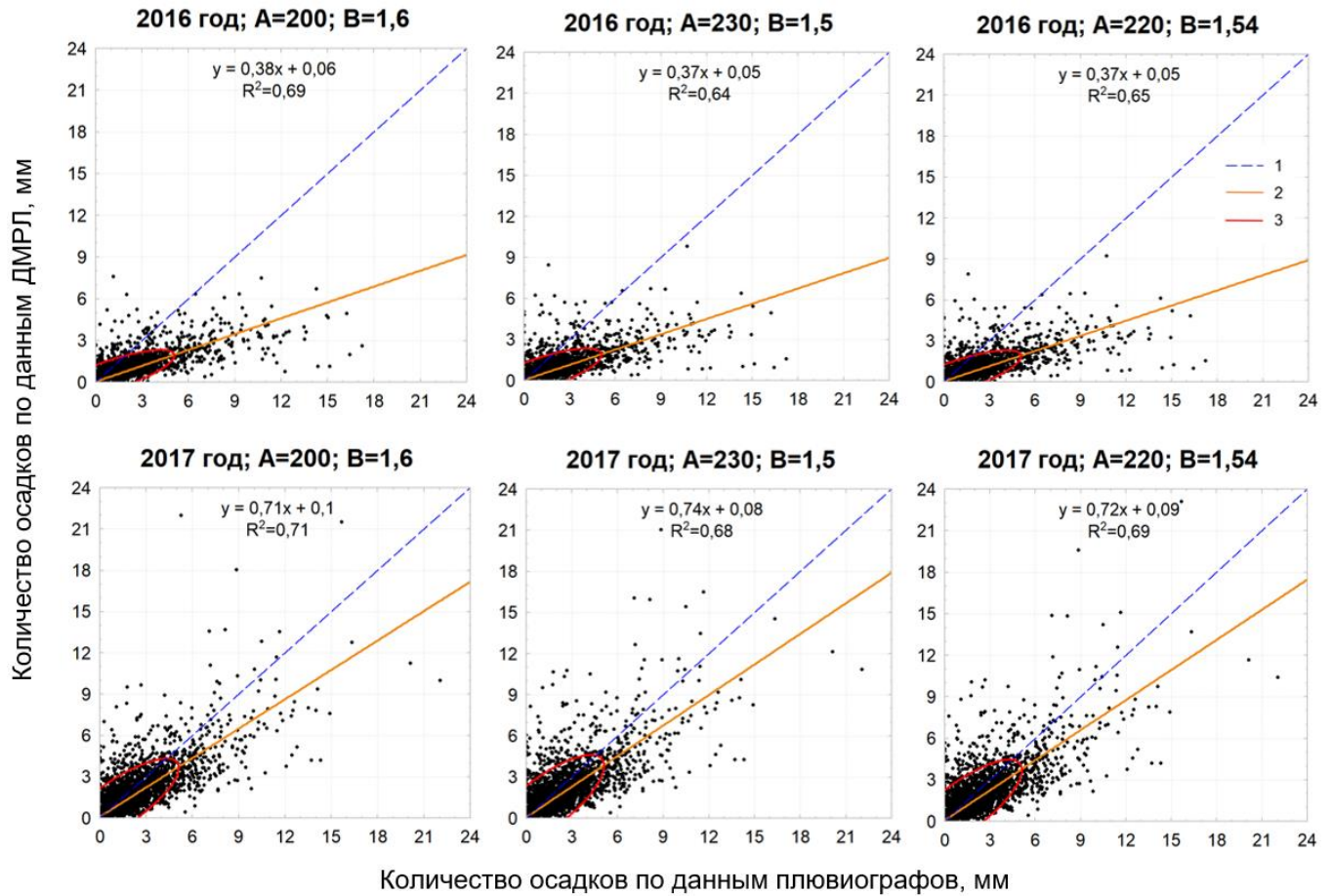


Рисунок 3.1 – Сравнение станционных и радиолокационных оценок количества осадков с разными комбинациями коэффициентов  $Z-I$  соотношения для 2016 и 2017 г.

1 – биссектриса  $Q_R = Q_G$ ; 2 – линейная регрессия; 3 – 95% процентов точек с  $Q_G > 0,1$  мм

По рассчитанным характеристикам (Приложение А) и по графикам (рис. 3.1) видно, что радиолокационные и станционные оценки часовых сумм осадков часто имеют значительные различия. Несоответствие оценок осадков ДМРЛ были найдены и другими исследователями. Так, в работе Дивинского и др. [21] было проведен анализ почти 3000 сроков наблюдений по трем наземным метеорологическим станциям и ДМРЛ Пулково. В результате было получено, что вероятность обнаружения осадков локатором составляет от 69% до 83,5%. Жарашуев и др. [25] провели сравнительного анализа данных 2013 года, полученных от метеостанций и радиолокаторов «ДМРЛ-С», работающих в Ставрополе и Волгограде. По их данным коэффициент



детерминации  $R^2$  между стационарными и радиолокационными оценками количества осадков не превышает 0,45.

Значения  $MAE$  (приложение А) почти во всех случаях оказались отрицательными за исключением 2016 года  $Q_{Gmax} \leq 0,6$  мм и 2017 года для  $Q_{Gmax} 0,6-3$  мм. Коэффициент  $a$  почти во всех случаях меньше 1. Исключение являются два набора коэффициентов в 2017 году в градации  $Q_{Gmax} \leq 0,6$  мм. Таким образом, можно сделать вывод, что количество осадков по данным радиолокатора оказывается систематически ниже, чем по наземным pluviографам. В работе [15] получены подобные результаты. Авторы связывают занижение оценок осадков с двумя причинами: разными масштабами пространственного осреднения у двух приборов и наличием затухания радиоволн.

Некоторые эксперты в области метеорологической радиолокации предлагают калибровать отражаемость по измерениям на станциях для устранения смещённости между оценками осадков. В частности, в работе [2] для уточнения константы МРЛ предлагается рассчитать поправку по отклонению линии тренда от биссектрисы по формуле:

$$\Delta(10 \lg C_\lambda) = \Delta Z = 16(\lg Q_R - \lg Q_G), \quad (3.4)$$

где  $\Delta(10 \lg C_\lambda)$  – величина поправки, необходимая для согласования количества осадков, полученным по радиолокационным и наземным данным в дождях разной интенсивности.

В работе [2] в качестве примера приведен расчет такой поправки по выборке данных. По всей видимости здесь использовались полусуточные или суточные суммы осадков, потому что их значения высоки и коэффициент детерминации между  $Q_G$  (в [2] обозначается  $Q_O$ ) и  $Q_R$  близок к 1,  $R^2=0,92$ . В данном исследовании коэффициент детерминации не удовлетворителен для использования такой поправки. Коррекция радиолокационных данных может привести к сильному завышению осадков в ряде

случаев, поэтому калибровка будет производиться для каждого конкретного поля отдельно методом комбинирования радиолокационных и станционных измерений.

Проведем сравнительный анализ коэффициентов  $Z-I$  соотношения. Как видно из таблиц приложения А и из точечной диаграммы рисунка 3.1 для всех трех комбинаций коэффициентов радиолокационные значения осадков воспроизводятся примерно одинаково. Несмотря на это, можно выделить коэффициенты Маршалла и Пальмера, на основе которых радиолокационная оценка осадков оказалась наиболее близкой к станционным измерениям. Эти коэффициенты оказались наиболее подходящими как для 2016, так и для 2017 года по всем статистическим характеристикам за исключением  $b$  для всего периода и  $a$  для 2017 года. Коэффициенты  $A=200$   $B=1,6$  будут использоваться в дальнейшем для восстановления поля количества осадков за час по радиолокационным данным.

Теперь сравним качество радиолокационного поля осадков в 2016 и 2017 годах. Из таблиц приложения А видно, что в первых двух градациях по характеристикам  $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $ME$  и  $b$  лучшим оказался 2016 год, хотя он уступает по  $R^2$  и по  $a$ . В градации 1,5–3 мм, в основном, качество радиолокационных данных не отличается для двух лет, за исключением коэффициента  $a$ . В 2017 году этот коэффициент в 2 раза больше, чем в 2016. Для осадков с  $Q_{Gmax} > 3$  по всем показателям данные, полученные в 2017 году, оказались лучше полученных в 2016. Графики (рисунок 3.1) демонстрируют большее занижение интенсивных осадков радиолокатором в 2016 году по сравнению с 2017. Коэффициент  $a$  почти в два раза ближе к 1 в 2017. Доля объясненной дисперсии больше в 2017 году. С другой стороны, в 2017 наблюдались случаи сильного завышения  $Q_R$  по сравнению с  $Q_G$ .

Таким образом, можно сказать, что радиолокационные данные сильно различаются для двух лет. Из этого следует, что для получения приемлемого поля осадков, необходимо комбинирование этих данных с наземными. Причем в данном случае будет использоваться метод интерполяции невязки. Метод Кригинг с внешним

дрейфом основывается на статистической связи между  $Q_G$  и  $Q_R$  (раздел 1.4). Эта связь, как показано выше, различна для двух лет. В дальнейшем в алгоритм расчета отражаемости также могут быть внесены изменения, поэтому КЕД можно будет использовать, только в случае если калибровка «ДМРЛ-С» останется стабильной на протяжении нескольких сезонов.

### 3.3 Анализ пространственной структуры количества осадков

Для восстановления полей осадков только на стационарным наблюдениям используются методы пространственной интерполяции. Эти методы основаны на предположении о пространственной непрерывности: в двух точках, находящихся ближе друг к другу, скорее будут близкие значения, чем в более удаленных друг от друга точках. Подчеркнем вероятностный, статистический характер этого понятия [20].

Поле осадков имеет высокую изменчивость как в пространстве, так и во времени, поэтому целесообразно применить для пространственного анализа полей осадков статистический подход. Статистический подход требует отказа от попытки отдельного рассмотрения индивидуальных свойств случайных полей. Рассматриваются лишь их статистические характеристики, которые позволяют установить общие особенности, характерные для всего набора реализаций.

В первую очередь в качестве статистических характеристик рассматривают среднее значение случайной величины и стандартное отклонение этой величины. Для всей имеющейся выборки часовых сумм осадков, измеренных pluviографами,  $\bar{Q}_G = 0,35$ ,  $\sigma(Q_G) = 1,03$  (таблица 2.1). Для более подробного анализа распределения статистических величин осадков в пространстве были построены карты (рисунок 3.2)  $\bar{Q}_G$  и  $\sigma(Q_G)$  для каждой станции.

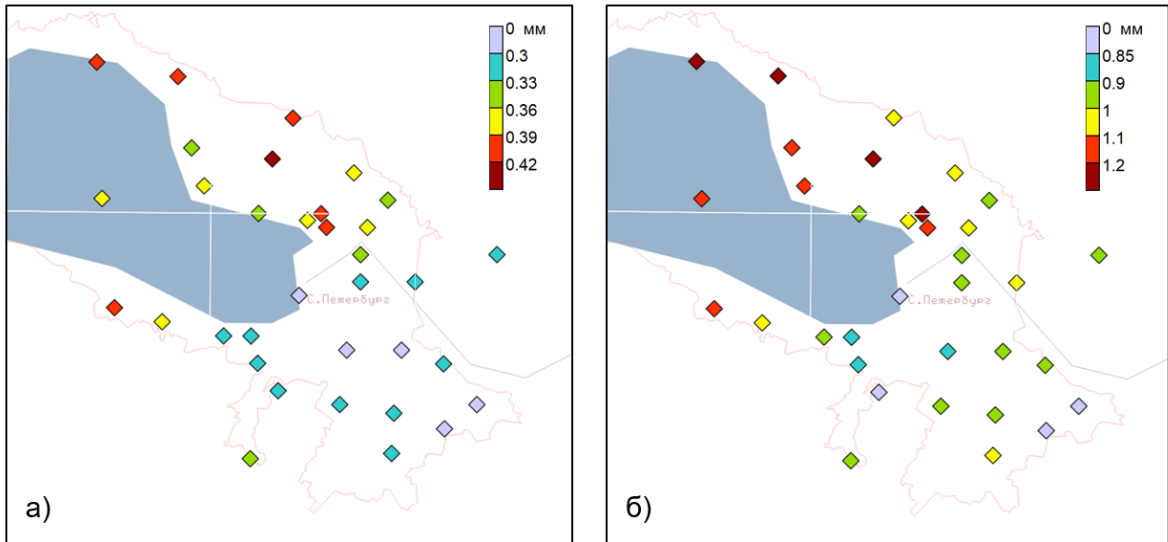


Рисунок 3.2 – Значения среднего(а) и стандартного отклонения(б) часовых сумм осадков для каждой станции

По рисунку 3.2 можно судить о степени изменчивости статистических величин количества осадков за час для данного региона. Среднее и стандартное отклонение для отдельных приборов меняется более чем на 20% относительно общего значения для всех станций. Стандартное отклонение примерно в три раза больше среднего.

В целом среднее значение количества осадков совпадает с климатическими особенностями распределения нормы осадков по территории, описанными в разделе 2.1. Можно наблюдать увеличение осадков на севере и западе города ( $\bar{Q}_G > 0,33$  мм) относительно его центральной и южной части ( $\bar{Q}_G < 0,33$  мм). На границе Ордовикского плато (юго-западная станция) заметное повышение среднего количества атмосферных осадков ( $\bar{Q}_G > 0,33$  мм).

Значение стандартного отклонения, в основном, возрастает с увеличением среднего и примерно в три раза больше  $\bar{Q}_G$ . На северных и западных станциях данный показатель в целом больше ( $\sigma(Q_G) > 1$  мм), чем на центральных и южных ( $\sigma(Q_G) < 1,1$  мм).

Для статистического описания одновременного поведения случайного поля в различных точках используются корреляционная функция [17]. Для любой пары точек  $r_i$  и  $r_k$  корреляционная функция величины  $f$  определяется по формуле:

$$\mu_f(r_i, r_k) = \frac{\overline{[f(r_i) - \bar{f}(r_i)][f(r_k) - \bar{f}(r_k)]}}{\sigma_f(r_i)\sigma_f(r_k)}, \quad (3.4)$$

где верхнее подчеркивание обозначает оператор среднее,  $\sigma_f$  – стандартное отклонение величины  $f$  в конкретной точке. Из определения корреляционной функции видно, что, при  $\mu_f=1$  существует однозначная связь между наборами данных, в случае если  $\mu_f=0$  – какая-либо связь полностью отсутствует.

По имеющемуся набору стационарных измерений часовых сумм осадков была вычислена корреляционная функция  $\mu_Q$  для всех комбинаций пар станций. На графике (рисунок 3.3) отмечены полученные значения данной функции в зависимости от расстояния между станциями  $\mu_Q(d)$ .

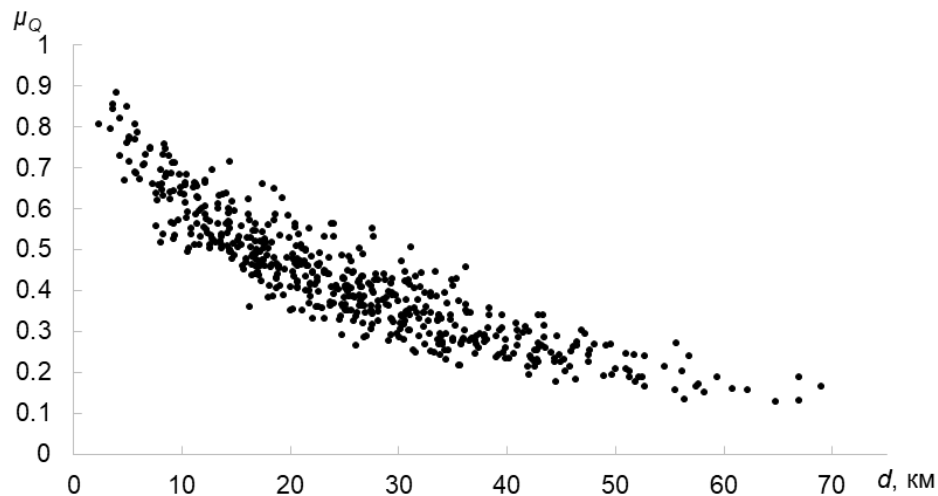


Рисунок 3.3 – Корреляционная функция количества осадков за час в зависимости от расстояния между станциями

Из рисунка 3.3 видно, что корреляционная функция имеет большой разброс, хотя, в целом, наблюдается общий тренд уменьшения  $\mu_Q$  с расстоянием. Таким образом, расстояние между станциями влияет на корреляционную функцию, хотя это

не единственный фактор. Ещё Гущиной и Каганом [19] было отмечено, что при осуществлении вычислений корреляционных функций сумм осадков приходится сталкиваться с целым рядом трудностей. При этом основную трудность представляет то, что осадки выпадают на той или иной территории, как правило, не во всех точках, а пятнами.

Распространённой оценкой изменчивости поля осадков является радиус корреляции. Радиус корреляции – это расстояние, на котором  $\mu_Q$  поля имеет ещё достоверное значение – обычно 0,5 или 0,7 [31]. По полученным функциям (рисунок 3.3) легко найти радиусы корреляции при заданных пороговых значениях корреляционной функции. Для  $\mu_Q = 0,5$  радиус корреляции получился равным 10–30 км, для  $\mu_Q = 0,7$  – 5–14 км.

Как указано в разделе 2.2 среднее расстояние между станциями сети АИС «Осадки» составляет 9,4 км. На таком расстоянии корреляционная функция точно больше 0,5. Исходя из этого можно судить о том, что поле количества часовых осадков, сгенерированное методом пространственной интерполяции по данным АИС «Осадки», должно быть приемлемого качества. С другой стороны, станции расположены не равномерно, поэтому качество интерполяции в разных областях исследуемой зоны будет разное.

Алибегова в своей работе [8] исследовала пространственную структуру полей 15-минутных сумм осадков в трех районах ливнемерных кустов: Валдайского, Велико-Анадольского и Дубровского. Наиболее близкий к Санкт-Петербургу является Валдайский, по этой причине приведем результаты исследования корреляционной функции по этому региону от расстояния для трех месяцев: июнь, июль и август 1953 г. (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Корреляционная функция 15-минутных сумм осадков для г. Валдай по данным [8]

Месяц	Расстояние, км								
	7	15	25	35	45	55	65	75	84
июнь	0,54	0,41	0,27	0,29	0,21	0,07	0,07	-0,04	-0,07
июль	0,39	0,37	0,24	0,27	0,13	0,07	-0,07	-0,12	-0,09
август	0,60	0,58	0,52	0,52	0,42	0,21	0,17	0,03	0,02

Из таблицы 3.1 можно получить радиусы корреляции со значением 0,5. Для июня – около 9 км, для августа – около 37 км. Для июля по имеющимся данным радиус корреляции не определить. Для 0,7 радиус корреляции судя по таблице 3.1 на порядок меньше 7 км. По полученным данным можно сказать, что для пространственной интерполяции поля 15-минутных сумм осадков с приемлемым качеством необходима сеть осадкомеров со средним расстоянием менее 7 км.

В работе Королькова [31] были построены зависимости корреляционной функции сумм осадков по радиолокационным данным от расстояния для территории, ограниченной 300 км радиусом относительно г. Москвы. Исследование проводилось для суточных (летних и зимних), пятидневных и декартовых сумм осадков. Для всех промежутков времени суммирования получены радиусы корреляции при пороговом значении 0,5 и 0,7. В частности, для суточных сумм в летний период радиус корреляции для 0,5 получился равным 25–40 км, а для 0,7 – 5–15 км. Недостатком работы является то, что для построения корреляционной функции использовались радиолокационные данные, которые являются косвенным измерителем характеристик осадков и подвержены искажениям (раздел 1.3). Несмотря на это, если анализировать радиусы корреляции в работе Королькова и в данном исследовании, то можно сказать, что суточные данные по сравнению с часовыми имеют меньший разброс радиусов корреляции и корреляционная функция для суточных данных убывает с расстоянием

медленнее, чем для часовых. Таким образом, для интерполяции часовых сумм осадков по сравнению с суточными необходима более плотная сеть.

По сравнительному анализу радиусов корреляции сумм осадков можно сделать вывод, что имеющейся плотности сети плювиографов АИС «Осадки» недостаточно для интерполяции 15-минутных сумм осадков, но для часового и более периода накопления осадков данная сеть может быть использована.

### **3.4 Методы пространственной интерполяции**

С помощью интерполяции оценивается пространственное распределение какой-либо величины на основе значений этой величины, измеренных в ограниченном числе точек.

Существует несколько подходов к анализу и обработке пространственно-распределенных данных, которые можно условно разделить на две группы [20]:

- детерминистические модели (интерполяторы) — используется «формульная» зависимость искомой величины от расстояния до станции измерения;
- геостатистические — модели, базирующиеся на статистической интерпретации данных.

В данной работе использовались только детерминистические интерполяторы. Это связано с тем, что геостатистические интерполяторы основаны на использовании знаний о пространственной корреляции экспериментальных данных и используются если математическое ожидание случайной величины одинаково для всей исследуемой области [20]. Как показано в разделе 3.3 корреляционная функция имеет большой разброс, а среднее значение количества осадков меняется для разных станций почти на 20%. Возможно, накоплено не достаточное количества данных, чтобы можно было строить статистические модели поля количества осадков.

Подробнее с методами пространственной интерполяции можно ознакомиться в пособии по построению моделей пространственных переменных [39] и в работе



Демьянова и Савельевой [20]. Ниже приведены алгоритмы, которые использовались в настоящей работе с описанием выбора параметров этих методов.

*Метод обратных расстояний(ОР)*

В качестве оценки переменной  $Z$  в некоторой точке исследуемой области этот метод использует среднее взвешенное значений переменной  $Z$  в выборочных точках:

$$\hat{Z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i0} \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n w_{i0}}, \quad (3.5)$$

где  $w_{i0}$  – вес  $i$ -ой точки данных при оценке значения  $Z$  в точке  $(X_0, Y_0)$ .

Метод обратных расстояний работает в предположении, что экспериментальные значения, измеренные близко от интерполируемого местоположения, оказывают большее влияние на результат оценки, чем удаленные от него на значительное расстояние. Следовательно, точки выборки, расположенные ближе всего к точке, где делается оценка, должны иметь больший вес; вес выборочных точек должен уменьшаться с увеличением расстояния от интерполируемого местоположения.

Весы для данного метода задаются следующим образом:

$$w_{i0} = \frac{1}{\left(\sqrt{d_{i0}^2 + \delta^2}\right)^\beta}, \quad (3.6)$$

где  $d_{i0}$  – расстояние между точкой  $(X_0, Y_0)$ , где вычисляется оценка (например, узлом регулярной сетки), и  $i$ -ой точкой измерения;  $\delta$  – параметр сглаживания;  $\beta$  – степенной параметр.

Степенной параметр  $\beta$  определяет, как быстро будет уменьшаться вес с увеличением расстояния. В данном исследовании проверялись  $\beta = 1, 3$  и  $5$ .

Параметр сглаживания  $\delta$  позволяет учитывать фактор «неточности» данных. Если  $\delta = 0$ , то метод работает как точный интерполятор. То есть в любой выборочной точке вычисленная оценка будет равна измеренному значению. В настоящем

исследовании  $\delta = 0$ , т. е. предполагалось, что данные имеют незначительную погрешность измерений.

*Метод локальных полиномов(ЛП)*

Этот метод использует кусочно-полиномиальное интерполирование. Он строит полиномиальную регрессию  $Z$  на  $X, Y$  не по всем опорным точкам, а только по влияющим. Для определения влияющих точек в данном исследовании использовался способ, который основывается на поиске влияющих точек с помощью эллипса с центром в заданной точке области исследования и радиусом  $R$ .

В соответствии с Рекомендациями [41] для интерполяции метеорологической информации в данном исследовании использовался полином 1-ой степени:

$$Z = A \cdot X + B \cdot Y + C. \quad (3.7)$$

Для определения коэффициентов полинома применяется метод наименьших квадратов.

Радиус эллипса были взяты так, чтобы для каждой точки, где восстанавливалось поле в поисковый эллипс попадало хотя бы 3 опорные станции (минимальное необходимое количество точек для построения плоскости). В результате сравнивались значения радиуса  $R$  от 22 до 28 км с шагом 2 км.

*Триангуляция Делоне(ТД)*

В данном методе исследуемая область разбивается на совокупность треугольников. Вершинами треугольников являются соседние точки выборки; точки соединяются таким образом, что ребра треугольников не пересекаются. Внутри окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из точек триангуляции.

Для оценки переменной  $Z$  в некоторой точке  $(X_0, Y_0)$  области исследования сначала определяется, в какой треугольник она попала.

Пусть интерполируемая точка попала в треугольник, образованный выборочными точками с координатами  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$  и  $(X_3, Y_3)$ . Тогда в трехмерном

$(X, Y, Z)$  пространстве строится плоскость, проходящая через точки с координатами  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Y_2, Z_2)$  и  $(X_3, Y_3, Z_3)$ . Уравнение плоскости:

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d = 0, \quad (3.8)$$

где коэффициенты могут быть найдены по известным формулам.

Оценкой переменной  $Z$  в точке  $(X_0, Y_0)$  будет соответствующее значение на этой плоскости (рисунок 3.4):

$$\hat{Z}_0 = \frac{-a \cdot X_0 - b \cdot Y_0 - d}{c}. \quad (3.9)$$

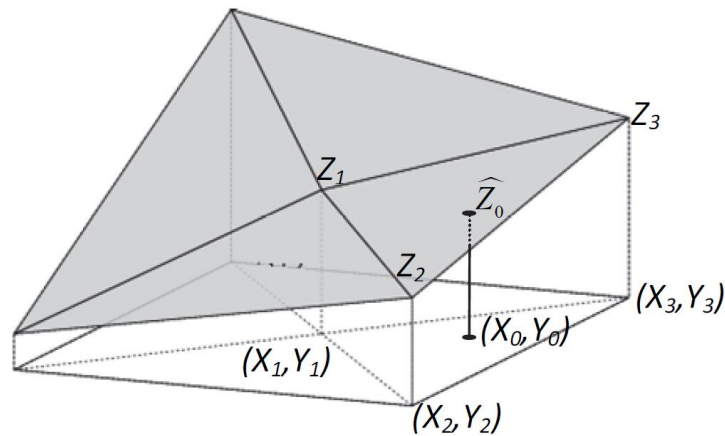


Рисунок 3.4 – Демонстрация работы метода триангуляция Делоне

Метод точно воспроизводит значения в выборочных точках, то есть является точным интерполятором.

#### *Метод радиальных базисных функций (РБФ)*

В этом методе оценка переменной  $Z$  в произвольной точке области исследования находится как линейная комбинация значений радиальных базисных функций:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(d_{i0}), \quad (3.10)$$

где  $d_{i0}$  – расстояние между точкой, где вычисляется оценка, и  $i$ -ой точкой измерения;  $\lambda_i$  – коэффициент  $i$ -ой выборочной точки;  $B()$  – радиальная базисная функция, аргументом которой является расстояние  $d_{i0}$ .

Существует несколько разновидностей РБФ; в данном исследовании сравнивались три типа:

– мультиквадратическая(м)

$$B(d) = \sqrt{d^2 + R^2}, \quad (3.11)$$

– обратная мультиквадратическая(ом)

$$B(d) = \frac{1}{\sqrt{d^2 + R^2}}, \quad (3.12)$$

– кубический сплайн(кс)

$$B(d) = (d^2 + R^2)^{3/2}, \quad (3.13)$$

где  $d$  – расстояние (с учетом анизотропии) от точки интерполяции до выборочной точки,  $R$  – параметр сглаживания.

Каждая базисная функция имеет различную форму и позволяет получать разные интерполированные поверхности. Наиболее часто используется мультиквадратичная функция, которая, по мнению многих, является наилучшей с точки зрения построения гладкой поверхности, проходящей через экспериментальные точки. Для параметра сглаживания  $R$  нет общих рекомендаций по выбору оптимального значения; разумные значения этого параметра находятся в интервале от среднего расстояния между точками выборки до половины этого среднего. Среднее расстояние между опорными станциями – 9,3 км. При исследовании использовались значения  $R$  от 3,5 до 9,5 км с шагом 2 км.

Коэффициенты  $\lambda_i$  получают на основе решения системы  $n$  уравнений, которые составляются из условия точной интерполяции – прохождения выходной поверхности через значения  $Z$  в  $n$  выборочных точках.

### 3.5 Восстановление полей количества осадков по данным pluviографов

Для восстановления полей количества осадков только по данным стационарных измерений в данном исследовании проведено сравнение различных методов пространственной интерполяции (раздел 3.4) методом перекрестной проверки (раздел 3.1). Статистические отклонения интерполируемых полей и их регрессионные модели представлены в Приложении Б.

Среди всех интерполяторов можно выделить три, при которых восстановленные осадки оказались наиболее близкими к измеренным для всех видов осадков. Это метод Обратных расстояний со степенным параметром  $\beta = 3$  и два метода Радиальных базисных функций с обратной мульткватратической функцией и параметром сглаживания  $R = 3,5$  и  $5,5$ . Эти методы по сравнению с другими имеют наименьшие значения  $RMSE$  и  $MAE$  и наибольшее  $R^2$ .

Для этих интерполяторов были построены гистограммы статистических характеристик оценки качества восстановления поля из раздела 3.1 (рисунок 3.5). На рисунке 3.6 с помощью линейной регрессии показаны зависимости между значениями количества осадков по pluviографам и восстановленные выбранными интерполяторами для всей имеющейся выборки.

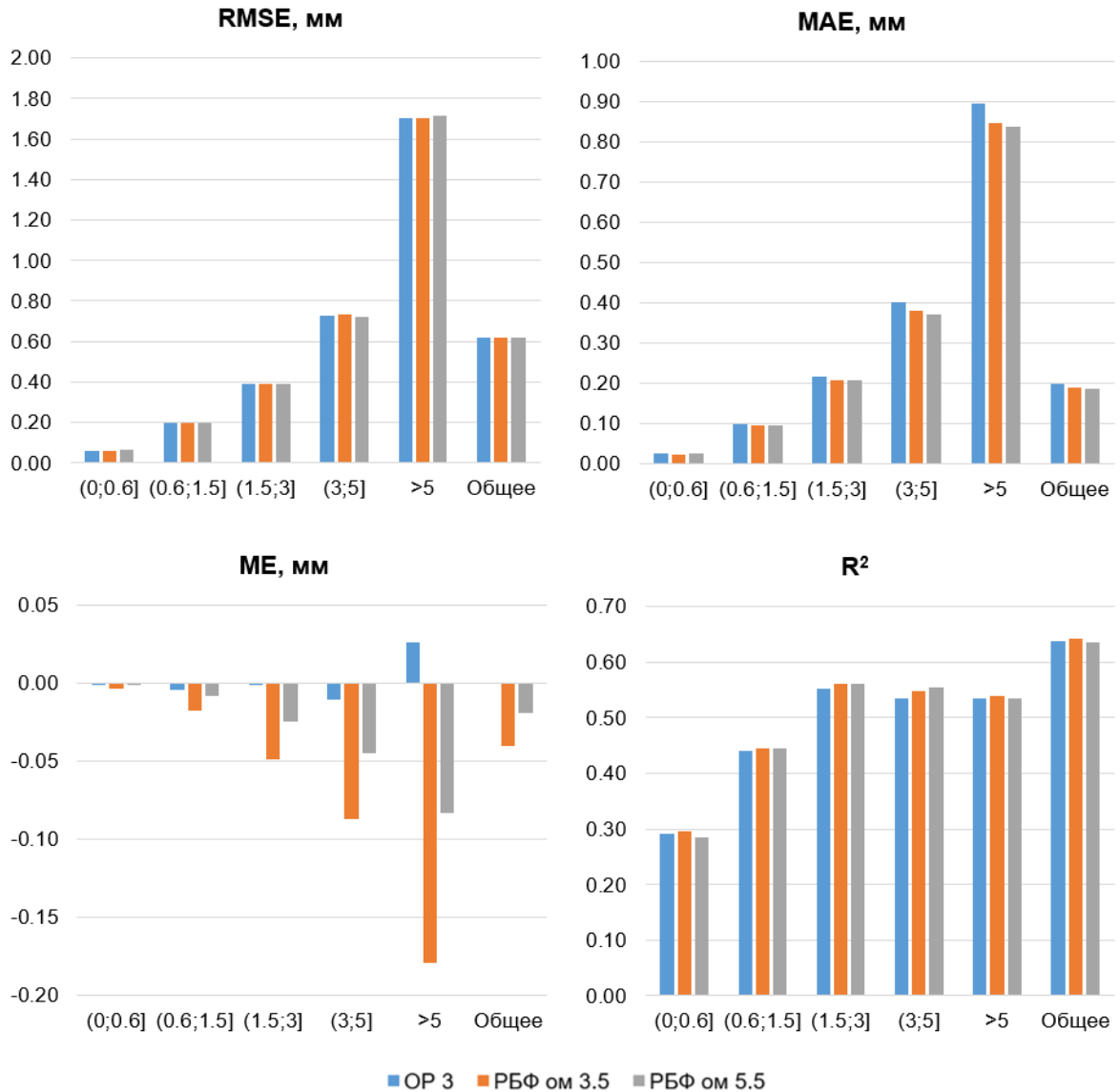


Рисунок 3.5 – Гистограммы сравнения трех методов пространственной интерполяции количества осадков за час для пяти интервалов  $Q_{max}$  и для всей выборки

Показатель  $RMSE$  для всех трех методов примерно одинаковый. Если рассматривать  $MAE$ , то здесь наименьшее значение у РБФ ом 5,5. При сравнении смещения  $ME$ , можно выделить OP 3, у этого метода наименьшее смещение. Если рассматривать всю выборку  $R^2$  наибольшее при использовании метода РБФ ом 3,5. Таким образом по анализу гистограмм все методы имеют свои преимущества и сложно выделить один наиболее подходящий для заявленной цели.

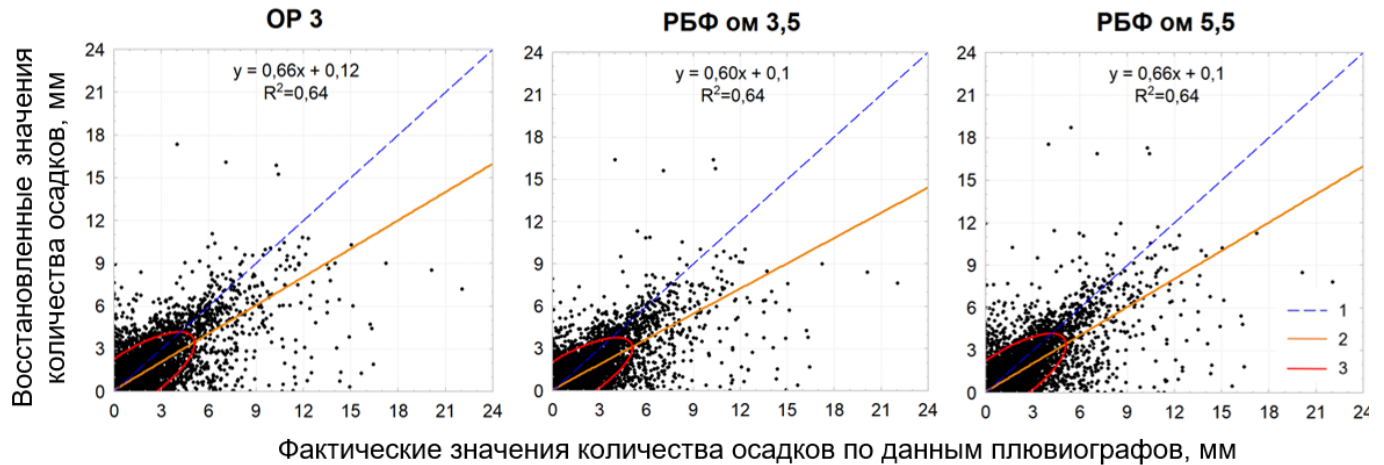


Рисунок 3.6 – Сравнение фактических значений количества осадков и восстановленных тремя интерполяторами.

1 – биссектриса  $\hat{Q} = Q_G$ ; 2 – линейная регрессия; 3 – 95% процентов точек с  $Q_G > 0,1$  мм

Модели регрессии у трех методов похожи, но можно выделить метод РБФ ом 5,5 у которого уравнение прямой наиболее близкое к  $\hat{Q} = Q_G$ .

Таким образом, метод Радиальных базисных функций с обратной мульткватратической функцией и параметром сглаживания  $R = 5,5$  выбран для восстановления осадков только по данным pluвиографов.

Приведем работы по сравнению методов интерполяции сумм осадков. В работе [73] проводилась интерполяция часовых, суточных, месячных и годовых осадков с помощью сети из 8, 11 и 13 осадкомеров на острове Норфолк (площадь 35 км<sup>2</sup>) в Тихом океане. В исследовании было показано: метод Кригинг плохо работает с сетью, у которой высокое пространственное разрешение; метод полигонов Тиссена, очевидно обеспечивает нереалистичное прерывистое поле осадков; метод Обратных расстояний оказался наиболее подходящим для данного случая. В другой работе [84] проведен сравнительный анализ методов интерполяции суточных сумм осадков в районе города Брисбена (Австралия) с площадью 15800 км<sup>2</sup>. Для сравнения были взяты ОР, Метод минимальной кривизны или тонкого сплайна [39] и Простой

Кригинг. Авторы пришли к выводу, что для небольшого городского водосбора Брисбена метод ОР оказался наиболее точным и надежным методом интерполяции.

### 3.6 Анализ пространственной структуры невязки радиолокационных и станционных оценок осадков

В разделах 1.4 и 3.2 приведено обоснование выбора метода интерполяции невязки для задачи комбинирования радиолокационных и наземных измерений. По аналогии с предварительным анализом пространственной структуры количества осадков (раздел 3.3), в данном разделе описан анализа пространственной структуры невязки  $E$  для оценки возможности её интерполяции. Для этой задачи по всем станциям были получены статистические характеристики этой случайной величины: среднее и дисперсия отдельно для 2016 и 2017 года (рисунок 3.7).

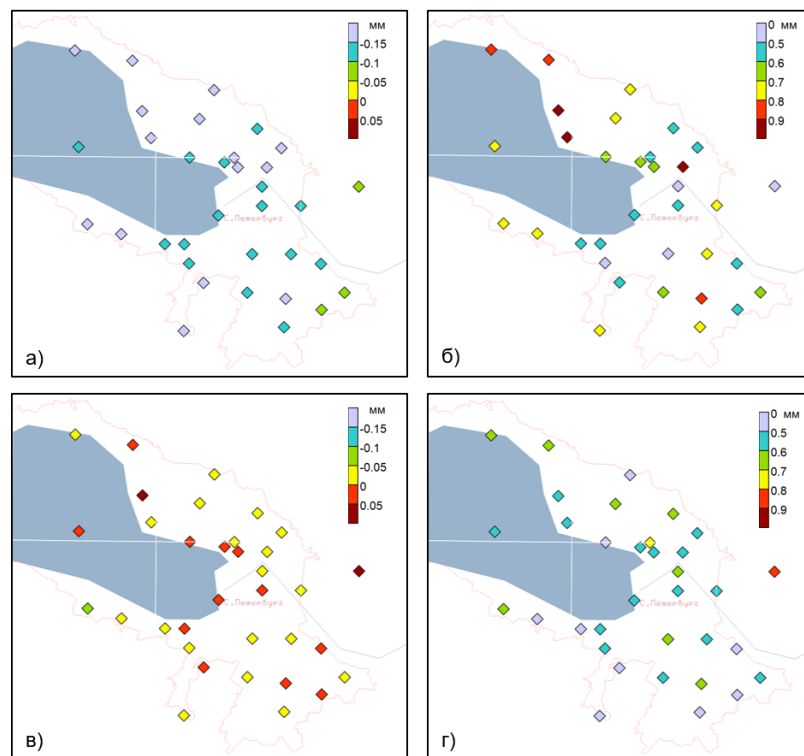


Рисунок 3.7 – Значения среднего(а и в) и стандартное отклонение (б и г) невязки для каждой станции за 2016 год (а и б) и 2017 год (в и г)



Если сравнивать невязки, полученные за 2016 год (рисунок 3.7 а и б) и за 2017 год (рисунок 3.7 в и г), то видно что в 2016 радиолокационные оценки осадков для всей территории были занижены более чем на 0,05 мм. При этом в 2017 году, почти по всем станциям, средняя абсолютная разница между радиолокационными и наземными оценками количества осадков не превышает 0,05 мм. Стандартное отклонение в целом уменьшилось в 2017 году по сравнению с 2016. В 2017 за исключением 2 станций  $\sigma(E) < 0,7$  мм. В 2016 почти у половины станций  $\sigma(E) > 0,7$  мм. Эти результаты соответствуют полученным ранее моделям регрессии  $Q_R(Q_G)$  в разделе 3.2.

Как и в разделе 3.4, для статистического описания одновременного поведения поля невязки в различных точках был построен график зависимости корреляционной функции от расстояния  $\mu_E(d)$  (рисунок 3.8).

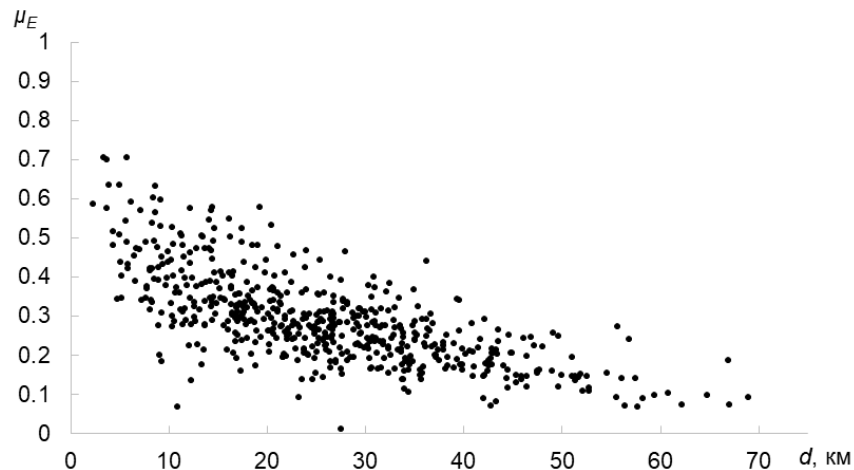


Рисунок 3.8 – Корреляционная функция невязки в зависимости от расстояния между станциями

Как видно по графику корреляционная функция имеет больший разброс, чем количество осадков за час. При этом  $\mu_Q$  достигает максимального значения 0,9, а  $\mu_E$  только 0,7. Радиусы корреляции получились: для уровня 0,5 5–20 км, для 0,7 – 3–6 км. Можно сказать, что значения невязки менее коррелируемы в пространстве чем значения количества осадков.

Исходя из того, что среднее расстояние между станциями 9,4 км (раздел 2.2), поле невязки радиолокационных и станционных данных может быть интерполируемо с приемлемым качеством в большинстве случаев. С другой стороны, качество интерполяции будет зависеть от плотности плювиографов в каждой части исследуемой области.

### **3.7 Восстановление полей количества осадков комбинированным методом**

В настоящем исследовании будет использоваться метод интерполяции невязки для комбинирования данных плювиографов и данных «ДМРЛ-С», потому что этот метод эффективен в плане вычисления и имеет удовлетворительную погрешность (раздел 1.4). К тому же, данный метод не зависит от изменений, вносимых в калибровку МРЛ, что актуально для сети «Штурмооповещения», которая в настоящий момент обновляется за счет радиолокаторов «ДМРЛ-С» на территории России [24].

В качестве интерполяторов невязки будут использоваться детерминистические методы, представленные в разделе 3.4. Это связано с тем, что геостатистические интерполяторы основаны на использовании знаний о пространственной корреляции экспериментальных данных и используются если математическое ожидание случайной величины одинаково для всей исследуемой области [20]. Как показано в разделе 3.6 корреляционная функция невязки имеет большой разброс, а среднее значение значительно поменялось в 2017 году по сравнению с 2016.

Радиолокационные поля осадков для данного метода получены с использованием коэффициентов  $Z-I$  соотношения, выбранных в разделе 3.2.

В приложении В представлены таблицы статистические оценки качества восстановления полей осадков методом интерполяции невязки для разных интерполяторов. Здесь можно выделить те же методы интерполяции, что и в разделе 3.5: ОР 3, РБФ ом 3,5 и РБФ ом 5,5. Эти методы по сравнению с другими имеют

наименьшие значения  $RMSE$  и  $MAE$ , наиболее близкие к 0 значения  $ME$  и наибольшее  $R^2$ . Гистограммы статистических характеристик этих методов восстановления показаны на рисунке 3.9.

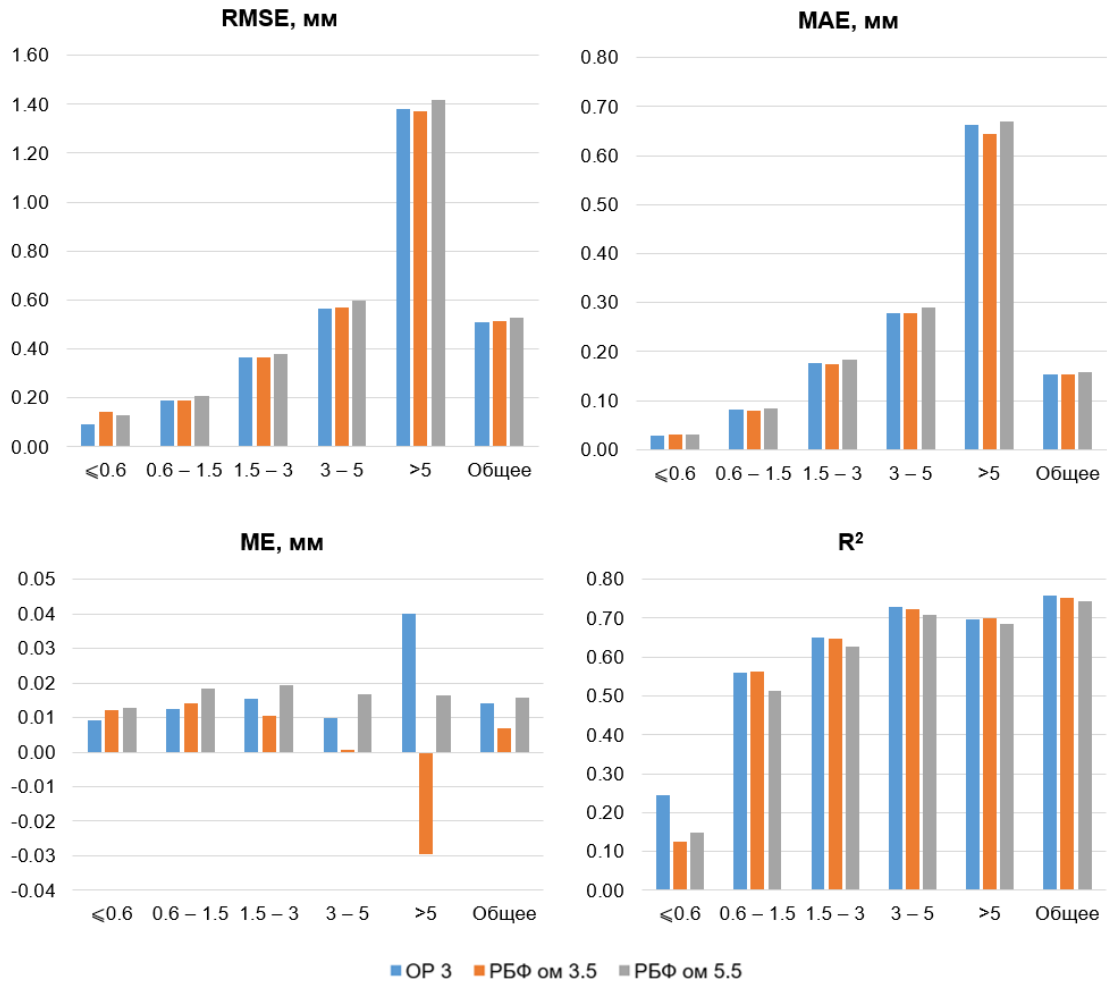


Рисунок 3.9 – Гистограммы сравнения трех методов пространственной интерполяции невязки для пяти интервалов  $Q_{max}$  и для всей выборки

При анализе полученных гистограмм можно сделать следующие выводы. Наименьшее среднеквадратическое и среднее абсолютное отклонение имеют методы OP 3 и РБФ ом 3,5. Объясненная дисперсия  $R^2$  у этих методов примерно одинаковая и больше, чем у РБФ ом 5,5. РБФ ом 3,5 имеет наименьшее смещение  $ME$ .

Линейная регрессия исследуемых интерполяторов невязки представлена на рисунке 3.10.

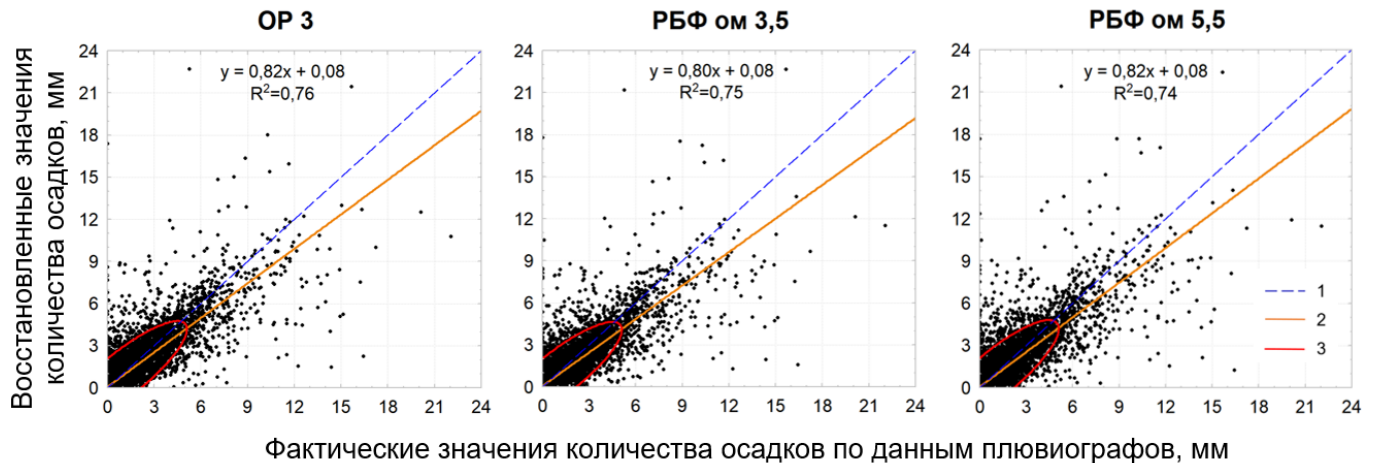


Рисунок 3.10 – Сравнение фактических значений количества осадков и восстановленных методом интерполяции невязки тремя интерполяторами.

1 – биссектриса  $\hat{Q} = Q_G$ ; 2 – линейная регрессия; 3 – 95% процентов точек с  $Q_G > 0,1$  мм

Из анализа линий регрессии видно, что у метода РБФ ом 5,5 прямая ближе всего к  $y=x$ , но у этого метода наименьшее  $R^2$ . Из двух оставшихся методов у ОР 3 коэффициент регрессии А ближе к 1.

Несмотря на то, что регрессионная модель ОР 3 ближе к  $y=x$ , для интерполяции невязки в дальнейшем будет использоваться метод РБФ ом 3,5. Этот метод имеет наименьшее смещение  $ME$  в общем случае. Важным фактором является также то, что метод РБФ ом 3,5 для наиболее интенсивных осадков ( $Q_{max} > 5$  мм/ч) имеет наименьшие отклонения  $RMSE$  и  $MAE$  по сравнению с ОР 3.

## Глава 4. Сравнительный анализ методов

### 4.1 Сравнение статистических характеристик методов восстановления поля количества осадков

По имеющимся данным восстановить поле количества осадков можно тремя способами: радиолокационным методом, методом пространственной интерполяции данных на станциях и комбинированием радиолокационных и наземных измерений.

В третьей главе были подобраны оптимальные параметры этих методов восстановления поля часовых сумм осадков для района Санкт-Петербурга. В этом разделе проведен сравнительный анализ качества методов.

На рисунке 4.1 показаны точечные графики сравнения восстанавливаемых и измеренных значений количества осадков для всей выборки, проведены линии регрессии и также отмечена изолиния 95% точек для  $Q_G > 0,1$  мм.

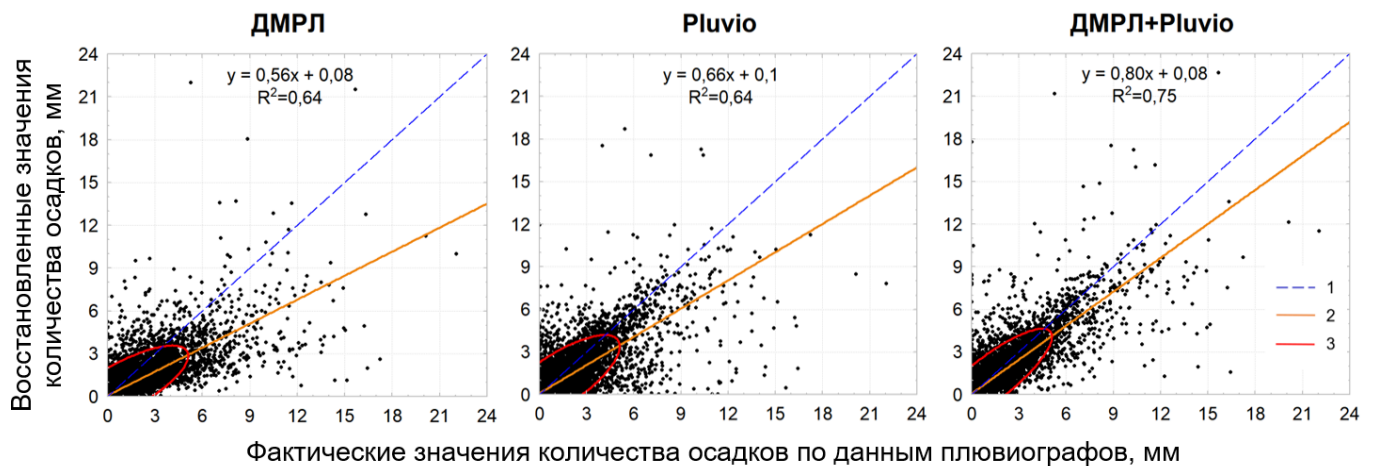


Рисунок 4.1 – Сравнение фактических значений количества осадков и восстановленных тремя основными методами.

1 – биссектриса  $\hat{Q} = Q_G$ ; 2 – линейная регрессия; 3 – 95% процентов точек с  $Q_G > 0,1$  мм

Точечный график, полученный по радиолокационному методу (рисунок 4.1), имеет два тренда, которые объясняются разными алгоритмами калибровки в 2016 и 2017 годах (раздел 3.2). При интерполяции осадков восстановленные значения часто оказываются недооцененными. Использование комбинированного метода позволяет уменьшить разброс точек относительно биссектрисы  $\hat{Q} = Q_G$ , и устранить проблемы двух других методов.

Для сравнения методов восстановления поля осадков были построены гистограммы статистических характеристик (рисунок 4.2), приведенных в разделе 3.1.

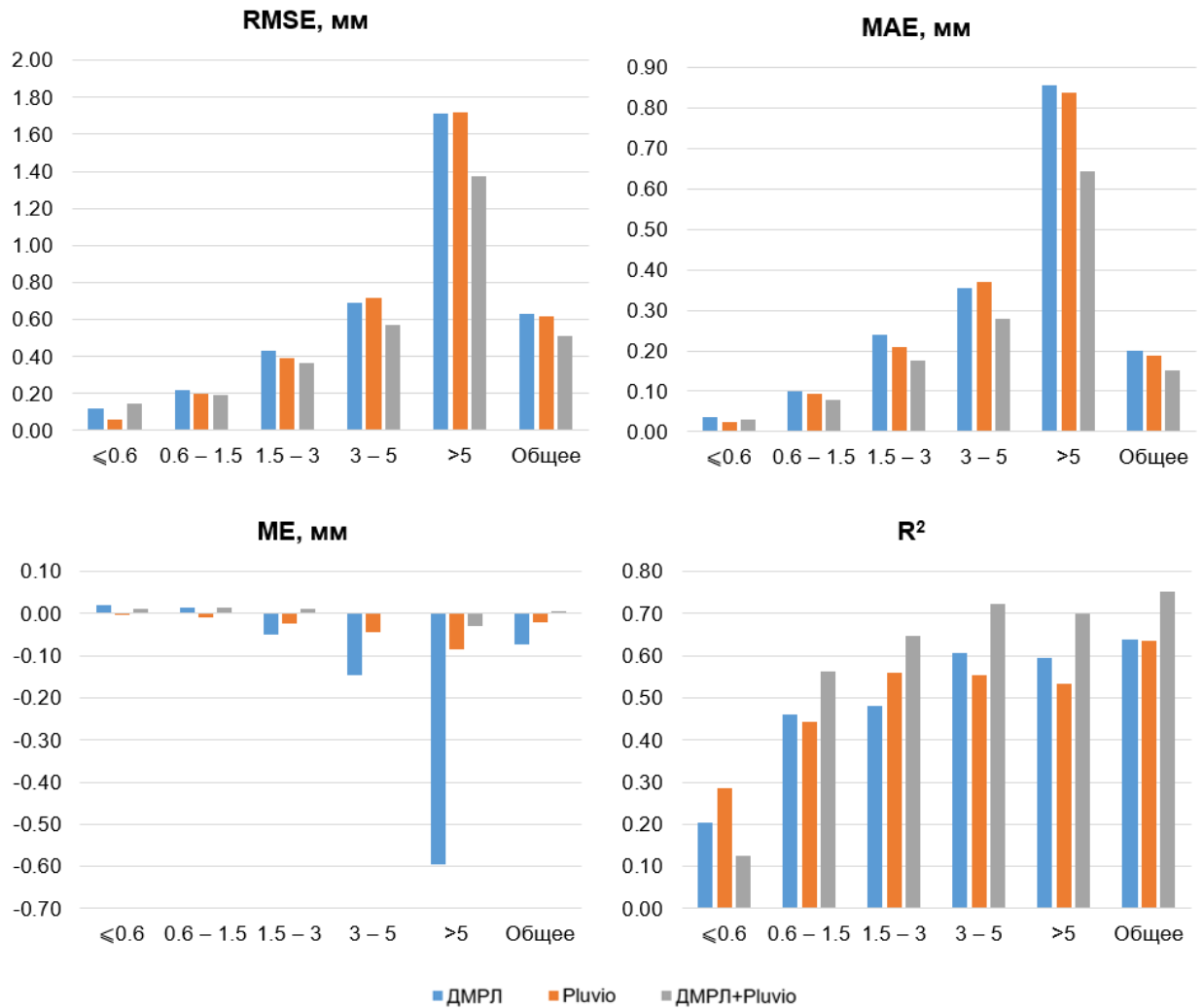


Рисунок 4.2 – Гистограммы сравнения трех основных методов восстановления поля часовых сумм осадков для пяти интервалов  $Q_{max}$  и для всей выборки

Из гистограмм (рисунок 4.2) видно, что для всей выборки комбинированный метод оказался значительно лучше радиолокационного и интерполяции осадков по всем показателям. Так, если интерполяция осадков по сравнению с радиолокационным методом уменьшает  $RMSE$  всего на 1% и  $MAE$  на 5%, то использование комбинированного метода приводит к улучшению  $RMSE$  на 18% и  $MAE$  на 23%. Среднее отклонение  $ME$  у этого метода ближе всего к 0. Комбинированный метод также увеличивает значение объясненной дисперсии  $R^2$  на 18% по сравнению с двумя другими методами.

Если сравнивать методы для различных интервалов  $Q_{max}$ , то можно заметить, что для осадков  $<0,6$  мм метод интерполяции осадков работает лучше остальных по всем показателям. Начиная с интервалов  $>0,6$  мм поле, восстановленное комбинированным методом, становится наиболее качественным и увеличивает свое преимущество с ростом  $Q_{max}$ . Таким образом, можно сделать вывод, что преимущества комбинированного метода проявляются для осадков средней и высокой интенсивности, а для слабых осадков можно обойтись методом интерполяции количества осадков по измерениям плевниографов.

Для сравнения показателей качества работы методов восстановления поля осадков за 2016 и 2017 года были построены гистограммы, которые представлены на рисунке 4.3.

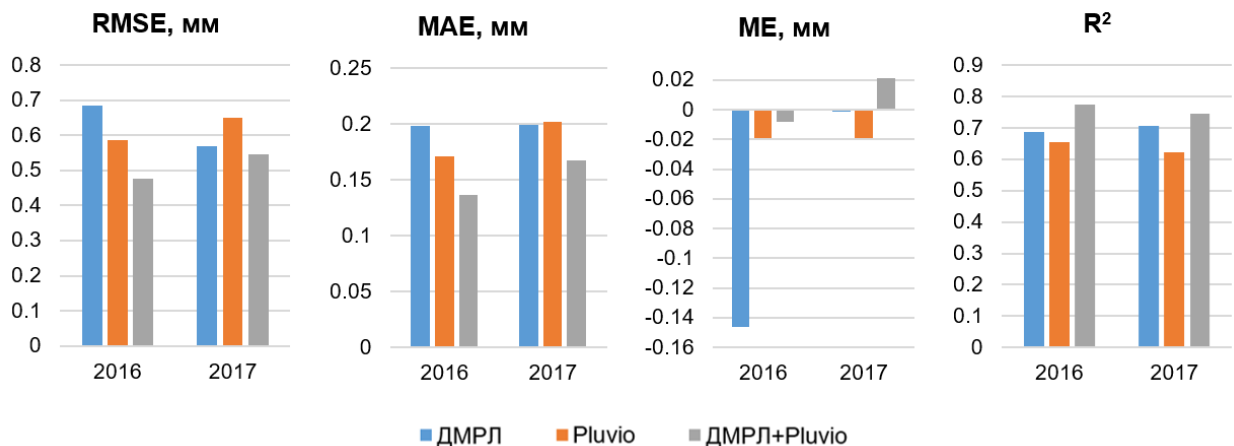


Рисунок 4.3 – Гистограммы сравнения трех основных методов восстановления поля количества часовых сумм осадков для 2016 и 2017 года

Из гистограмм (рисунок 4.3) следует, что по всем показателям комбинированный метод имеет преимущество, как в 2016, так и в 2017 году. Исключение составил показатель  $ME$  в 2017 году. Можно заметить, что этот показатель для комбинированного метода зависит от  $ME$  радиолокационного метода. При отрицательном смещении радиолокационного метода относительно наземных измерений в 2016 году, комбинированный метод имел нулевое смещение. Когда, в

2017 году смещение радиолокационного метода получилось нулевым, смещение комбинированного метода стало положительным. При этих изменениях, смещение метода интерполяции осадков не изменилось. Таким образом, можно сказать, что за два года комбинированный метод лучше двух остальных работает в плане близости восстановленных и фактических значений количества осадков, но при этом среднее завышение или занижение восстановленных значений зависит от калибровки радиолокатора.

Сравним полученные результаты с работами других авторов. Очень мало работ посвящены комбинированию радиолокационных и станционных данных для восстановления поля с часовым периодом накопления осадков. В одной из таких работ [100] использовался Кригинг с внешним дрейфом (раздел 1.4) для восстановления полей часовых осадков со средним более 1 мм на территории 125 км вокруг немецкого города Уммендорф за 2000–2005 г. Всего на данной территории находилось 21 плювиограф с записью значений количества осадков в оперативном режиме. Особенность данной работы заключается в том, что при моделировании осадков в качестве дополнительных предикторов использовались рельеф и данные суточных осадкомером с более плотной сетью. В данной работе осадки, полученные радиолокационным методом оказались значительно более заниженными к наземным измерениям, чем в настоящей работе,  $ME = -1,112$  мм. Такая разница в оценках осадков радиолокаторами можно объяснить различной калибровкой, тем, что в работе [100] исследуются осадки на большем удалении от МРЛ, а также в этой работе территория имеет более сложный рельеф с максимальной высотой над уровнем моря около 1000 м. В этой работе использовался  $RMSE$ , нормированное по среднему значению количества станционных осадков за час и для радиолокационного метода  $\frac{RMSE}{\bar{Q}_G} = 1.148$ . В работе показано, что для жидких осадков метод KED по сравнению с радиолокационным имеет  $\frac{RMSE}{\bar{Q}_G}$  на 29% меньше и  $ME = -0,005$ , в то время как при интерполяции станционных осадков методом Простого Кригинга  $RMSE$  уменьшилось



лишь на 6% и  $ME = -0,051$ . В нашей работе за счет комбинирования  $RMSE$  уменьшилось на 21%, но сравнение проводить сложно, так как в исследовании [100] брались осадки с достаточно большой интенсивностью ( $\bar{Q}_G > 1$  мм) и использовалась другая характеристика для оценки среднеквадратической невязки.

В другой работе [91] сравнивались методы восстановления полей часовых осадков на территории Швейцарии с площадью 41285 км<sup>2</sup> в 2008 году. В исследовании использовались данные трех МРЛ и 75 автоматических датчиков дождя. При расчёте  $RMSE$  в этой работе использовались не прямые фактические и восстановленные значения количества осадков, а их квадратные корни. Также, брались только пары с  $Q_G > 0,5$  мм. В результате  $RMSE$  для радиолокационного метода оказалось равным 0,61, комбинирование методом KED привело к уменьшению  $RMSE$  на 36%, в то время как интерполяция методом Простого Кригинга только на 16%. Проведем расчёт  $RMSE$  таким же методом для нашей выборки.  $RMSE$  радиолокационного поля получился равным 0,46, комбинирование привело к уменьшению этого показателя на 32%, интерполяция на 2%.

Полученные в нашей работе оценки качества восстановления поля количества осадков за час в целом согласуются с результатами зарубежных авторов, хотя в нашем распоряжении имелась более плотная сеть осадкомеров. Если в нашей работе среднее расстояние между приборами 9,4 км (раздел 2.2), то в работе [100] – 41 км, а в [91] – 23 км. Таким образом, геостатистический метод KED может восстанавливать качественное поле количества осадков с высоким временным разрешением на редкой сети. В нашем случае имеется неоднородный ряд радиолокационных данных, поэтому использовался метод интерполяции невязки, который имеет удовлетворительное качество восстановления поля осадков.

## 4.2 Анализ отдельных случаев

Для детального сравнительного анализа работы методов рассмотрены конкретные случаи выпадения дождя, которые наблюдались в районе Санкт-Петербурга. Было выбрано 6 различных синоптических ситуаций в 2017 году, когда радиолокационные данные были более качественными (раздел 3.2). За каждый случай восстановлено поле количества осадков за час тремя основными методами.

Для каждого случая по данным плувиографов были рассчитаны следующие статистические характеристики (таблица 4.1): среднее  $\bar{Q}_G$ , медиана  $Me(Q_G)$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma(Q_G)$ , коэффициент вариации  $C_V(Q_G)$  и максимальное количество осадков  $Q_{Gmax}$ .

Таблица 4.1 – Статистические характеристики количества осадков для рассматриваемых случаев

Случай	День, месяц, время (BCB)	$\bar{Q}_G$ [мм]	$Me(Q_G)$ [мм]	$\sigma(Q_G)$ [мм]	$C_V(Q_G)$	$Q_{Gmax}$ [мм]
Циклоническая депрессия	31 мая 01:00	0,26	0,2	0,23	87%	0,88
Фронт окклюзии	25 июня 05:00	0,42	0,1	0,55	133%	1,65
Теплый фронт	23 августа 00:00	0,42	0,3	0,45	109%	2,22
Холодный фронт	13 августа 09:00	0,78	0	1,79	229%	7,36
Внутримассовые осадки	26 июня 11:00	0,90	0,4	1,07	119%	3,56
Центр циклона и точки окклюзии	24 августа 13:00	3,67	2,8	2,69	73%	11,47

Далее подробно будет рассмотрен каждый случай с анализом полученного поля количества осадков за час, восстановленного каждым методом.

*Циклоническая депрессия.* Погода в Санкт-Петербурге определялась южной частью двухцентральной циклонической депрессии. В 12:00 BCB через Санкт-Петербург с запада на восток смещался фронт окклюзии со скоростью  $\approx 35$  км/ч.

Наблюдалась слоистая облачность со слабыми осадками обложного характера (слабый дождь, морось). За день (с 06:00 ВСВ до 18:00 ВСВ) выпало 1–4 мм жидких осадков (за 12 часов). Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.4.

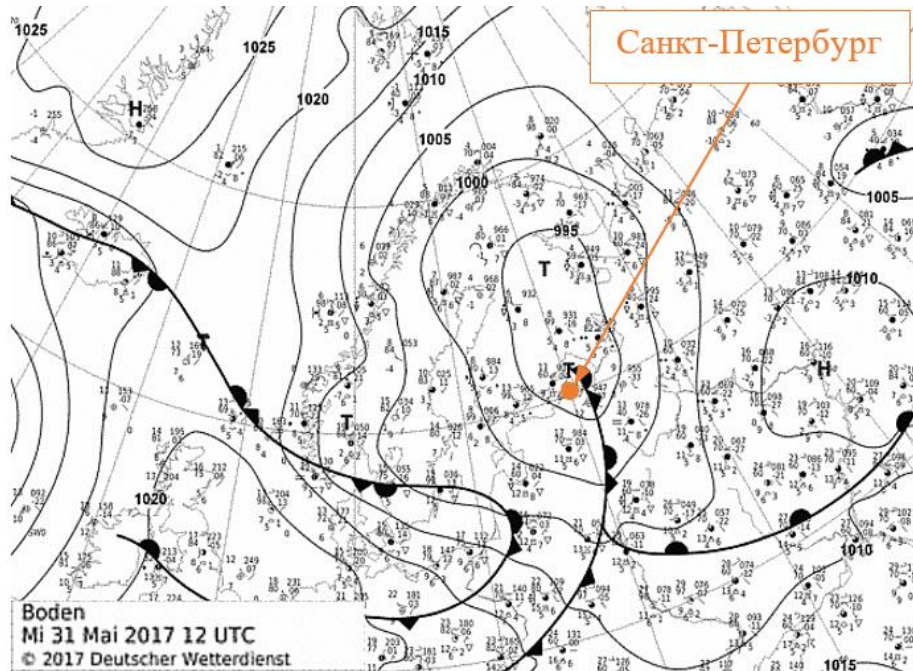


Рисунок 4.4 – Приземная синоптическая карта в 12:00 ВСВ 31 мая 2017 г.

На рисунке 4.5 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.2 для оценки качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

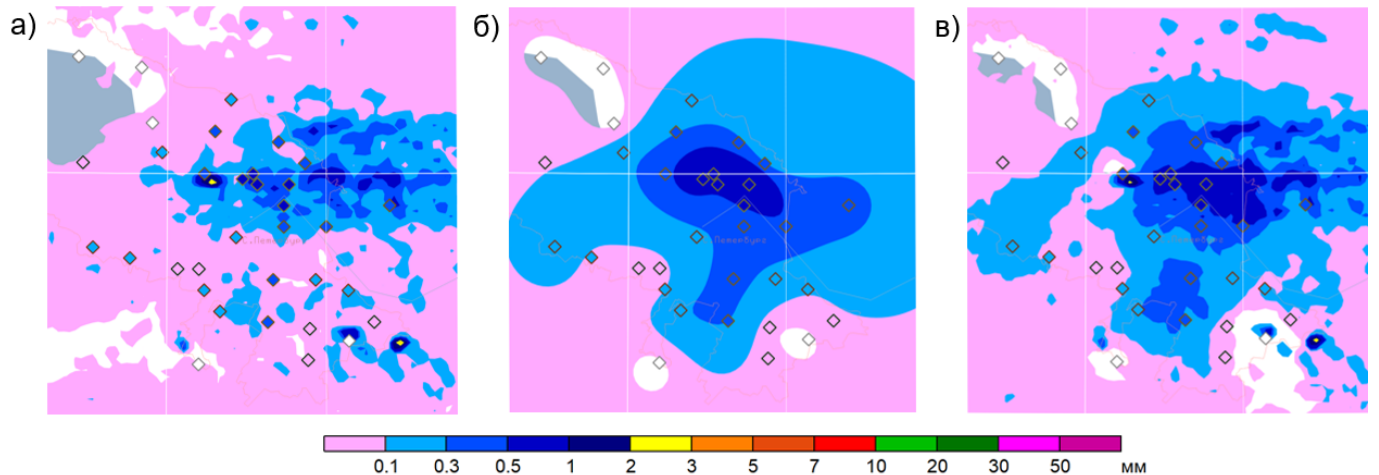


Рисунок 4.5 – Восстановленное поле количества осадков за 31 мая 15:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.2 – Значения статистических характеристик поля осадков за 31 мая 15:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	RMSE	MAE	ME	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	0,21	0,15	-0,12	0,44	$0,45 \pm 0,09$	$0,02 \pm 0,03$
Интерполяция осадков	0,11	0,08	0,00	0,75	$0,78 \pm 0,08$	$0,05 \pm 0,03$
Комбинированный метод	0,19	0,13	0,00	0,47	$0,75 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,05$

В данном случае наблюдались в основном морозящие осадки с низкой интенсивностью ( $\bar{Q}_G = 0,26$  мм,  $Me(Q_G) = 0,2$ ,  $Q_{Gmax} = 0,88$ ) и небольшой изменчивостью ( $C_V(Q_G) = 87\%$ ). По рисунку 4.5а видно, что радиолокационный метод давал заниженное поле осадков относительно наземных наблюдений. В среднем занижение ( $ME$ ) составило  $-0,12$  мм (таблица 4.2). Абсолютные значения поля, полученного методом интерполяции невязки (рисунок 4.5б), точно соответствуют измерениям на станциях. Плотность сети АИС «Осадки» не позволяет воспроизвести сложную структуру пространственного распределения осадков, как в радиолокационном методе. Комбинированный метод (рисунок 4.5в) лишен

недостатков двух других методов, но при этом имеет немного худшие показатели качества по сравнению с методом интерполяции осадков (таблиц 4.2).

*Фронт окклюзии.* В 05:00 ВСВ 25.06.2018 погода в Санкт-Петербурге определялась ярко выраженной осевой частью ложбины с расположенным в ней фронтом окклюзии, связанным с активным циклоном, смещающимся с южной части Норвежского моря через Скандинавский хребет на центральную часть Финляндии. В рассматриваемый момент наблюдалась сегментация циклона. Фронт смещался с запада на восток со скоростью 65 км/ч. В Санкт-Петербурге наблюдалась сплошная слоистообразная облачность со слабыми и умеренными непрерывными жидкими осадками обложного характера. Осадки начались с 00:00 ВСВ и за период 00–06 ВСВ выпало 2–5 мм. Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.6.

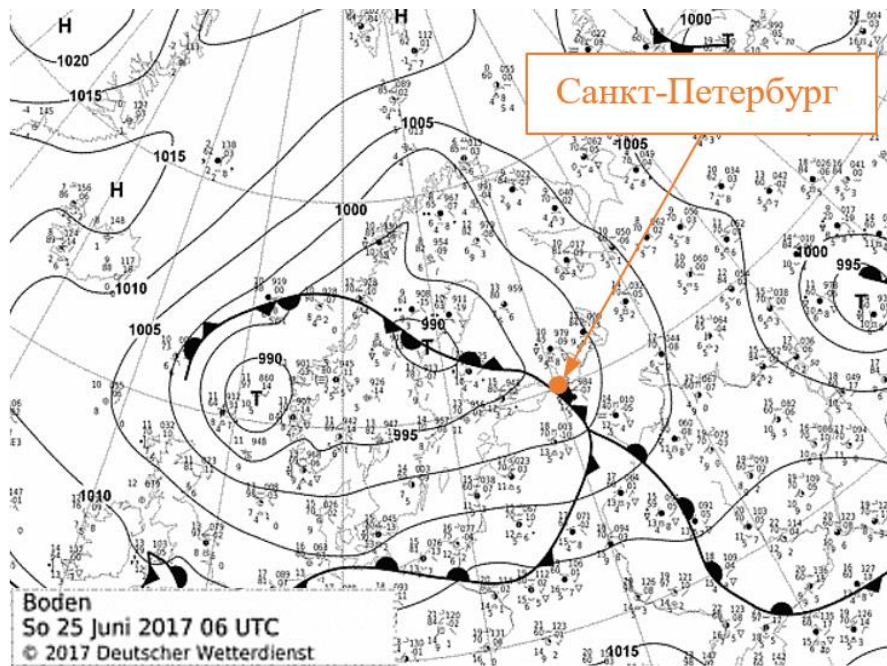


Рисунок 4.6 – Приземная синоптическая карта за 25 июня 06:00 ВСВ

На рисунке 4.7 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.3 для оценки качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

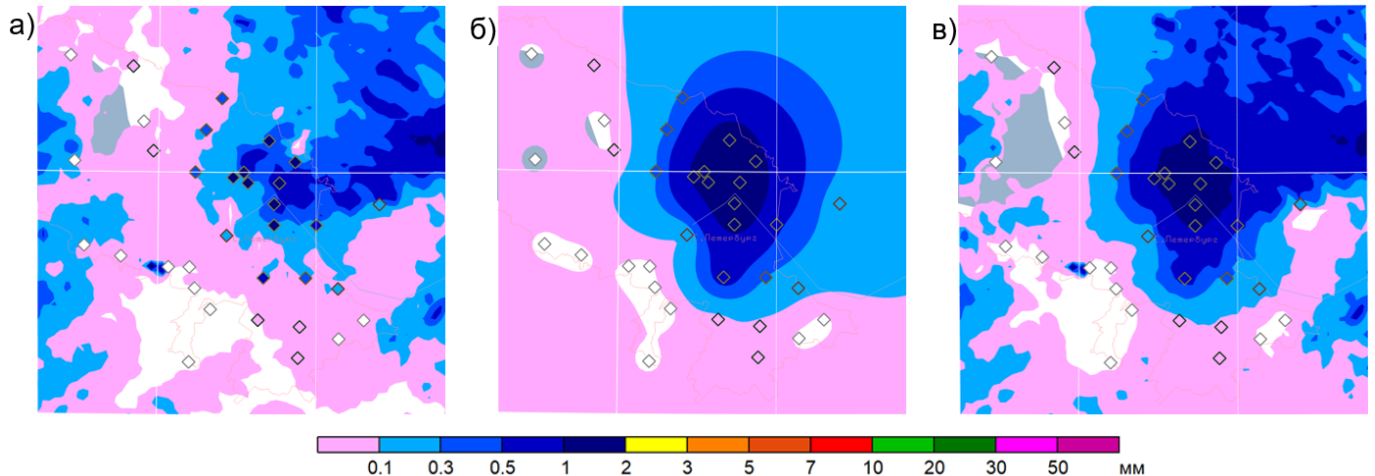


Рисунок 4.7 – Восстановленное поле количества осадков за 25 июня 05:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.3 – Значения статистических характеристик поля осадков за 25 июня 05:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	0,48	0,31	-0,26	0,77	$0,28 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,02$
Интерполяция осадков	0,16	0,11	0,00	0,94	$0,8 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,03$
Комбинированный метод	0,14	0,10	0,02	0,94	$0,85 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,03$

При прохождении фронта окклюзии на исследуемой территории образовался один локальный максимум ( $Q_G$  достигает 1,65 мм). При этом наблюдались участки, где осадки не выпадали. В данной ситуации МРЛ занижил осадки более 0,1 мм (рисунок 4.7а). Это отразилось на среднем смещении ( $ME = -0,26$ ) и коэффициенте регрессии ( $A = 0,28$ ). Несмотря на то что поле имеет большую изменчивость ( $C_V(Q_G) = 133\%$  и  $\bar{Q}_G$  в 4 раза больше  $Me(Q_G)$ ), с помощью метода интерполяции осадков поле восстановлено с  $RMSE$  на 67% меньше, чем у радиолокационного метода, и  $MAE$  – на 65%.  $RMSE$  метода интерполяции осадков составляет 38% от  $\bar{Q}_G$ . Такие показатели качества восстановления можно связать с тем, что локальный максимум количеством осадков ( $Q \in 1-2$  мм) оказалось в северной части города, где сеть pluвиографов

достаточно густая. Применение комбинированного метода позволило более подробно восстановить пространственную структуру осадков, что привело к улучшению большинства статистических показателей оценки качества поля относительно метода интерполяции невязки. С другой стороны, если методом интерполяции осадков средняя невязка восстановленного поля равна 0, то при использовании комбинированного метода происходит небольшое систематическое завышение ( $ME = 0,02$ ).

*Теплый фронт.* Ночью 23.08.2018 погода в Санкт-Петербурге определялась зоной теплого фронта, расположенного в передней части южного циклона, смещающегося на Санкт-Петербург по южному потоку с Черного моря. В рассматриваемый момент времени наблюдалась слоистая и кучево-дождевая облачность с осадками обложного и ливневого характера. За ночь (с 18:00 ВСВ до 06:00 ВСВ) выпало 3–12 мм жидких осадков. Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.8.

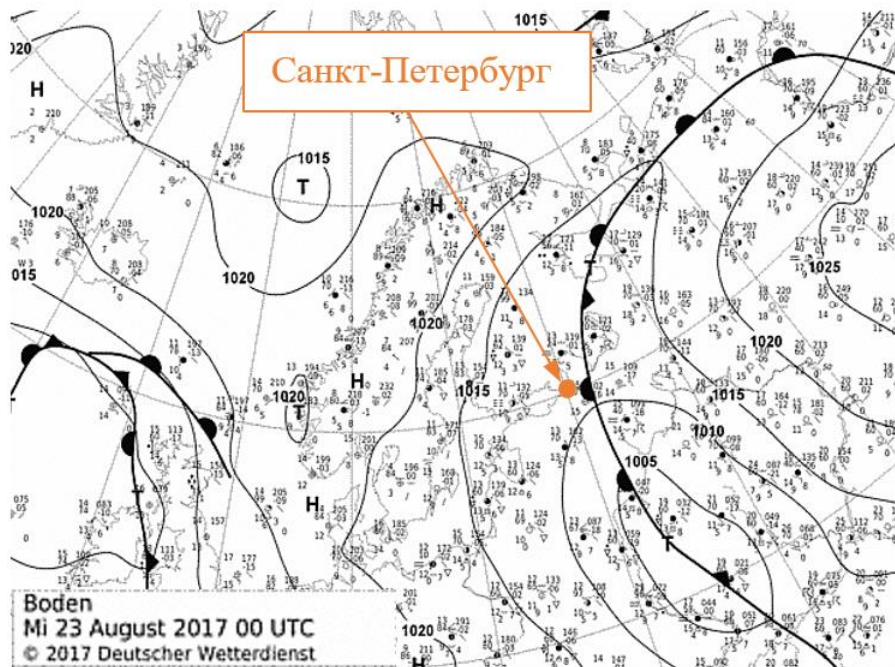


Рисунок 4.8 – Приземная синоптическая карта за 23 августа 00:00 ВСВ

На рисунке 4.9 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.4 для оценки качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

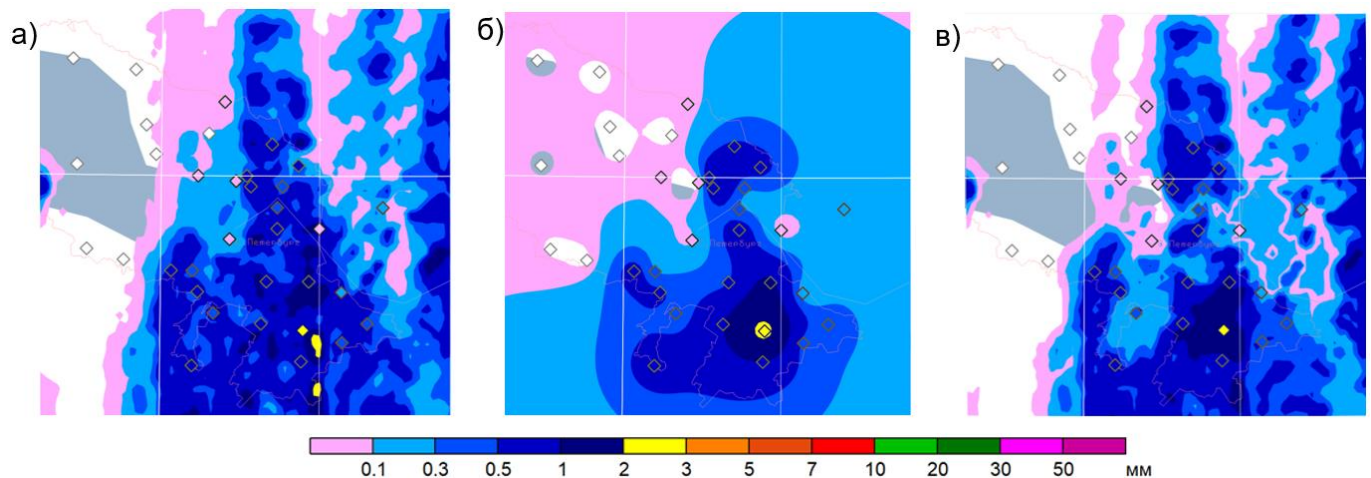


Рисунок 4.9 – Восстановленное поле количества осадков за 23 августа 00:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.4 – Значения статистических характеристик поля осадков за 23 августа 00:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	0,38	0,21	0,05	0,37	$0,5 \pm 0,11$	$0,26 \pm 0,07$
Интерполяция осадков	0,35	0,24	-0,02	0,41	$0,4 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,05$
Комбинированный метод	0,40	0,26	0,02	0,35	$0,54 \pm 0,13$	$0,21 \pm 0,08$

Прохождение теплого фронта сопровождалось грядой локальных максимумов количества часовых осадков, из которых только часть попала на pluвиографы (рисунок 4.9). Так из двух самых сильных максимумов (2–3 мм), которые зафиксировал радиолокатор на юге города, только один попал на датчик осадков. Радиолокатор (рисунок 4.9а) на некоторых станциях переоценил осадки, а на некоторых недооценил. Использование комбинированного метода (рисунок 4.9б)



привело к изменению радиолокационного поля осадков в местах расположения датчиков. Поле осадков имеет относительно не большую изменчивость ( $C_V(Q_G) = 109\%$  и  $\bar{Q}_G \sim Me(Q_G)$ ), поэтому отклонения (таблица 4.4) полученных полей всеми тремя методами примерно одинаковые и не превышают  $\bar{Q}_G$ . С другой стороны модели регрессии восстановленных значений относительно фактических далеки от прямой  $\hat{Q} = Q_G$  и имеют низкий показатель объясненной дисперсии ( $R^2 < 0,5$ ).

*Холодный фронт.* В первой половине дня 13.08.2018 погода в Санкт-Петербурге определялась прохождением атмосферного холодного фронта. В рассматриваемый период температурный контраст на фронте составил 3–4°C. Над Санкт-Петербургом наблюдалась облачность преимущественно кучевых форм (кучево-дождевая). За день выпало 0,3–9 мм жидких осадков ливневого характера. Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.10.

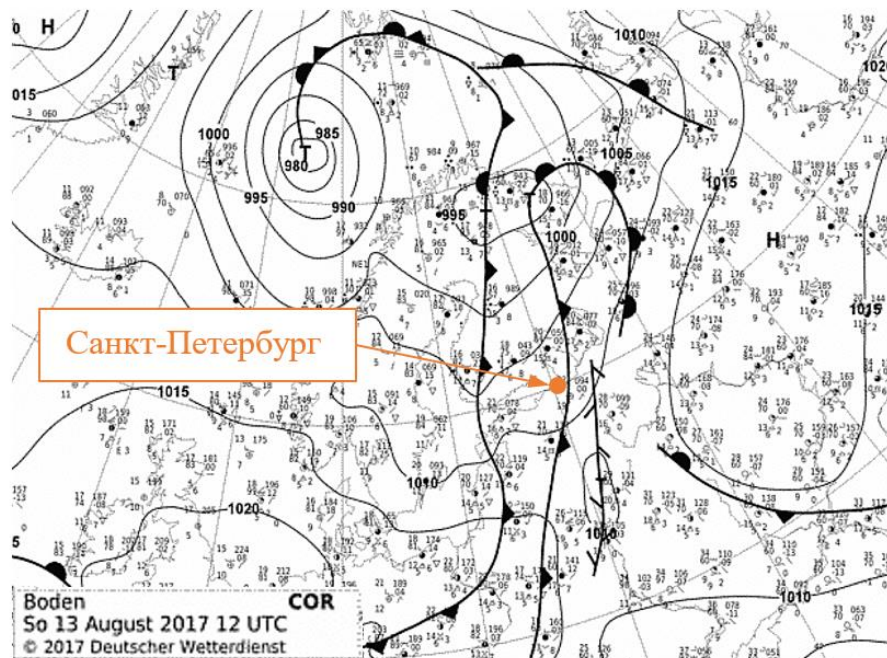


Рисунок 4.10 – Приземная синоптическая карта за 13 августа 12:00 ВСВ

На рисунке 4.11 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.5 для оценки

качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

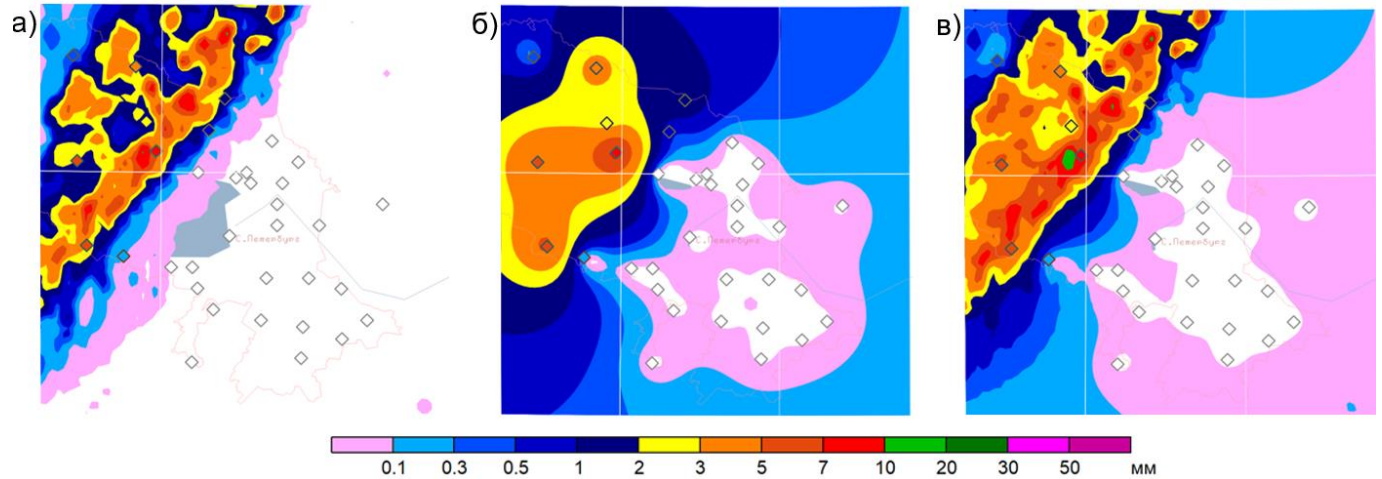


Рис 4.11 – Восстановленное поле количества осадков за 13 августа 09:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.5 – Значения статистических характеристик поля осадков за 13 августа 09:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	RMSE	MAE	ME	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	0,93	0,35	-0,34	0,96	$0,53 \pm 0,02$	$0,03 \pm 0,04$
Интерполяция осадков	1,56	0,79	-0,17	0,26	$0,27 \pm 0,08$	$0,4 \pm 0,16$
Комбинированный метод	0,73	0,36	-0,07	0,89	$0,66 \pm 0,04$	$0,19 \pm 0,08$

Прохождение кучево-дождевых облаков, которые часто сопровождают холодный фронт в теплый период года привело к тому, что поле количества осадков за данный час имело наиболее изменчивую структуру среди всех случаев в этом разделе ( $C_V(Q_G) = 229\%$ ). Некоторые pluвиографы зафиксировали весьма сильные осадки до 7,36 мм, при этом на большинстве датчиков осадков не было ( $Me(Q_G) = 0$  мм). Метод интерполяции осадков оказался менее действенным в данной ситуации (таблица 4.5). Только пять pluвиографов дали более 2 мм количества осадков, что было не достаточно для приемлемого воспроизведения структуры зоны повышенных

осадков (рисунок 4.11б), которая расположилась на северо-западных окраинах Санкт-Петербурга и на Финском заливе. Поле, полученное радиолокационным методом (рисунок 4.11б), имеет заниженные значения наиболее сильных осадков. У комбинированного метода поле совпадает с данными на станциях (рисунок 4.11в) и по ряду показателей лучше воспроизводит поле осадков, чем у радиолокационного метода (таблица 4.5). Например только у данного метода  $RMSE < \bar{Q}_G$ . С другой стороны, особенность применяемого интерполятора невязок приводит к ложным значениям осадков ( $\hat{Q}$  до 0,3 мм) по краям области восстановления в тех местах, где осадков не было.

*Внутримассовые осадки.* Днем 26.06.2018 фронт окклюзии сместился на восток, и погода в Санкт-Петербурге определялась юго-западной частью циклона, центр которого в рассматриваемый момент времени располагался над центральной частью Финляндии. Давление в центре циклона за последние сутки не менялось. В рассматриваемый момент времени над Санкт-Петербургом наблюдалась слоисто-кучевая и кучево-дождевая облачность 7–10 баллов и осадки преимущественно ливневого характера. Температурный фон составил 12–13°C. За день (за 12 часов с 06–18 ВСВ) выпало 2–14 мм жидких осадков. Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.12.

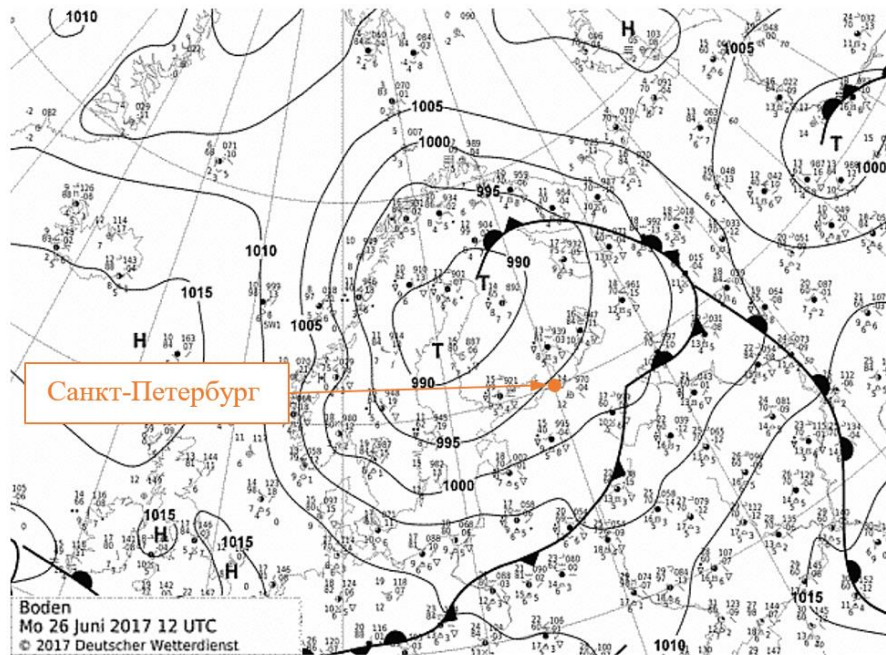


Рисунок 4.12 – Приземная синоптическая карта за 26 июня 12:00 ВСВ

На рисунке 4.13 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.6 для оценки качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

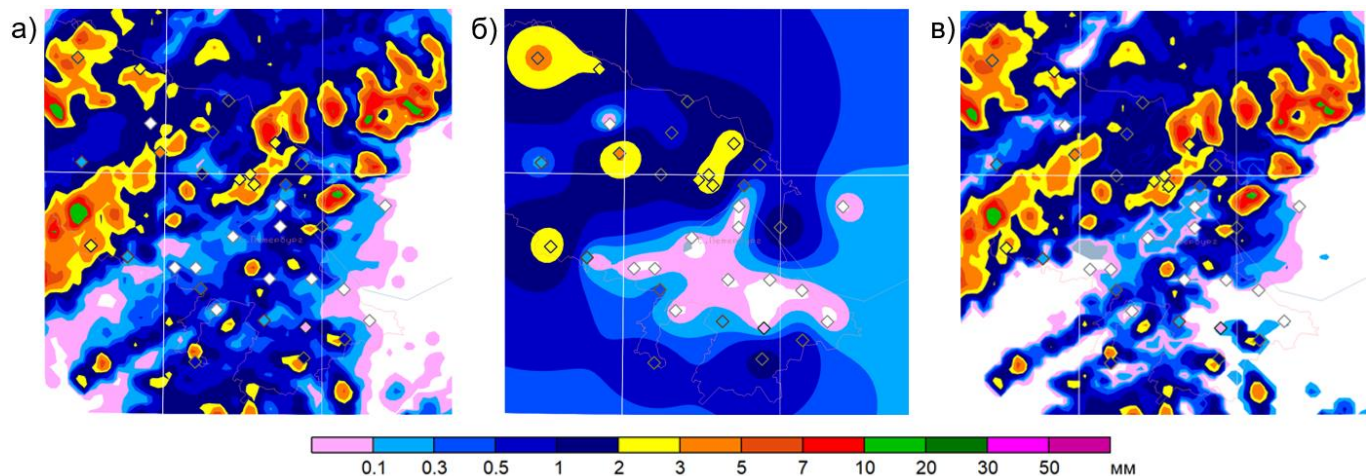


Рисунок 4.13 – Восстановленное поле количества осадков за 26 июня 11:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.6 – Значения статистических характеристик поля осадков за 26 июня 11:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	0,68	0,54	0,27	0,68	$0,8 \pm 0,1$	$0,45 \pm 0,14$
Интерполяция осадков	1,04	0,73	-0,14	0,12	$0,21 \pm 0,1$	$0,58 \pm 0,14$
Комбинированный метод	0,66	0,45	0,08	0,66	$0,82 \pm 0,1$	$0,24 \pm 0,14$

Поле осадков в данном случае состоит из большого количества локальных максимумов. Некоторые из них имеют значительное количество осадков (10–20 мм) и при этом небольшую площадь (рисунок 4.13а и 4.13в). В данной ситуации с помощью метода интерполяции невязки получается наибольшая погрешность восстановленного поля (таблица 4.6),  $RMSE$  больше  $\bar{Q}_G$  на 16%. Для данного метода регрессионная модель  $\hat{Q}(Q_G)$  вместе с  $R^2$  показывают отсутствие связи между интерполированными и измеренными значениями количества осадков. Радиолокационный и комбинированный метод позволяют идентифицировать зоны с повышенным значением количества осадков площадью до 1 км<sup>2</sup>. В некоторых наземных станциях радиолокатор (рисунок 4.13а) завышал количество осадков или давал осадки, которые не наблюдались. Преимуществом комбинированного метода (таблица 4.6) в данном случае является то, что восстановленные значения осадков ближе к биссектрисе  $\hat{Q} = Q_G$ , и по всем остальным показателям, кроме  $R^2$ , качество восстановления поля осадков этим методом оказалось выше радиолокационного.

*Центр циклона и точки окклюзии.* Днем 24.08.2018 погода в Санкт-Петербурге определялась центральной частью южного циклона и центральной частью точки окклюзии. Циклон смещался по южному потоку с Черного моря со скоростью  $\approx 35$  км/час. В рассматриваемый момент времени над Санкт-Петербургом наблюдалась кучево-дождевая и слоисто-дождевая облачность со слабыми и умеренными осадками ливневого и обложного характера. По данным карты АТ<sub>850</sub> в первой половине дня Санкт-Петербург располагался в теплом секторе вышеописанного циклона. За день

(за 12 часов с 06 до 18 ВСВ) выпало 28–38 мм жидких осадков. Синоптическая ситуация представлена на рисунке 4.14.

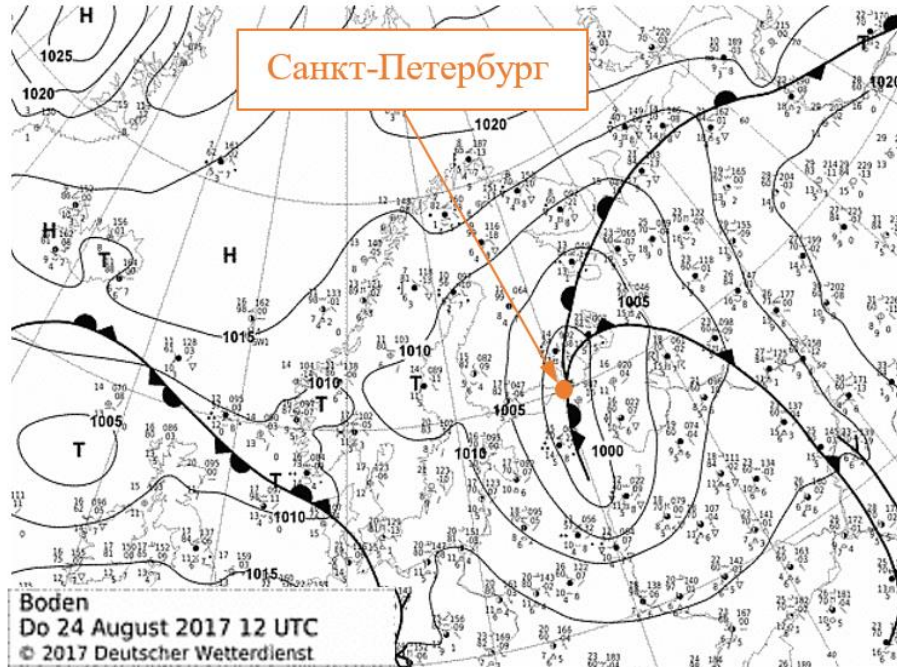


Рисунок 4.14 – Приземная синоптическая карта за 24 августа 12:00 ВСВ

На рисунке 4.15 изображено поле количества осадков за час для рассматриваемого случая, восстановленное тремя методами. В таблице 4.7 для оценки качества работы каждого метода представлены статистические характеристики из раздела 3.1.

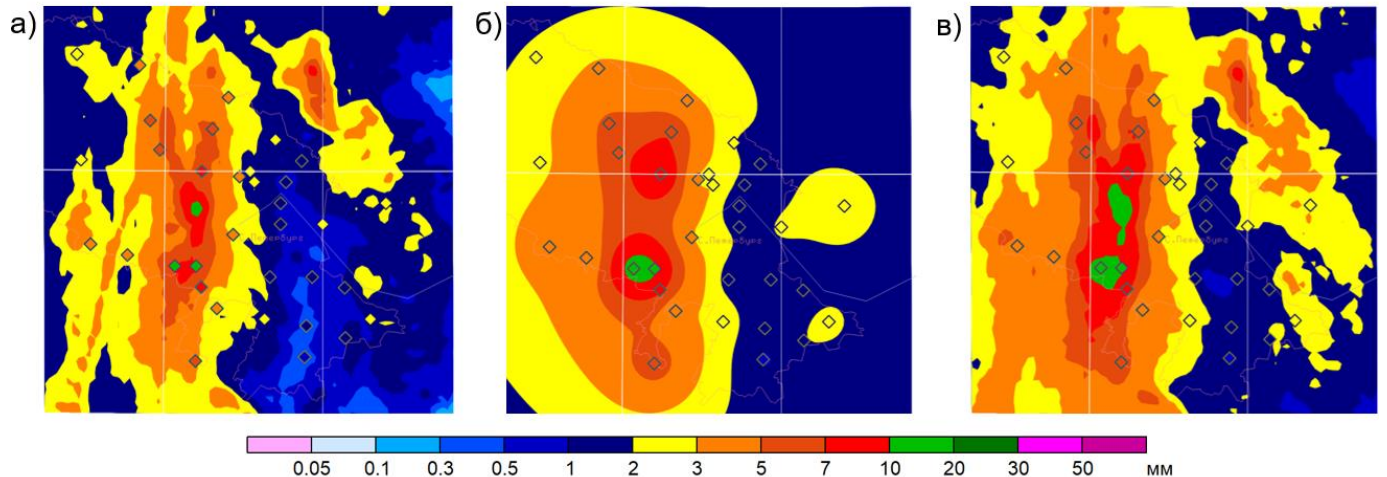


Рис 4.15 – Восстановленное поле количества осадков за 24 августа 13:00 ВСВ. Ромбы – данные pluвиографов.

а – радиолокационный метод, б – интерполяция осадков, в – комбинированный метод

Таблица 4.7 – Значения статистических характеристик поля осадков за 24 августа 13:00 ВСВ, восстановленного тремя основными методами

Метод	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
Радиолокационный метод	1,69	1,26	-1,26	0,93	$0,62 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,13$
Интерполяция осадков	1,53	1,02	-0,37	0,71	$0,59 \pm 0,07$	$1,13 \pm 0,3$
Комбинированный метод	0,91	0,65	-0,11	0,90	$0,82 \pm 0,05$	$0,57 \pm 0,22$

Поле осадков, образованное в центре циклона и точки окклюзии, имеет одну обширную зону с  $Q > 3$  мм и несколько зон с меньшей площадью. Внутри основной зоны находятся два локальных максимума с  $Q \in (10-20)$  мм (рисунок 4.15в). Рассматриваемый случай имеет наименьшую изменчивость ( $C_V(Q_G) = 73\%$ ), обширная зона конвективных осадков выпала в районе с густой частью сети АИС «Осадки» на 15 станций. В связи с этим, отклонения ( $RMSE$ ,  $MAE$  и  $ME$ ) интерполированных значений количества осадков оказались меньше радиолокационных. С другой стороны, у метода интерполяции осадков хуже модель регрессии. Комбинированный метод (таблица 4.7) в данном случае был наиболее действенным. Характеристики  $RMSE$  и  $MAE$  комбинированного метода почти в два

раза меньше, чем у радиолокационного.  $RMSE$  комбинированного метода в четыре раза меньше  $\bar{Q}_G$ . Смещение ( $ME$ ) этого метода для таких сильных осадков оказалось весьма незначительным. С помощью комбинированного метода удалось установить два локальных максимума с  $Q \in (10-20)$  мм (рисунок 4.15в), а с помощью радиолокационного и интерполяции только по одному (рисунок 4.15а и 4.15б).

*Выводы.* По анализу отдельных случаев можно сделать вывод, что метод интерполяции количества осадков лучше всего воспроизводит слабые однородные осадки. Обложные осадки с одним максимумом лучше воспроизводит метод комбинирования наземных и радиолокационных данных. Обложные осадки со сложной ячеистой структурой воспроизводятся всеми методами примерно одинаково. Интерполяция конвективных осадков сопровождается значительными погрешностями. Преимущества комбинированного метода особо выражены при восстановлении поля конвективных осадков с одним максимумом или имеющего «мультиячейковую» структуру. Данные выводы подтверждают результаты, полученные в разделе 4.1.



## Глава 5. Исследование поля осадков на территории Санкт-Петербурга

### 5.1 Характеристики пятен осадков

Изолированные области осадков, а также области с повышенным или пониженным по отношению к окружающей территории количеством осадков принято называть пятнами осадков. В ряде работ в качестве параметра, характеризующее поле осадков, берется число пятен на заданной территории [6, 27].

Согласно [14], вероятность того, что из  $n$  осадкомеров, расположенных на территории площадью  $S_T$ , хотя бы один зафиксирует наличие осадков в заданной области (пятне), занимающей площадь  $S_Q$ , определяется выражением:

$$P_Q = 1 - \left(1 - \frac{S_Q}{S_T}\right)^n \quad (5.1)$$

Используя формулу 5.1 были получены графики (рисунок 5.1) зависимости вероятности обнаружения пятна осадков от его площади  $P_Q(S_Q)$  для всей сети АИС «Осадки» (рисунок 5.1 а) и отдельно для её центральной части (рисунок 5.1 б).

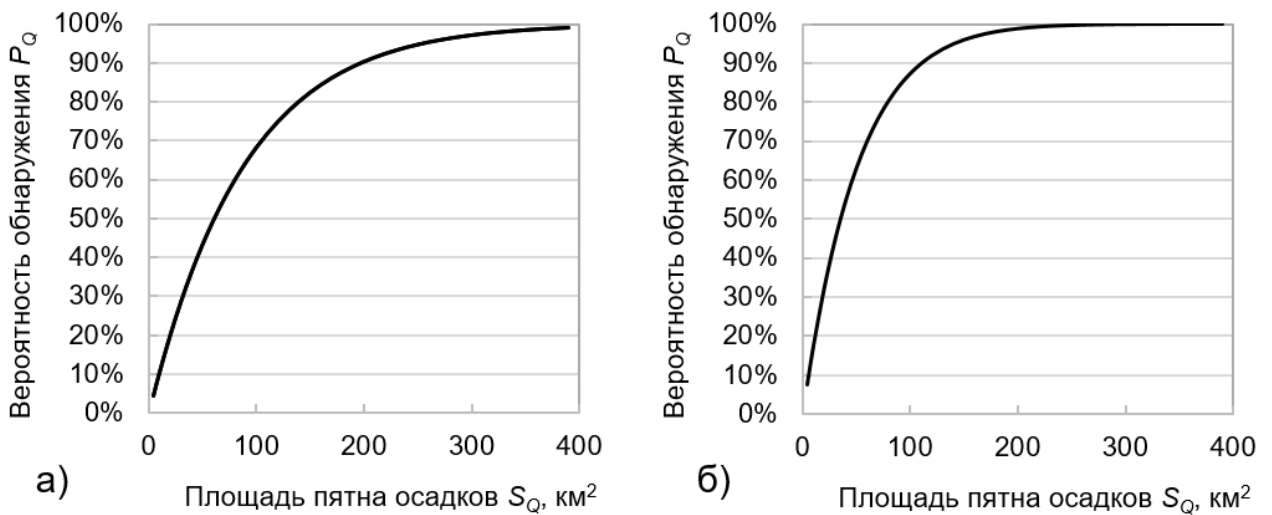


Рисунок 5.1 – Вероятность обнаружения пятна осадков в зависимости от его площади.

а – все станции; б – станциями сети в основной части города

По полученным зависимостям (рисунок 5.1) можно сделать вывод, что данная сеть плювиографов может обнаружить 50% пятен осадков с площадью 60 км<sup>2</sup> и 90% пятен осадков с площадью 200 км<sup>2</sup>. А если брать только центральную часть сети, то с 50%-ой вероятностью будут обнаружены пятна осадков с площадью 35 км<sup>2</sup>, с 90%-ой вероятностью – с площадью 110 км<sup>2</sup>. Таким образом, центральная часть сети может обнаружить примерно в 2 раза больше пятен осадков по сравнению со всей сетью.

Приведем анализ характеристик пятен с повышенным значением количества осадков конвективного характера. Принято считать (раздел 1.1), что осадки с интенсивностью 3 мм/ч и выше чаще всего являются конвективными. По восстановленным комбинированным методом полям количества осадков за час были выявлены все пятна осадков начиная с уровня изолинии 3 мм до 11 мм с шагом 1 мм. Количество пятен каждого уровня указано в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Количество пятен в зависимости от уровня изолинии

Уровень пятна осадков, мм	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество	412	361	188	168	134	104	87	53	78

Таблица 5.1 показывает естественную тенденцию уменьшения количества пятен при увеличении их интенсивности.

Рассмотрим две важные характеристики пятен осадков: их площадь  $S$  и средний поток осадков  $\bar{F}$  за час. Поток осадков (м<sup>3</sup>/с) — это объем воды, выпадающий из конвективной ячейки в единицу времени, рассчитывался как интеграл от интенсивности осадков по площади облака:

$$F = \iint I \, dx dy \quad (5.2)$$

Для расчета среднего потока по восстановленному количеству осадков  $\hat{Q}$ , накопленному за временной интервал  $t$  (в данном случае час) воспользуемся формулой:

$$\bar{F} = \iint \hat{Q} \cdot t \, dx dy \quad (5.3)$$

Для оценки повторяемости площадей и потока пятен осадков были построены диаграммы «ящик с усами» [56] (рисунок 5.2). На диаграммах с помощью условных обозначений представлены минимальное и максимальное значения, первый и третий квантили, а также медиана. Для вертикальных осей используется логарифмическая шкала.

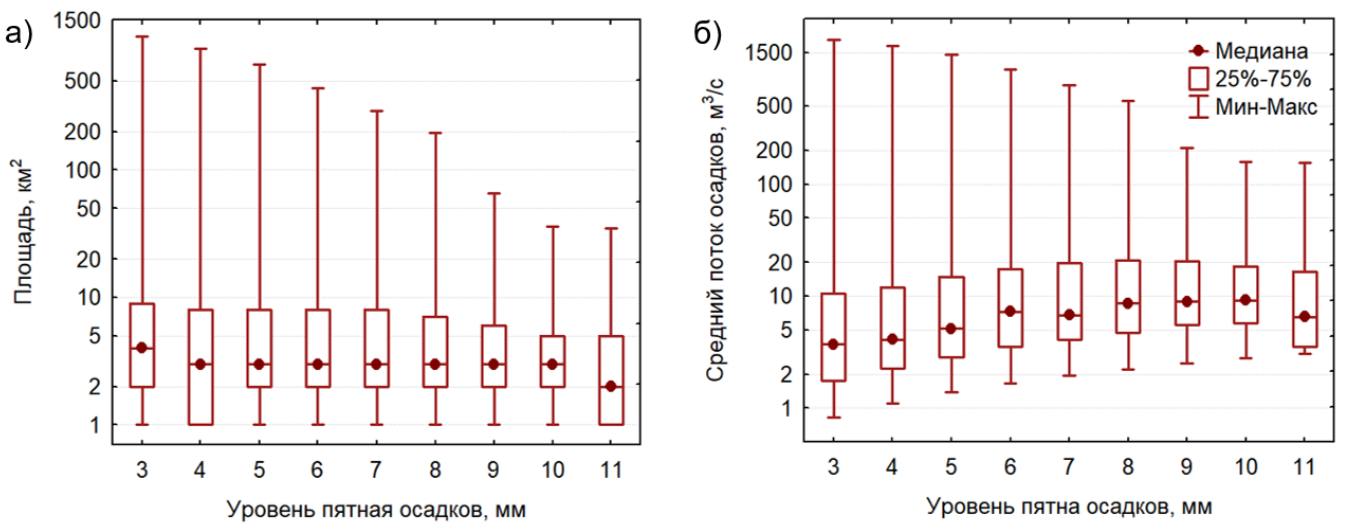


Рисунок 5.2 – Диаграммы «ящик с усами» площади (а) и среднего потока осадков (б) в зависимости от уровня изолинии пятна.

По диаграмме (рисунок 5.2а) видно, что площади пятен осадков имеют большой разброс, который уменьшается с увеличением уровня изолинии. Большая часть (>75%) пятен для всех уровней имеют  $S$  меньше  $10 \text{ км}^2$  (рисунок 5.2а). Наблюдается уменьшение  $S$  большей части выборки (третий квантиль и медиана) с ростом уровня изолинии. Так, если для уровня изолинии 3 мм медиана площади составляет  $4 \text{ км}^2$ , а третий квантиль  $9 \text{ км}^2$ , то для пятен с уровнем 11 мм –  $2 \text{ км}^2$  и  $5 \text{ км}^2$  соответственно.

Диапазон среднего потока осадков (рисунок 5.2б), как и площади, уменьшается с увеличением уровня изолинии, но большая часть пятен имеет  $\bar{F}$  менее  $21 \text{ м}^3/\text{с}$ . В отличие от площади, в большинстве случаев (первый, третий квантили и медиана),

средний поток увеличивается до уровня изолинии 9 мм, затем происходит уменьшение этой характеристики. Так, если для уровня изолинии 3 мм первый квантиль  $\bar{F}$  составляет  $\sim 2$  м<sup>3</sup>/с, медиана  $\sim 4$  м<sup>3</sup>/с, а третий квантиль  $\sim 9$  м<sup>3</sup>/с, то для пятен с уровнем 9 мм – 6, 9 и 20 м<sup>3</sup>/с соответственно, а для пятен с уровнем 11 мм – 3, 7 и 18 м<sup>3</sup>/с соответственно.

Таким образом, чаще всего, наибольший поток осадков наблюдался в пятнах с уровнем изолинии 9 мм, при этом площадь таких пятен в 75% случаев меньше 7 км<sup>2</sup>.

По полученным зависимостям вероятности обнаружения пятна осадков от его площади (рисунок 5.1.) и диаграмм «ящик с усами» (рисунок 5.2) можно сделать вывод, что при восстановлении поля осадков только по данным сети АИС «Осадки», вероятность обнаружения более 75% всех конвективных осадков меньше 11%, а для основной части города меньше 18%. А если рассматривать пятна с уровнем изолинии 9 мм, в которых наблюдается наибольший поток осадков, то вероятность обнаружения более 75% всех таких пятен составляет 8%, а для основной части города 13%. Дополнение измерений плювиографов радиолокационными данным позволяет идентифицировать пятна осадков с площадью до 1 км<sup>2</sup>.

## **5.2 Характеристики осадков при слиянии облаков**

Основной упор данного исследования делается на восстановлении поля количества осадков за час. Такой временной интервал должен обеспечивать потребности практических задач, но не всегда пригоден для теоретических изысканий в области физики облаков. При исследовании динамики отдельных облачных ячеек требуется иметь поля осадков с самым высоким временным разрешением, чтобы анализировать процессы, приводящие к усилению или ослаблению мгновенных значений интенсивности осадков во время жизни дождевых облаков.

Естественно, чем короче период измерения, тем сложнее восстановить пространственную структуру характеристик осадков. Несмотря на то, что с помощью

датчиков Pluvio можно получать измерения количества осадков с временным разрешением 5 минут, с помощью пространственной интерполяции поле по таким данным не построить, так как плотности сети недостаточно (раздел 3.3). Радиолокационные измерения отражаемости поступают раз в 10 минут, но, как показано в разделе 1.3, радиолокационный метод имеет ряд ограничений. Эти ограничения не позволяют напрямую измерять интенсивность осадков, что может приводить к значительным погрешностям. Методика интерполяции невязки, использованная в настоящем исследовании, также не может быть использована, в силу того, что значения невязки хуже коррелирует на расстоянии, чем количество осадков (раздел 3.6). Для задачи восстановления поля осадков с наибольшим временным разрешением была предложена другая методика.

Методика основывается на динамическом подборе коэффициентов  $Z-I$  соотношения (1.7) с наименьшей погрешностью восстановления полей интенсивности осадков по нескольким радиолокационным обзорам [50]. При исследовании конкретного случая выпадения осадков, используются все 10-минутные карты радиолокационной отражаемости в приземном слое и 5-минутные измерения количества осадков на станциях за время прохождения данного дождя над исследуемой территорией. Суть методики заключается в следующем:

1. На первом этапе для каждого рассматриваемого радиолокационного обзора рассчитывается интенсивность осадков в местах расположения пювниографов. Интенсивность вычисляется на основе измерений количества осадков пювниографами в момент окончания радиолокационного обзора и через 5 минут после окончания. Полученная сумма осадков пересчитывается в интенсивность.

2. На втором этапе восстанавливаются значения интенсивности осадков по радиолокационной отражаемости в местах расположения пювниографов для всех комбинаций коэффициентов  $A$  в диапазоне 100–1000 с шагом 50 и  $B$  в диапазоне 0,1–1,7 с шагом 0,05. Используемые диапазоны были выбраны на основе работы

Фудзивары [76], в которой анализировалось  $Z-I$  соотношение. Автор обобщил данные из разных источников о соответствующих коэффициентах в зависимости от типов осадков.

3. Для каждого измерения интенсивности осадков определяется невязка – разность между восстановленным значением интенсивности осадков по радиолокационным данным и измеренным плевниографом.

4. По набору невязок, для всех данных за дождь, проводится оценка среднеквадратического отклонения  $RMSE$  (раздел 3.1) восстановления поля интенсивности осадков для каждой комбинации коэффициентов  $A$  и  $B$ .

5. По наименьшему значению  $RMSE$  выбирается комбинация коэффициентов  $A$  и  $B$ , которая используется для перевода поля радиолокационной отражаемости в поле интенсивность осадков за весь исследуемый период.

Предложенная методика позволяет получать поля интенсивности осадков с временным разрешением 10 минут. Эти поля будут иметь заведомо более высокое качество, чем поля, полученные по радиолокационным данным с фиксированными коэффициентами  $A$  и  $B$ , так как в данной методике минимизируется погрешность полей осадков по измерениям осадкомеров.

Приведенная методика была использована в двух работах по исследованию процесса слияния облаков. В первой работе [50] подробно исследовался один характерный случай, во второй [38] были сделаны статистические обобщения характеристик облаков и осадков во время слияния облаков. Приведем результаты из этих работ по изменению характеристик осадков во время слияния.

Слияние облаков наблюдалось при проведении самолетных исследований, а позднее с помощью дистанционных средств изучения атмосферы. Установлено, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных облаков [3, 49, 90, 93]. За счет больших размеров слившееся облако меньше подвергается воздействию сухого воздуха,

поступающего в него вследствие процесса вовлечения, это способствует его более интенсивному развитию. Достаточно часто перед слиянием облаков наблюдается появление так называемого “облачного моста” – перемычки между облаками. Она представляет собой облака нижнего яруса, которые соединяют между собой сливающиеся облака [72, 93, 102]. Причиной появления «облачного моста», по мнению ряда ученых, является взаимодействие холодных нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками [72, 90]. Появление радиозеха в этом месте обычно объясняется переносом облачных частиц соответствующими потоками в промежуток между сливающимися облаками [103]. Слияние облаков оказывает очень сильное воздействие на их последующее развитие. Как радиолокационные исследования, так и данные численного моделирования показали увеличение площади образовавшегося облака, высоты верхней границы и радиолокационной отражаемости облака [33, 68, 72, 94, 105]. В результате слияния в облаке формируется более интенсивный восходящий поток и, соответственно, можно ожидать увеличение осадков по сравнению с изолированным облаком. Изменения динамики движения объемов облачного воздуха может приводить к тому, что они будут подвержены как процессам вовлечения, так и обратным, что в дальнейшем может привести к формированию многомодального спектра облачных частиц за счет взаимодействия новых появляющихся капель и остатков крупных облачных частиц [85]. Количество и интенсивность осадков может изменяться в результате этих процессов.

Для исследований отбирались случаи развития двух конвективных облаков (мощные кучевые и кучево-дождевые облака), которые в процессе наблюдений слились. Рассматривались облака, которые формировали радиолокационную ячейку с максимальной отражаемостью в столбе атмосферы  $Z_m$  более 35 дБZ. Объем с соответствующей отражаемостью должен был превосходить  $10 \text{ км}^3$ ; эта область должна была располагаться на высоте более 1 км. За момент слияния принято время, когда две радиолокационные ячейки объединились в одну. Если на одном скане

радиолокатора наблюдалось две конвективных ячейки по уровню 35 дБZ, а на следующем на их месте появилась одна ячейка, то мы считали, что слияние облаков произошло между этими двумя сканами. Временная неопределенность момента слияния равна периоду радиолокационных обзоров «ДМРЛ-С», т.е. 10 мин. Время, соответствующее предыдущему скану радиолокатора перед слиянием, для удобства дальнейших рассуждений, принималось за начало отсчета «0 мин».

В работах были исследованы ряд характеристик, в том числе и две характеристики осадков, полученные приведенным выше методом восстановления волей интенсивности осадков: максимальная интенсивность осадков  $I_{max}$  и поток осадков  $F$  (5.2).

В исследовании одного случая [50] было взято слияние двух кучево-дождевых облаков Сb1 и Сb2, которое наблюдалось 3-го августа 2015 г. в районе Санкт-Петербурга. Слияние облаков имело место в период с 7 ч 40 мин по 7 ч 50 мин ВСВ. За слияние принят момент, когда две радиолокационные ячейки объединились в одну. Время, соответствующее предыдущему скану радиолокатора перед слиянием, 7 ч 40 мин ВСВ, было принято за начало отсчета «0 мин».

В результате подбора коэффициентов было получено эмпирическое соотношение следующего вида:  $Z = 430 I^{1,65}$ , при  $RMSE = 7,5$ . Объем выборки составил 27 случаев.

Первая ячейка появилась на экране радиолокатора на -80 мин (6 ч 20 мин ВСВ), и просуществовала до 80 мин (9 ч 00 мин ВСВ). Её развитие наблюдалось в течение 30 мин. К -50 мин верхняя граница облака достигла 9,8 км. Максимальная отражаемость от облака во время стадии развития наблюдалась на -60 мин и составила 55,5 дБZ. В дальнейшем данное облако находилось в стадии стационарирования. Его разрушение началось на -10 мин. По данным радиолокационных наблюдений на стадии развития облака из него выпадали осадки с интенсивностью до 44 мм/ч.



Вторая ячейка появилась на экране радиолокатора на -30 мин (7 ч 10 мин ВСВ) и просуществовала до момента слияния с первой. Она быстро перешла в стадию стационарирования, когда не происходило увеличение высоты верхней границы облака. Верхняя граница находилась вблизи уровня 9 км. Максимальная отражаемость в этом облаке наблюдалась на -20 минуте и была равна 55,5 дБZ.

На рисунке 5.3 представлены вертикальные разрезы радиолокационной отражаемости облаков и восстановленные поля интенсивности осадков за моменты времени: 0, 10 и 20 мин. Облако, которое до слияния находилось восточнее места слияния и впоследствии стало единым облаком, обозначено как «Св 1», а то, которое находилось западнее, как «Св 2». Во время слияния, по данным ДМРЛ, облака перемещалась с запада на восток (азимут  $\sim 279^\circ$ ) со средней скоростью 11,8 м/с.

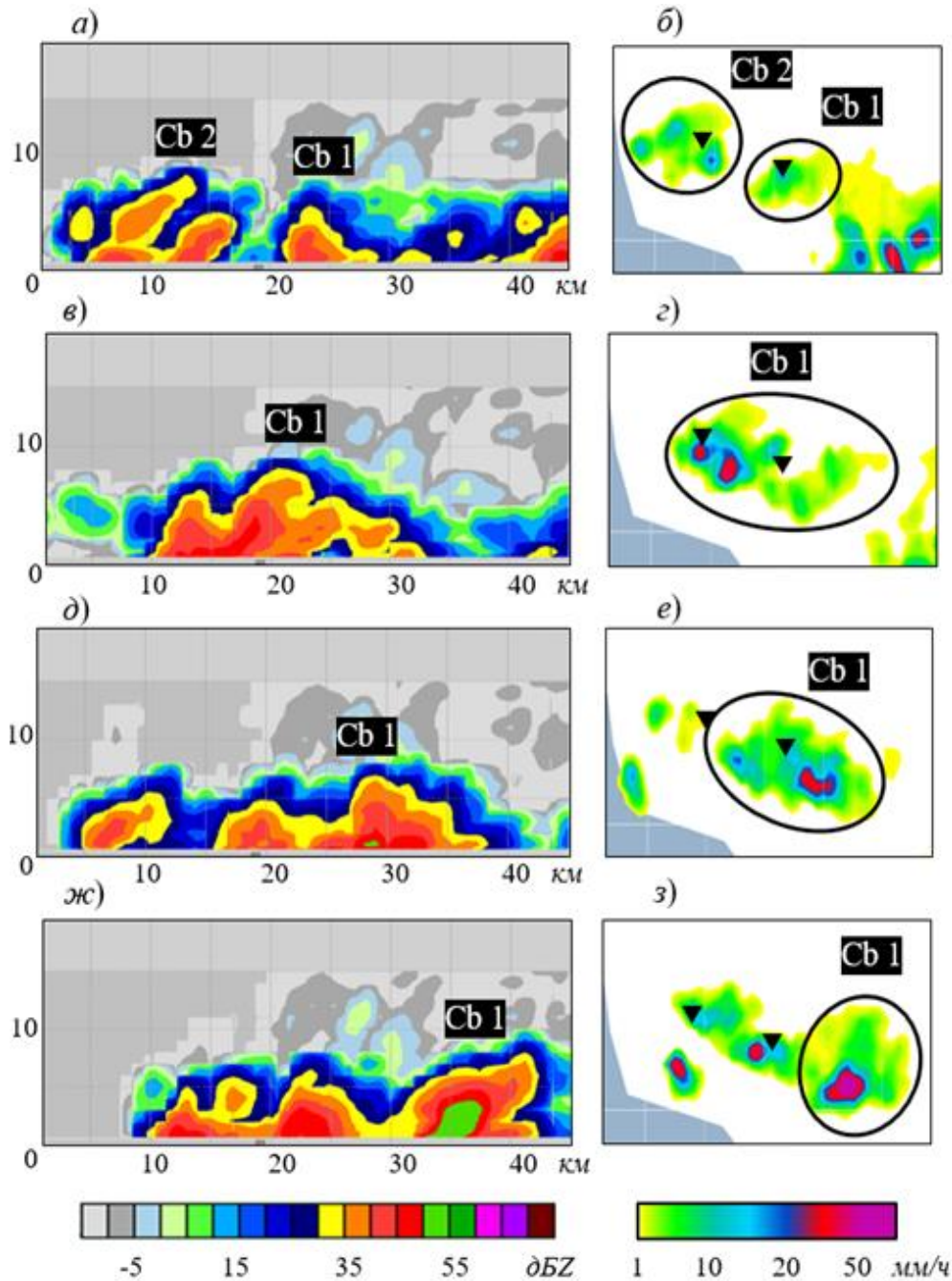


Рисунок 5.3 – Вертикальные разрезы отражаемости (а, в, д, ж) и восстановленные поля интенсивности осадков (б, г, е, з) исследуемых облаков за радиолокационные обзоры: 0 (а, б), 10 (в, г), 20 (д, е) и 30 (ж, з) мин (на поле интенсивности осадков исследуемые облака изображены эллипсами)

Из рисунка 5.3 видно, что к моменту слияния оба облака располагались достаточно близко друг к другу (на расстоянии 5 км) и давали осадки. В это время уже

наблюдается формирование облачного моста между облаками в нижней части тропосферы (рисунок 5.3а). Далее происходило постепенное слияние облаков, которое завершилось формированием единого облака к 30 минуте (рисунок 5.3ж).

До слияния облаков (рисунок 5.3б) область осадков, соответствующая облаку 2, имела три отдельных зоны повышенной интенсивности. При этом осадки из облака 1 были сконцентрированы около одного максимума. Максимальное значение интенсивности осадков из двух облаков на 0 мин составляло 22 мм/ч (облако 2). После слияния, на 10 мин (рисунок 5.3г) объединенное облако также имеет несколько отдельных областей осадков, наиболее интенсивная из них располагается в районе облака 2. Здесь максимальное значение  $I$  достигло 47,4 мм/ч. Затем, на 20 мин (рисунок 5.3е), формируется единая широкая область осадков внутри всей объединённой ячейки. К 30 мин (рисунок 5.3з) геометрические размеры области выпадения осадков уменьшаются, при этом остается одна зона с повышенной интенсивностью осадков, где максимальное значение  $I$  достигает 89 мм/ч.

В результате слияния увеличились геометрические размеры облака: максимальная высота верхней границы  $H$  и площадь  $S$ . До слияния у облака 1  $H = 8$  км, у облака 2  $H = 9$  км. После слияния высота верхней границы составила 9,8 км. Площадь облаков увеличилась за время слияния от 110 км<sup>2</sup> (суммарная  $S$  двух облаков до слияния) до 164 км<sup>2</sup> ( $S$  облака после слияния).

На рисунке 5.4 представлены графики изменения характеристик осадков исследуемых кучево-дождевых облаков до и после слияния.

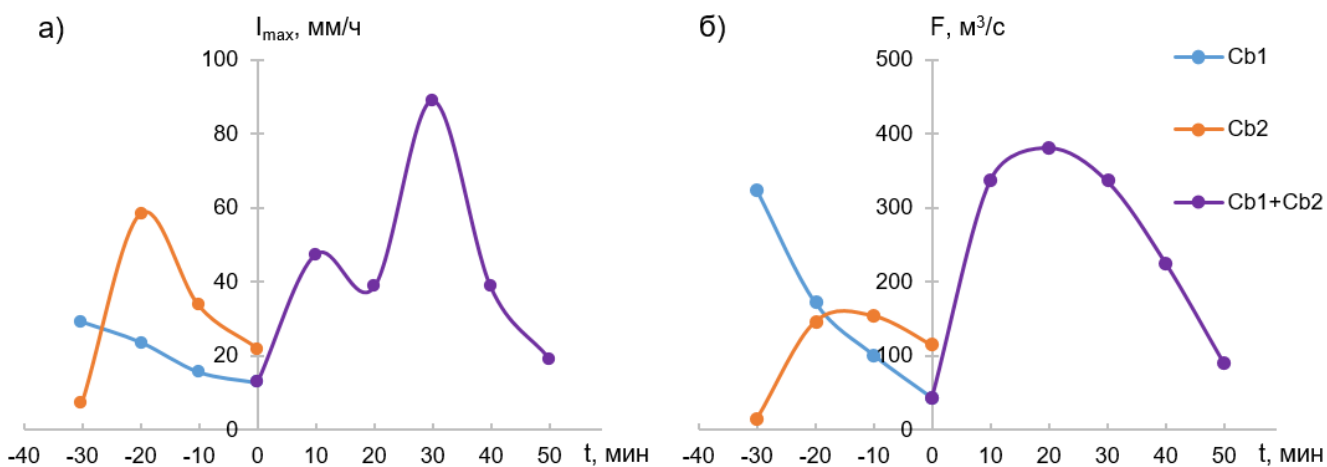


Рисунок 5.4 – Изменение максимальной интенсивности осадков ( $I_{max}$ ) и потока осадков ( $F$ ) до слияния ( $t \leq 0$  мин) и после ( $t > 0$  мин).

Из рисунка 5.4 следует, что значения  $I_{max}$  и  $F$  рассматриваемых облаков уменьшаются перед слиянием. Максимальная интенсивность осадков для рассматриваемых облаков уменьшается примерно в 2 раза. Поток осадков, формируемый облаком 1, уменьшился в 7,5 раз.

Слияние облаков поменяло тенденцию измеряемых характеристик. Отмечается их увеличение в течение 30 минут. Поток осадков из облака через 10 мин после слияния увеличился более чем в 2 раза по сравнению с суммарным  $F$  двух облаков, от 157 до 338  $m^3/s$ , что соответствует данным, полученным для Саудовской Аравии [33, 87, 94]. При этом максимальная интенсивность осадков от облаков в этот временной отрезок возросла от 22,0 до 47,4 мм/ч. Заметное увеличение интенсивности осадков наблюдалось к 30 мин ( $I_{max} = 89$  мм/ч). В это время поток осадков  $F$  начинает уменьшаться. Такое уменьшение потока осадков при увеличении интенсивности можно объяснить тем, что горизонтальные размеры Cb1 уменьшились, при этом процесс образования осадков усилился.

В другой работе [38] были получены статистические характеристики облаков и осадков во время слияния за теплые периоды 2015 и 2016 годов вблизи Санкт-Петербурга. Всего для анализа было отобрано 14 случаев слияния конвективных

облаков. В выборку попали облака различных геометрических размеров с площадью от 5 до 800 км<sup>2</sup>. Случаи слияния наблюдались, когда существовало только две изолированные ячейки, а также и при наличии большого количества конвективных облаков в поле зрения радиолокатора.

Стоит отметить, что не все исследуемые облака проходили над осадкомерами. Для таких случаев калибровка радиолокационной отражаемости проводилась по соседним облакам, осадки из которых выпадали на осадкомеры в период слияния. В итоге для всех исследуемых случаев слияния облаков коэффициент  $B$  был равен 1,65, коэффициент  $A$  менялся от 100 до 720.

До слияния, когда два облака существовали отдельно, бралось наибольшее значение  $I_{max}$ ; значения  $F$  суммировались. Для удобства анализа рассчитывались относительные значения характеристик (в %), т.е. значения выбранных параметров за каждый временной отсчет нормировались на значение этого параметра в 0 мин.

На рисунок 5.5 представлены диаграммы «ящик с усами» [56] для характеристик осадков в зависимости от времени. На диаграмме представлены: медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки для каждого временного отсчета. Кривая, аппроксимирующая изменение медиан относительных характеристик, построена методом взвешенных по расстоянию наименьших квадратов.

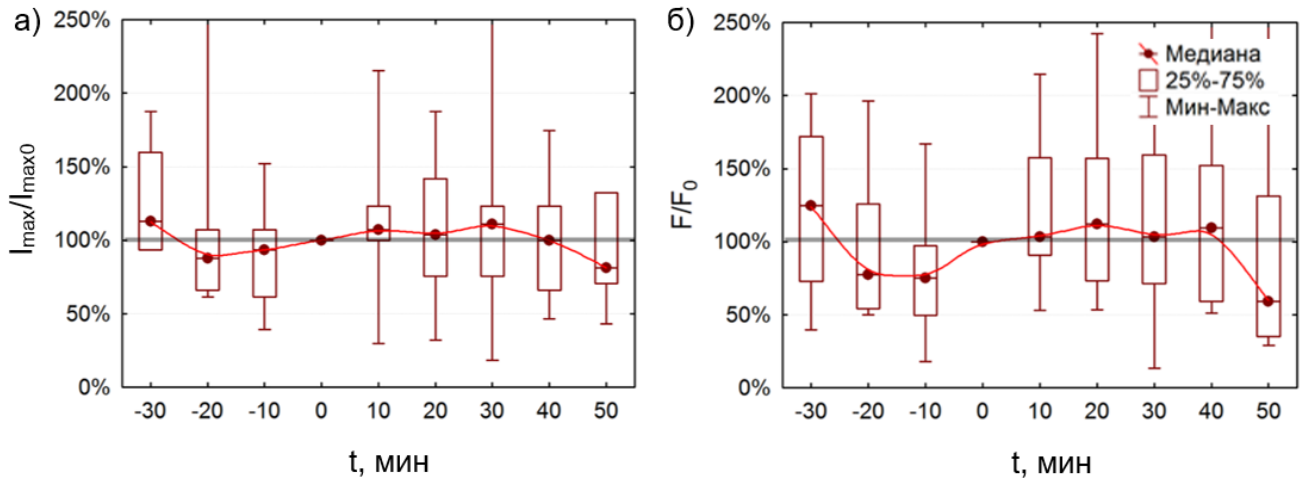


Рисунок 5.5 – Диаграмма «ящик с усами» изменения относительных характеристик осадков до и после слияния. а – максимальная интенсивность осадков; б – поток осадков.

Из рисунка 5.5 видно, что слияние облаков не всегда приводило к повышению максимальной и интегральной характеристик осадков. Но в большинстве случаев все же наблюдалось повышение данных характеристик. Медиана интенсивности осадков увеличивается после слияния, достигая максимального значения (112 %), на 30 минуте, а поток осадков достигает максимального значения на 20 минуте (113 %), и далее происходит уменьшение медиан.

## Заключение

В ходе выполнения исследований по диссертации были решены все поставленные задачи и достигнута цель. Резюмируя все вышесказанное в данной диссертации, можно привести основные результаты и выводы в заключении:

1. Проведен обзор различных методов объединения радиолокационных данных и измерений плювиографов для восстановления пространственной структуры количества осадков. По результатам сравнительного анализа выбран метод интерполяции осадков, как наиболее подходящий для восстановления полей количества осадков за час на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов по данным радиолокатора «ДМРЛ-С» и сети плювиографов АИС «Осадки». Суть данного метода заключается в динамической калибровке радиолокационного поля осадков по наземным измерениям за каждый срок. Этот метод не зависит от однородности рядов радиолокационных измерений. В нашем случае это важный фактор, т.к. алгоритм калибровки радиолокаторов «ДМРЛ-С» может меняться во время метеорологической адаптации.

2. Проведен анализ пространственной структуры количества осадков и невязки радиолокационных и стационарных оценок осадков. Показано, что среднее и стандартное отклонение этих величин неоднородно в пространстве, для невязки также неоднородны во времени. Был сделан вывод, что на данный момент для интерполяции количества осадков и невязки лучше использовать детерминистические методы пространственной интерполяции, а не геостатистические. Также в результате анализа пространственной структуры этих характеристик были найдены радиусы корреляции, которые позволили сделать вывод, что плотности сети АИС «Осадки» достаточно для восстановления значений количества осадков и невязки методом пространственной интерполяции.

3. Для радиолокатора «ДМРЛ-С» и сети плювиографов АИС «Осадки» получены параметры трех основных методов восстановления полей осадков: по

данным радиолокатора, с помощью пространственной интерполяции измерений плювиографов и на основе комбинирования данных этих измерителей. Радиолокационный метод лучше всего работает при использовании коэффициентов  $A=200$   $B=1,6$  для перевода отражаемости в интенсивность осадков. Для интерполяции измерений плювиографов наиболее подходящим интерполятором оказался РБФ ом с параметром  $R=5,5$  км. Комбинированный метод на основе интерполяции невязки имеет наименьшее отклонение от фактических данных при использовании в качестве интерполятора РБФ ом с параметром  $R=3,5$  км. Впервые для интерполяции невязок был использован метод Радиальных базисных функций с обратной мультикватрической функцией, который оказался лучше, чем общепринятый для этой задачи метод Обратных расстояний.

4. На основе сравнительного анализа трех методов восстановления поля часовых сумм осадков на территории СПб и ближайших пригородов сделаны следующие выводы. Метод интерполяции количества осадков лучше всего воспроизводит морозящие осадки. Обложные осадки с одним максимумом лучше воспроизводит метод комбинирования наземных и радиолокационных данных. Обложные осадки со сложной ячеистой структурой воспроизводятся всеми методами примерно одинаково. Интерполяция конвективных осадков сопровождается значительными погрешностями. Преимущества комбинированного метода особо выражены при восстановлении поля конвективных осадков с одним максимумом или имеющего «мультиячейковую» структуру. Проведенный анализ позволяет создать оперативно-действующую технологию восстановления поля количества осадков за час для территории Санкт-Петербурга. Информация о пространственном распределении выпавших атмосферных осадков может быть использована для оптимизации работы городских канализационных сетей.

5. Проведена оценка повторяемости площадей и среднего потока осадков конвективных пятен, которая показала, что по измерениям только имеющейся сети



плювиографов удастся обнаружить лишь меньшую часть наиболее интенсивных пятен осадков. При использовании только данных сети АИС «Осадки» вероятность обнаружения более 75% всех конвективных осадков меньше 11%, а для основной части города меньше 18%. Для пятен с уровнем 9 мм, в которых наблюдается наибольший поток осадков, вероятность обнаружения более 75% всех таких пятен составляет 8%, а для основной части города 13%. Дополнение измерений плювиографов радиолокационными данным позволяет идентифицировать пятна осадков с площадью до 1 км<sup>2</sup>.

б. Предложена методика восстановления полей интенсивности осадков по результатам радиолокационных измерений. Она предусматривает определение коэффициентов в уравнении Маршалла-Пальмара при которых среднеквадратическое отклонение радиолокационных оценок интенсивности осадков от непосредственных измерений этой характеристики плювиографами будет минимальным. Разработанная методика может использоваться при научных исследованиях развития облаков и осадкообразования, а также для анализа случаев выпадения экстремальных осадков. В частности, благодаря этой методике, удалось оценить рост максимальной интенсивности и потока осадков при слиянии мощных кучевых и кучево-дождевых облаков.

В заключение автор выражает благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю, к.ф.-м..н. Тарабукину И. А. за постановку задачи, внимание к работе, терпение, поддержку, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит за оказанную помощь и обсуждение результатов д.т.н. Синькевича А.А; к.ф.-м.н. Дорофеева Е.В. и ведущего геофизика ФГБУ «ГГО» Дмитриеву О.А. за технические консультации; ФГБУ Северо-Западное УГМС за предоставление измерений количества осадков по данным сети АИС «Осадки».

## Список сокращений и условных обозначений

АИС – автоматизированная информационная система

АМСГ – авиационная метеорологическая станция гражданская

АМЦ – авиационный метеорологический центр

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ВСВ – всемирное скоординированное время

в.д. – восточная долгота

ГГО – Главная геофизическая обсерватория

ГУП – государственное унитарное предприятие

ДМРЛ – доплеровский метеорологический радиолокатор

кс – кубический сплайн

ЛП – Локальных полиномов (метод пространственной интерполяции)

МРЛ – метеорологический радиолокатор

м – мультикватрическая функция

ОР – Обратных расстояний (метод пространственной интерполяции)

ом – обратная мультикватрическая функция

ПАС – программно-аппаратный комплекс

ПО – программное обеспечение

РБФ – Радиальных базисных функций (метод пространственной интерполяции)

РПУ – радиопрозрачное укрытие

СПб – Санкт-Петербург

СПО – специальное программное обеспечение

СУБД – система управления базами данных

с.ш. – северная широта

ТД – Триангуляция Делоне (метод пространственной интерполяции)

УВД – управление воздушным движением

ФГБУ – федеральное государственное бюджетное учреждение

ФЦП – федеральная целевая программа

ЦАО – Центральная аэрологическая обсерватория

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

KED – Kriging with External Drift (метод восстановления поля осадков)

MFB – Mean Field Bias (метод восстановления поля осадков)

RMSE – Root Mean Square Error (среднеквадратическое отклонение)

MAE – Mean Absolute Error (среднее абсолютное отклонение)

ME – Mean Error (систематическое отклонения)

### Список используемых источников

1. Абезгауз, Г. Г. Справочник по вероятностным расчетам/ Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина — М.: Воениздат, 1970. — 536 с.
2. Абшаев, А. М (2017). Методы калибровки метеорологических радиолокаторов / М. Т. Абшаев, А. Х. Гергоков, А. Б. Чочаев, Ж. М. Геккиева // Метеорология и гидрология. — № 3. — С. 114—121.
3. Абшаев, М. Т. Структура и динамика развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа / М. Т. Абшаев // Труды ВГИ. — 1984. — вып. 53. — С. 6—22.
4. Автоматизированная информационная система учета атмосферных осадков. [Электронный ресурс] // ООО "КНТП" 2014-2018. — Режим доступа: <http://www.kntp-project.ru/project/avtomatizirovannaya-sistema-ucheta-atmosfernnykh-osadkov.html> (дата обращения: 11.06.2018)
5. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы "Метеоячейка" / Н. В. Бочарников и др.; отв. ред.: Н. В. Бочарников, А. С. Солонин. — СПб: Гидрометеиздат, 2007. — 236 с.
6. Акимов, Н. М. К вопросу о структуре поля фронтальных осадков/ Н. М. Акимов, Н. А. Прихотько // Труды УкрНИГМИ. — 1972. — вып. 118. — С. 124—128.
7. Алибегова, Ж. Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков / Ж. Д. Алибегова. — Л.: Гидрометиздат, 1985. — 224 с.
8. Алибегова, Ж. Д. Пространственная структура поля сумм осадков, осредненных по 15-минутным интервалам / Ж. Д. Алибегова // Труды ГГО. — 1972. — вып. 280. — с. 195—208
9. Атлас особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербург / Отв. ред. В. Н. Храмцов, Т. В. Ковалева, Н. Ю. Нацваладзе. — СПб., 2013. — 176 с.

10. Боровиков, А. М. Радиолокационные измерения осадков / А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин, А. А. Черников. — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 140 с.
11. Богданова, Э. Г. Атмосферные осадки / Э. Г. Богданова, С. Ю. Гаврилова, Б. М. Ильин // Труды ГГО. — 2014. — вып. 573. — с. 39—64.
12. Богомазова, З. П. Исследование выдающихся дождей Северо-Западного района Европейской территории СССР и их зависимости от площади распространения / З. П. Богомазова, З. П. Петрова // Труды ГГИ. — 1947. — вып. 1(55). — с. 15—25.
13. Брылев, Г. Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Г. Б. Брылев, С. Б. Гашина, Г. Л. Низдойминога. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 228 с.
14. Буз, А. И. Вероятность обнаружения маломасштабных явлений в зависимости от их размеров и густоты наблюдательной сети / А. И. Буз // Метеорология и гидрология. — 1970. — № 2. — С. 63—70.
15. Вельтищев, Н. Ф. Мезомасштабный численный анализ осадков с использованием радиолокационных и станционных измерений / Н. Ф. Вельтищев, А. М. Корольков // Метеорология и гидрология. — № 7. — 1995. — С. 15—23.
16. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. — Вторая редакция. — М: Росгидромет, 2017. — 121 с.
17. Гандин, Л. С. Статистические методы интерпретации метеорологических данных / Л. С. Гандин, Р. Л. Каган. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 359 с.

18. Горелик, А. Г. О взаимосвязи радиолокационной отражаемости и интенсивности дождя / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Научный вестник МГТУ ГА. — Серия "Радиофизика и электроника". — № 112. — 2007. — С. 31—46.
19. Гущина, М. В. О статистической структуре поля осадков / М. В. Гущина, Р. Л. Каган // Труды ГГО. — 1966. — вып. 191. — С.35—46.
20. Демьянов, В. В. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева; под ред. Р. В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2010. — 327 с.
21. Дивинский, Л. И. Верификация обнаружения осадков доплеровским метеорологическим радиолокатором / Л. И. Дивинский, А. Д. Кузнецов, М. М. Латонин, О. С. Сероухова // Ученые записки РГГМУ. — 2013. — № 27. — С. 63—70.
22. Довиак, Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрнич. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 512 с.
23. Дорофеев, Е. В. Использование сопоставления метеорологических радиолокационных данных с целью относительной калибровки метеорологических радиолокаторов / Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, В. Б. Попов, И. А. Тарабукин. — Труды ГГО. — 2014. — вып. 572. — С. 153—161.
24. Дядюченко, В. Доплеровские радиолокаторы в России / В. Дядюченко, Ю. Павлюков, И. Вылегжанин // Наука в России. — 2014. — № 1. — С. 23—27.
25. Жарашуев, М. В. Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации / М. В. Жарашуев, А. Х. Гергоков, А. Х. Кагермазов, В. С. Макитов, Л. Т. Созаева // Труды ГГО. — 2018. — вып. 588. — С. 139—149.
26. Инюхин, В.С. К вопросу о точности радиолокационных измерений суммарных осадков / В. С. Инюхин, К. Б. Лиев, А. С. Малкаров, В. В. Суслов // Известия

- Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Нальчик. — 2011. — №3 (41) . — С. 36—43.
27. Исаев А. А. Об изменчивости осадков на территории в теплый период года по данным Обинского экспериментального полигона / А. А. Исаев // Труды ИЭМ. — 1969. — вып. 8. — С. 98—104.
28. Климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области. [Электронный ресурс] // ФГБУ Северо-Западное УГМС. СПб, 2007–2018. Режим доступа: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2> (дата обращения: 22.06.2018)
29. Климат Ленинграда / под ред. Ц. А. Швер, Е. В. Алтыкиса, Л. С. Евтеевой. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 254 с.
30. Коленкова, С. И. К вопросу о горизонтальных размерах слоистообразных облаков / С.И. Коленкова, И.В. Литвинов // Метеорология и гидрология. — 1976. — №9. — с. 42—46.
31. Корольков, А.М. Оценка корреляционных функций сумм осадков по радиолокационным данным / А. М. Корольков // Метеорология и гидрология. — 2000. — № 5, с. 40—46.
32. Косарев, А. Л. Оптическая плотность облаков / А. Л. Косарев, И. П. Мазин, А. П. Невзоров, В. Ф. Шугаев. — М.: Гидрометеиздат, 1976. — 168 с.
33. Краус, Т. В. Радиолокационные исследования слияния облаков / Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С. // Метеорология и гидрология. — 2012. — №9. — с. 42—57.
34. Литвинов И. В. Осадки в атмосфере и на поверхности Земли / И. В. Литвинов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 208 с.
35. Нежиховский, Р. А. Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы / Р. А. Нежиховский. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 224 с.
36. Облака и облачная атмосфера: справочник / под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 646 с.

37. Орлова, Е. М. Краткосрочный прогноз атмосферных осадков. / Е. М. Орлова. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 168 с.
38. Попов, В.Б. Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России / В. Б. Попов, А. А. Синькевич // Труды ГГО. — 2017. — вып. 585. — с. 39—55.
39. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. — Казань: Казанский университет, 2014. — 103 с.
40. Радиолокационные метеорологические наблюдения. Том I: Научно-методические основы / Под ред. А.С. Солониной. — СПб.: Наука, 2010. — 311 с.
41. Рекомендации по анализу результатов пространственного контроля режимной метеорологической информации / Под ред. А. И. Кузьменко. — СПб.: Гидрометеиздат, 1993. — 176 с.
42. Ромов, А. И. О мезоструктуре фронтальных осадков / А. И. Ромов // Метеорология и гидрология. — 1965. — № 6. — С. 19—23.
43. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. — СПб: Гидрометеиздат, 1993. — 356 с.
44. Руководство по эксплуатации, в 6-ти кн. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. ЦИВР.462414.002 РЭ. — М.:ЛЭМЗ, 2011.
45. Сальман, Е. М. Радиолокационные исследования ливней и гроз / Е. М., Сальман // Труды ГГО. — 1957. — вып. 72.
46. Свидетельство № 2013619335 Российская Федерация. СПО ПАС «Метеонаблюдатель»: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / И. С. Басов, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, В. Б. Попов, И. Б. Попов,



- И. А. Тарабукин; заявитель и правообладатель ФГБУ «ГГО» — № 2013617254; заявл. 08.08.13; опубл. 20.12.13, Реестр программ для ЭВМ. — 1 с.
47. Свидетельство № 2015621482 Российская Федерация. «Атмосферные осадки»: свидетельство об официальной регистрации базы данных. / И.А. Тарабукин, И.Б. Попов, В.Б. Попов, И.С. Басов; заявитель и правообладатель ФГБУ «ГГО». — № 2015620561; заявл. 25.05.15; опубл. 20.10.15, Реестр баз данных. — 1 с.
48. Синькевич, А. А. Конвективные облака северо-запада России / А. А. Синькевич. — Л.: Гидрометеиздат. — 2001. — 106 с.
49. Синькевич, А. А. Исследование динамики наковальни кучево-дождевого облака большой вертикальной протяженности / А. А. Синькевич, Т. В. Краус, В. Д. Степаненко и др. // Метеорология и гидрология. — 2009. — №12. — с. 5—17.
50. Синькевич, А.А. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков / А. А. Синькевич, В. Б. Попов, И. А. Тарабукин и др. // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 8. — с. 19—32.
51. Тарабукин, И. А. Методическое письмо об итогах работы в 2013 году функционирующей сети «МРЛ-Штормооповещения» и сети ДМРЛ-С, создаваемой в рамках ФЦП / И. А. Тарабукин, В. С. Огурьев, Е. В. Дорофеев, О. А. Дмитриева, М. В. Львова, И. Б. Попов, В. Б. Попов, И. С. Басов, В. В. Зверев. — СПб: «Моби Дик», 2014. — 53 с.
52. Тарабукин, И. А. Методическое письмо об итогах работы в 2014 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета / И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, О. А. Дмитриева, М. В. Львова, И. Б. Попов, В. Б. Попов, И. С. Басов, В. В. Зверев, А. С. Горбатовская. — СПб: ООО «Д' АРТ», 2015. — 50 с.

53. Тарабукин, И. А. Методическое письмо об итогах работы в 2015 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета / И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, О. А. Дмитриева, И. Б. Попов, В. Б. Попов, И. С. Басов. — СПб: ООО «Д' АРТ», 2016. — 47 с.
54. Тарабукин, И. А. Методическое письмо об итогах работы в 2016 году сети «МРЛ-Штормооповещения» Росгидромета / И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, О. А. Дмитриева, И. Б. Попов, В. Б. Попов, А. А. Смирнов. — СПб: ООО «Амирит», 2017. — 48 с.
55. Тарабукин, И. А. Производство метеорологических радиолокационных наблюдений с применением ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормооповещения и метеобеспечения авиации: Методическое письмо / И. А. Тарабукин, Е. В. Дорофеев, М. В. Львова, О. А. Дмитриева, И. Б. Попов, В. Б. Попов, И. С. Басов, В. В. Зверев. — СПб: ООО «Д' АРТ», 2014. — 177 с.
56. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. / Дж. Тьюки; пер. с англ. В. Ф. Писаренко. — М.: Мир, 1981. — 693 с.
57. Хромов С.П., Мамонтова Л.Н. Метеорологический словарь. / С. П. Хромов, Л. Н. Мамонтова. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 568 с.
58. Ackerman, B. The nature of the meteorological fluctuations in clouds / B. Ackerman // J. Appl. Meteorol. — 1967. — v.6. — P. 61—67
59. Ahmed, S. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity / S. Ahmed, G. de Marsily // Water Resour. Res. — 1987. — 23(9). — P. 1717—1737.
60. Ahnert, P. R. Kalman filter estimation of radar rainfall field bias / P. R. Ahnert, W. F. Krajewski, E. R. Johnson // In Preprints 23th Conf. on Radar Met. — 1976. — P. 33—37.

61. Andrieu, H. Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: Radar measurements interpretation / H. Andrieu, J. D. Creutin, G. Delrieu, D. Faure // *J. Hydrol.* — 1997. — 193. — P. 1—25.
62. Austin, P. M. Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall / P. M. Austin. — *Mon. Weather Rev.* — 1987. — 115. — P. 1053—1071.
63. Barry, J. GEOMPACK - a software package for the generation of meshes using geometric algorithms / J. Barry // *Advances in Engineering Software.* — 1991. — Volume 13. — P. 325—331.
64. Berndt, C. Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios / C. Berndt, E. Rabiei, U. Haberlandt // *J. Hydrol.* — 2014. — 508. — P. 88—101.
65. Borga, M. Validation of a Method for Vertical Profile of Reflectivity Identification through Bright Band Simulation / M. Borga, E. Anagnostou and W. Krajewski // *Proc. III Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar. Sao Paulo, Brazil.* — 1995. — P. 331—343.
66. Brandes, E. A. Optimizing rainfall estimates with aid of radar / E. A. Brandes // *Journal of Applied Meteorology.* — 1975. — vol. 14. — № 7. — P. 1339—1345.
67. Braxton, E. GIS-based Radar Rainfall Verification / E. Braxton. — University of Oklahoma, 2006. — 24 p.
68. Changnon, S. A. Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior / S. A. Changnon // *J. Appl. Meteorol.* — 1976. — vol. 15. — P. 561—570.
69. Collier, C. Accuracy of Rainfall Estimates by Radar. Part I: Calibration by Telemetering Rain-gauges / C. Collier // *Journal of Hydrology.* — 1986. — 83. — P. 207—223.
70. Collier, C. G. The Development of a Weather Radar Network in Western Europe / C. G. Collier // *Seminar of “Weather Radar Networking”.* — 1989. — P. 3—16.

71. Creutin, J.-D. Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: Radar measurements validation / J.-D. Creutin, H. Andrieu, and D. Faure // *J. Hydrol.* — 1997. — 193. — P. 26—44.
72. Danhong, F. Cloud-resolving study on the role of cumulus merger in MCS with heavy precipitation / F. Danhong and G. A. Xueliang // *Adv. atmos. scie.* — 2006. — vol. 23. — No. 6. — P. 857—868.
73. Dirks, K. N. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data / K. N. Dirks, J. E. Hay, C. D. Stow, D. Harris // *Journal of Hydrology.* — 1998. — Volume 208. — Issue 3. — P. 187—193.
74. Erdin, R. Combining Rain Gauge and Radar Measurements of a Heavy Precipitation Event over Switzerland Comparison of Geostatistical Methods and investigation of Important Influencing Factors / R. Erdin. — Master thesis. Veröffentlichung MeteoSchweiz Nr., 2008. — 108 p.
75. Fornasiero, A. Enhanced radar precipitation estimates using a combined clutter and beam blockage correction technique / A. Fornasiero, J. Bech, P. P. Alberoni // *Natural Hazards and Earth System Science.* — 2006. — Vol.6. — No.5. — P. 697—710.
76. Fujiwara, M. An analytical investigation, of the variability of size distribution of rain drops in convective storms / M. Fujiwara // In: *Proceedings of the 8th Weather Radar Conference, Amer. Meteorol. Soc.* — 1960. — P. 159—166.
77. Goudenhoofdt, E. Evaluation of radar–gauge merging methods for quantitative precipitation estimates / E. Goudenhoofdt, L. Delobbe // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* — 2009. — No. 13. — P. 195—203.
78. Haberlandt, U. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall / U. Haberlandt // *J. Hydrol.* — 2007. — Vol. 332. — P. 144—157.

79. Harrold, T. W. The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain / T. W. Harrold, E. J. English, C. A. Nicholass // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* — 1974. — Volume 100. — Issue 425. — P. 331—350.
80. Holleman, I. Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates / I. Holleman // *Meteorol. Appl.* — 2007. — No. 14. — P. 195—203.
81. Huff, F.A. Sampling errors in measurement of mean precipitation / F.A. Huff // *Journal of Applied Meteorology.* — 1970. — Vol. 9. — № 1. — P. 35—44.
82. Johnson, D. Comparing Mean Areal Precipitation Estimates From NEXRAD and Rain Gauge Networks / D. Johnson, M. Smith, V. Koren and B. Finnerty // *Journal of Hydrologic Engineering.* — 1999. — 4(2). — P. 117—124.
83. Joss, J. Precipitation measurement and hydrology: A review / J. Joss and A. Waldvogel // *Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, American Meteorological Society.* — 1990. — P. 577—606.
84. Knight, Y. Comparing rainfall interpolation techniques for small subtropical urban catchments / Y. Knight, B. Yu, G. Jenkins, and K. Morris // *School of Environmental Engineering.* — 2010. — P. 1674—1680.
85. Kogan, Y. L. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger / Y. L. Kogan and A. Shapiro // *J. Atmos. Sci.* — 1996. — Vol. 53. — P. 2525—2545.
86. Krajewski, W. Cokriging radar-rainfall and rain-gage data / W. Krajewski // *J. Gep. Res.* — 1987. — V. 92. — P. 9571—9580.
87. Krauss, T. W. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia / T. W. Krauss, A. A. Sinkevich and A. S. Ghulam // *JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* — 2011. — Vol. 22. — No. 2. — P. 23—39.

88. Marshall, J. S. The distribution of raindrops with size / J. S. Marshall and W. McK. Palmer // *J. Meteor.* — 1948. — No. 5. — P. 165—166.
89. OTT Pluvio<sup>2</sup> - Weighing Rain Gauge [Электронный ресурс] // OTT Hydromet 2017. Режим доступа: <https://www.ott.com/en-us/products/accessories-109/ott-pluvio2-weighing-rain-gauge-963/> (дата обращения: 13.06.2018)
90. Pozo, D. A numerical study of cell merger over Cuba, Part II: Sensitivity to environmental conditions / D. Pozo, I. Borrajero, J. C. Marin, and G. B. Raga // *Ann. Geophys.* — 2006. — Vol. 24. — P. 2793—2808.
91. Schiemann, R. Geostatistical radar-raingauge combination with nonparametric correlograms: Methodological considerations and application in Switzerland / R. Schiemann, R. Erdin, M. Willi, C. Frei, M. Berenguer and D. Sempere-Torres // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* — 2011. — V. 15. — P. 1515—1536.
92. Sherman, J. W. Aperture-antenna analysis / J. W. Sherman. — New York.: McGraw Hill, 1970.
93. Simpson, J. On cumulus mergers / J. Simpson, N. E. Westcott, R. J. Clerman, and R. A. Pielke // *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim.* — 1980. — Vol. 29A. — P. 1—40.
94. Sinkevich, A. A. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging / A. A. Sinkevich and T. E. Krauss // *J. Atmos. Res.* — Vol. 142. — P. 124—132.
95. Skinner, C. Comparison of NEXRAD and Rain Gauge Precipitation Measurements in South Florida / C. Skinner, F. Bloetscher and C. Pathak // *Journal of Hydrologic Engineering.* — 2009. — V. 14(3). — P. 248—260.
96. Smith, J. Estimation of the Mean Field Bias of Radar Rainfall Estimates / J. Smith and W. Krajewski // *Journal of Applied Meteorology.* — 1991. — V. 30. — P. 397—412.

97. Tabary, P. The new French radar rainfall product. Part I: Methodology / P. Tabary // *Wea. Forecasting*. — 2007. — V. 22. — P. 393—408.
98. Tabios, G. Q. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation / G. Q. Tabios and J. D. Salas // *J. Amer. Water Resour. Assoc.* — 1985. — V. 21. — P. 365—380.
99. Velasco-Forero, C. A. A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data / C. A. Velasco-Forero, D. Sempere-Torres, E. F. Cassiraga, and J. Jaime G´omezHern´andez // *Advances in Water Resources*. — 2008. — V. 32. — P. 986—1002.
100. Verworn, A. Spatial interpolation of hourly rainfall. Effect of additional information, variogram inference and storm properties / A. Verworn, and U. Haberlandt // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* — 2011. — V. 15. — P. 569—584.
101. Ware, E. C. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data / E. C. Ware // M.S. thesis. Cornell University, 2005. — 87 p.
102. Westcott, N. E. A historical perspective on cloud mergers / N. E. Westcott // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 1984. — Vol. 65. — P. 219—227.
103. Westcott, N. E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging, and subsequent growth / N. E. Westcott // *Mon. Wea. Rev.* — 1994. — Vol. 122. — P. 780—790.
104. Wexler, R. Rain intensities by radar / R. Wexler // *J. Meteorol.* — 1948. — Vol. 5. — P. 171—173.
105. Wiggert, V. G. mRainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status / V. G. Wiggert, J. Lockett and S. S. Ostlund // *Mon. Wea. Rev.* — 1981. — Vol. 109. — P. 1467—1494.
106. Woodley, W.L. Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement / W. L. Woodley, A. R. Olsen, A. Herndon, V. Winggert // *Journal of Applied Meteorology*. — 1975. — Vol. 14. — № 5. — P. 909—928.

107. Yang, D. Application of a Distributed Hydrological Model and Weather Radar Observations for Flood Management in the Upper Tone River of Japan / D. Yang, T. Koike and H. Tanizawa // *Hydrological Processes*. — 2004. — 18(16). — P. 3119—3132.
108. Zawadzki, I. Factors affecting the precision of radar measurement of rain / I. Zawadzki // *Preprints, 22nd Int. Conf. on Radar Meteorology, Zurich, Switzerland, Amer. Meteor. Soc.* — 1984. — P. 251—256.
109. Zhang, J. A Real-Time Algorithm for Merging Radar QPEs with Rain Gauge Observations and Orographic Precipitation Climatology / J. Zhang, Y. Qi, C. Langston // *J. Hydrometeorol.* — 2014. — 15(5). — P. 1794—1809.
110. Zhang, J., and Coauthors, 2011: National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans / J. Zhang and coauthors // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* — 2011. — Vol. 92. — P. 1321—1338.



## Приложение А

### Значения статистических характеристик восстановления поля осадков по данным «ДМРЛ-С»

*Примечание* – Выделены наилучшие значения каждой характеристики

Таблица А.1 – Вся выборка

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	0,69	0,20	-0,15	0,69	$0,38 \pm 0,002$	$0,06 \pm 0,002$
	A=230 B =1,5	0,70	0,20	-0,16	0,64	$0,37 \pm 0,002$	$0,05 \pm 0,002$
	A=220 B =1,54	0,70	0,20	-0,15	0,65	$0,37 \pm 0,002$	$0,05 \pm 0,002$
2017	A=200 B =1,6	0,57	0,20	0,00	0,71	$0,71 \pm 0,003$	$0,1 \pm 0,003$
	A=230 B =1,5	0,60	0,20	-0,01	0,68	$0,74 \pm 0,003$	$0,08 \pm 0,004$
	A=220 B =1,54	0,59	0,20	-0,01	0,69	$0,72 \pm 0,003$	$0,09 \pm 0,004$

Таблица А.2 –  $Q_{Gmax} \leq 0,6$  мм

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	0,09	0,03	0,00	0,25	$0,58 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,001$
	A=230 B =1,5	0,09	0,03	0,00	0,15	$0,52 \pm 0,013$	$0,01 \pm 0,001$
	A=220 B =1,54	0,09	0,03	0,00	0,16	$0,54 \pm 0,013$	$0,01 \pm 0,001$
2017	A=200 B =1,6	0,15	0,05	0,04	0,22	$1,06 \pm 0,022$	$0,03 \pm 0,002$
	A=230 B =1,5	0,16	0,04	0,03	0,17	$0,97 \pm 0,023$	$0,03 \pm 0,002$
	A=220 B =1,54	0,15	0,05	0,03	0,19	$1 \pm 0,022$	$0,03 \pm 0,002$

Таблица А.3 –  $Q_{Gmax} \in 0,6-1,5$  мм

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	0,18	0,08	-0,03	0,47	$0,51 \pm 0,008$	$0,03 \pm 0,002$
	A=230 B =1,5	0,20	0,09	-0,04	0,38	$0,47 \pm 0,009$	$0,03 \pm 0,003$
	A=220 B =1,54	0,20	0,08	-0,04	0,39	$0,49 \pm 0,009$	$0,03 \pm 0,003$
2017	A=200 B =1,6	0,25	0,12	0,05	0,50	$0,89 \pm 0,012$	$0,07 \pm 0,004$
	A=230 B =1,5	0,25	0,11	0,04	0,47	$0,85 \pm 0,012$	$0,06 \pm 0,004$
	A=220 B =1,54	0,25	0,11	0,04	0,49	$0,86 \pm 0,012$	$0,06 \pm 0,004$

Таблица А.4 –  $Q_{Gmax} \in 1,5-3$  мм

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	0,44	0,25	-0,17	0,54	$0,47 \pm 0,007$	$0,06 \pm 0,005$
	A=230 B =1,5	0,46	0,26	-0,20	0,52	$0,45 \pm 0,007$	$0,05 \pm 0,005$
	A=220 B =1,54	0,45	0,26	-0,19	0,53	$0,45 \pm 0,007$	$0,05 \pm 0,005$
2017	A=200 B =1,6	0,45	0,23	0,05	0,54	$0,82 \pm 0,012$	$0,13 \pm 0,008$
	A=230 B =1,5	0,48	0,23	0,03	0,51	$0,81 \pm 0,012$	$0,11 \pm 0,009$
	A=220 B =1,54	0,46	0,23	0,04	0,52	$0,81 \pm 0,012$	$0,11 \pm 0,008$

Таблица А.5 –  $Q_{Gmax} \in 3-5$  мм

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	0,77	0,40	-0,32	0,64	$0,45 \pm 0,008$	$0,08 \pm 0,011$
	A=230 B =1,5	0,80	0,42	-0,34	0,61	$0,43 \pm 0,008$	$0,07 \pm 0,011$
	A=220 B =1,54	0,79	0,41	-0,34	0,63	$0,43 \pm 0,008$	$0,07 \pm 0,01$
2017	A=200 B =1,6	0,62	0,32	-0,02	0,67	$0,77 \pm 0,011$	$0,14 \pm 0,014$
	A=230 B =1,5	0,69	0,34	-0,03	0,63	$0,79 \pm 0,012$	$0,12 \pm 0,016$
	A=220 B =1,54	0,66	0,33	-0,03	0,64	$0,77 \pm 0,012$	$0,12 \pm 0,015$

Таблица А.3 –  $Q_{Gmax} > 5$  мм

Год	Коэффициенты $Z-I$ соотношения	$RMSE$	$MAE$	$ME$	$R^2$	$a \pm da$	$b \pm db$
2016	A=200 B =1,6	1,94	0,96	-0,87	0,67	$0,33 \pm 0,005$	$0,18 \pm 0,015$
	A=230 B =1,5	1,98	0,99	-0,89	0,60	$0,33 \pm 0,006$	$0,17 \pm 0,017$
	A=220 B =1,54	1,99	0,98	-0,89	0,62	$0,33 \pm 0,006$	$0,17 \pm 0,016$
2017	A=200 B =1,6	1,47	0,76	-0,33	0,68	$0,66 \pm 0,009$	$0,25 \pm 0,028$
	A=230 B =1,5	1,55	0,79	-0,30	0,64	$0,7 \pm 0,011$	$0,21 \pm 0,033$
	A=220 B =1,54	1,51	0,78	-0,33	0,66	$0,68 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,031$

## Приложение Б

### Значения статистических характеристик восстановления поля осадков по данным АИС «Осадки»

*Примечание* – Выделены наилучшие значения каждой характеристики

Таблица Б.1 – Вся выборка

<i>Интерполятор</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>A±da</i>	<i>B±db</i>
ОР $\beta=1$	0,71	0,26	0,00	0,53	0,51 ± 0,002	0,17 ± 0,003
ОР $\beta=3$	0,62	0,20	0,00	0,64	0,66 ± 0,002	0,12 ± 0,003
ОР $\beta=5$	0,63	0,19	0,00	0,63	0,72 ± 0,002	0,1 ± 0,004
ЛП $R=22$	0,73	0,24	0,01	0,52	0,62 ± 0,002	0,16 ± 0,004
ЛП $R=24$	0,71	0,24	0,01	0,54	0,61 ± 0,002	0,16 ± 0,004
ЛП $R=26$	0,70	0,24	0,01	0,54	0,61 ± 0,002	0,16 ± 0,004
ЛП $R=28$	0,70	0,24	0,01	0,54	0,6 ± 0,002	0,16 ± 0,004
ТД	2,97	0,40	0,12	0,06	0,75 ± 0,012	0,3 ± 0,019
РБФ м $R=3,5$	0,65	0,20	0,01	0,62	0,75 ± 0,002	0,11 ± 0,004
РБФ м $R=5,5$	0,68	0,21	0,02	0,60	0,76 ± 0,002	0,11 ± 0,004
РБФ м $R=7,5$	0,73	0,23	0,02	0,56	0,77 ± 0,003	0,12 ± 0,004
РБФ м $R=9,5$	0,79	0,25	0,03	0,52	0,78 ± 0,003	0,14 ± 0,005
РБФ ом $R=3,5$	0,62	0,19	-0,04	0,64	0,6 ± 0,002	0,1 ± 0,002
РБФ ом $R=5,5$	0,62	0,19	-0,02	0,64	0,66 ± 0,002	0,1 ± 0,003
РБФ ом $R=7,5$	0,64	0,19	0,00	0,62	0,7 ± 0,002	0,1 ± 0,004
РБФ ом $R=9,5$	0,67	0,21	0,01	0,60	0,73 ± 0,002	0,11 ± 0,004
РБФ кс $R=3,5$	0,85	0,26	0,04	0,49	0,78 ± 0,003	0,15 ± 0,005
РБФ кс $R=5,5$	0,92	0,28	0,05	0,45	0,79 ± 0,004	0,16 ± 0,005
РБФ кс $R=7,5$	1,03	0,31	0,07	0,39	0,8 ± 0,004	0,19 ± 0,007
РБФ кс $R=9,5$	1,20	0,35	0,09	0,33	0,81 ± 0,005	0,21 ± 0,008

Таблица Б.2 –  $Q_{Gmax} \leq 0,6$  мм

<i>Интерполятор</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>A±da</i>	<i>B±db</i>
ОР $\beta=1$	0,06	0,03	0,00	0,25	0,23 ± 0,003	0,02 ± 0
ОР $\beta=3$	0,06	0,02	0,00	0,29	0,35 ± 0,004	0,01 ± 0
ОР $\beta=5$	0,06	0,02	0,00	0,27	0,4 ± 0,005	0,01 ± 0
ЛП $R=22$	0,07	0,03	0,01	0,22	0,37 ± 0,006	0,02 ± 0
ЛП $R=24$	0,06	0,03	0,01	0,24	0,36 ± 0,005	0,02 ± 0
ЛП $R=26$	0,06	0,03	0,01	0,24	0,35 ± 0,005	0,02 ± 0
ЛП $R=28$	0,06	0,03	0,00	0,25	0,34 ± 0,005	0,02 ± 0

## Продолжение таблицы Б.2

ТД	0,33	0,05	0,04	0,02	0,58 ± 0,035	0,04 ± 0,003
РБФ <sub>М</sub> R=3,5	0,07	0,03	0,00	0,26	0,45 ± 0,006	0,02 ± 0
РБФ <sub>М</sub> R=5,5	0,07	0,03	0,01	0,23	0,46 ± 0,007	0,02 ± 0
РБФ <sub>М</sub> R=7,5	0,08	0,03	0,01	0,19	0,46 ± 0,007	0,02 ± 0,001
РБФ <sub>М</sub> R=9,5	0,09	0,04	0,02	0,16	0,46 ± 0,008	0,02 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=3,5	0,06	0,02	0,00	0,29	0,32 ± 0,004	0,01 ± 0
РБФ <sub>ОМ</sub> R=5,5	0,06	0,02	0,00	0,29	0,38 ± 0,004	0,01 ± 0
РБФ <sub>ОМ</sub> R=7,5	0,07	0,03	0,00	0,26	0,4 ± 0,006	0,02 ± 0
РБФ <sub>ОМ</sub> R=9,5	0,07	0,03	0,01	0,22	0,42 ± 0,006	0,02 ± 0
РБФ <sub>КС</sub> R=3,5	0,09	0,04	0,02	0,14	0,48 ± 0,009	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=5,5	0,10	0,04	0,02	0,11	0,48 ± 0,01	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=7,5	0,12	0,05	0,03	0,08	0,49 ± 0,012	0,04 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=9,5	0,14	0,05	0,04	0,06	0,49 ± 0,014	0,04 ± 0,001

Таблица Б.3 –  $Q_{Gmax} \in 0,6-1,5$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	R <sup>2</sup>	A±da	B±db
ОР β=1	0,21	0,12	0,00	0,34	0,32 ± 0,004	0,09 ± 0,002
ОР β=3	0,20	0,10	0,00	0,44	0,47 ± 0,005	0,07 ± 0,002
ОР β=5	0,20	0,10	0,00	0,42	0,52 ± 0,006	0,06 ± 0,002
ЛП R=22	0,23	0,12	0,02	0,33	0,48 ± 0,007	0,08 ± 0,002
ЛП R=24	0,21	0,11	0,02	0,36	0,45 ± 0,006	0,08 ± 0,002
ЛП R=26	0,21	0,11	0,02	0,37	0,44 ± 0,006	0,08 ± 0,002
ЛП R=28	0,21	0,12	0,01	0,37	0,43 ± 0,006	0,09 ± 0,002
ТД	0,91	0,19	0,14	0,03	0,58 ± 0,034	0,15 ± 0,012
РБФ <sub>М</sub> R=3,5	0,21	0,10	0,01	0,43	0,57 ± 0,007	0,07 ± 0,002
РБФ <sub>М</sub> R=5,5	0,22	0,11	0,02	0,40	0,58 ± 0,008	0,07 ± 0,003
РБФ <sub>М</sub> R=7,5	0,24	0,11	0,04	0,35	0,58 ± 0,008	0,08 ± 0,003
РБФ <sub>М</sub> R=9,5	0,26	0,13	0,05	0,30	0,58 ± 0,009	0,09 ± 0,003
РБФ <sub>ОМ</sub> R=3,5	0,20	0,09	-0,02	0,44	0,43 ± 0,005	0,06 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=5,5	0,20	0,09	-0,01	0,44	0,49 ± 0,006	0,06 ± 0
РБФ <sub>ОМ</sub> R=7,5	0,20	0,10	0,00	0,42	0,53 ± 0,006	0,06 ± 0
РБФ <sub>ОМ</sub> R=9,5	0,22	0,10	0,01	0,39	0,54 ± 0,007	0,07 ± 0
РБФ <sub>КС</sub> R=3,5	0,30	0,13	0,06	0,26	0,61 ± 0,01	0,09 ± 0,004
РБФ <sub>КС</sub> R=5,5	0,33	0,15	0,08	0,22	0,61 ± 0,012	0,1 ± 0,004
РБФ <sub>КС</sub> R=7,5	0,38	0,16	0,10	0,18	0,61 ± 0,013	0,12 ± 0,005
РБФ <sub>КС</sub> R=9,5	0,44	0,18	0,13	0,13	0,6 ± 0,016	0,14 ± 0,006

Таблица Б.4 –  $Q_{Gmax} \in 1,5-3$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
ОР $\beta=1$	0,45	0,29	0,00	0,41	$0,38 \pm 0,005$	$0,26 \pm 0,004$
ОР $\beta=3$	0,39	0,22	0,00	0,55	$0,56 \pm 0,006$	$0,18 \pm 0,005$
ОР $\beta=5$	0,40	0,21	0,00	0,54	$0,63 \pm 0,006$	$0,15 \pm 0,005$
ЛП $R=22$	0,46	0,27	0,03	0,42	$0,55 \pm 0,007$	$0,21 \pm 0,006$
ЛП $R=24$	0,44	0,26	0,02	0,46	$0,54 \pm 0,007$	$0,21 \pm 0,005$
ЛП $R=26$	0,43	0,26	0,02	0,46	$0,53 \pm 0,006$	$0,22 \pm 0,005$
ЛП $R=28$	0,44	0,27	0,02	0,46	$0,52 \pm 0,006$	$0,22 \pm 0,005$
ТД	2,37	0,50	0,26	0,02	$0,62 \pm 0,044$	$0,4 \pm 0,038$
РБФ м $R=3,5$	0,41	0,22	0,02	0,55	$0,68 \pm 0,007$	$0,15 \pm 0,006$
РБФ м $R=5,5$	0,43	0,23	0,03	0,52	$0,69 \pm 0,008$	$0,15 \pm 0,006$
РБФ м $R=7,5$	0,46	0,25	0,04	0,48	$0,69 \pm 0,008$	$0,16 \pm 0,007$
РБФ м $R=9,5$	0,50	0,27	0,05	0,43	$0,69 \pm 0,008$	$0,18 \pm 0,007$
РБФ ом $R=3,5$	0,39	0,21	-0,05	0,56	$0,52 \pm 0,005$	$0,15 \pm 0,004$
РБФ ом $R=5,5$	0,39	0,21	-0,02	0,56	$0,59 \pm 0,006$	$0,15 \pm 0$
РБФ ом $R=7,5$	0,40	0,21	-0,01	0,55	$0,63 \pm 0,006$	$0,14 \pm 0$
РБФ ом $R=9,5$	0,42	0,23	0,01	0,52	$0,65 \pm 0,007$	$0,15 \pm 0$
РБФ кс $R=3,5$	0,58	0,29	0,06	0,36	$0,7 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,009$
РБФ кс $R=5,5$	0,63	0,31	0,08	0,31	$0,69 \pm 0,011$	$0,2 \pm 0,01$
РБФ кс $R=7,5$	0,72	0,34	0,10	0,26	$0,69 \pm 0,013$	$0,23 \pm 0,011$
РБФ кс $R=9,5$	0,83	0,38	0,13	0,20	$0,68 \pm 0,015$	$0,26 \pm 0,013$

Таблица Б.5 –  $Q_{Gmax} \in 3-5$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
ОР $\beta=1$	0,83	0,52	0,00	0,39	$0,36 \pm 0,007$	$0,43 \pm 0,01$
ОР $\beta=3$	0,73	0,40	-0,01	0,53	$0,55 \pm 0,008$	$0,31 \pm 0,012$
ОР $\beta=5$	0,75	0,38	-0,01	0,52	$0,61 \pm 0,009$	$0,26 \pm 0,014$
ЛП $R=22$	0,84	0,48	0,04	0,40	$0,52 \pm 0,01$	$0,38 \pm 0,015$
ЛП $R=24$	0,82	0,47	0,03	0,42	$0,49 \pm 0,009$	$0,39 \pm 0,013$
ЛП $R=26$	0,81	0,48	0,03	0,42	$0,48 \pm 0,009$	$0,39 \pm 0,013$
ЛП $R=28$	0,82	0,49	0,02	0,41	$0,46 \pm 0,008$	$0,4 \pm 0,013$
ТД	3,28	0,77	0,40	0,04	$0,61 \pm 0,047$	$0,66 \pm 0,072$
РБФ м $R=3,5$	0,74	0,38	0,03	0,55	$0,68 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,014$
РБФ м $R=5,5$	0,78	0,40	0,04	0,52	$0,69 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,015$
РБФ м $R=7,5$	0,83	0,44	0,07	0,49	$0,7 \pm 0,011$	$0,29 \pm 0,017$
РБФ м $R=9,5$	0,89	0,47	0,10	0,44	$0,7 \pm 0,012$	$0,32 \pm 0,018$
РБФ ом $R=3,5$	0,73	0,38	-0,09	0,55	$0,51 \pm 0,007$	$0,26 \pm 0,009$
РБФ ом $R=5,5$	0,72	0,37	-0,04	0,55	$0,58 \pm 0,008$	$0,26 \pm 0$
РБФ ом $R=7,5$	0,74	0,38	-0,02	0,54	$0,62 \pm 0,009$	$0,26 \pm 0$

## Продолжение таблицы Б.5

РБФ $OM R=9,5$	0,77	0,40	0,01	0,51	$0,65 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0$
РБФ $КС R=3,5$	0,96	0,49	0,12	0,41	$0,73 \pm 0,013$	$0,33 \pm 0,02$
РБФ $КС R=5,5$	1,05	0,53	0,16	0,37	$0,73 \pm 0,014$	$0,36 \pm 0,022$
РБФ $КС R=7,5$	1,18	0,59	0,21	0,31	$0,73 \pm 0,017$	$0,41 \pm 0,025$
РБФ $КС R=9,5$	1,38	0,66	0,27	0,24	$0,73 \pm 0,019$	$0,47 \pm 0,029$

Таблица Б.6 –  $Q_{Gmax} > 5$  мм

<i>Интерполятор</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	$R^2$	<i>A±da</i>	<i>B±db</i>
ОР $\beta=1$	1,95	1,18	0,00	0,40	$0,36 \pm 0,007$	$1,04 \pm 0,02$
ОР $\beta=3$	1,70	0,90	0,03	0,53	$0,56 \pm 0,008$	$0,74 \pm 0,023$
ОР $\beta=5$	1,75	0,86	0,03	0,53	$0,64 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,027$
ЛП $R=22$	2,01	1,09	0,05	0,38	$0,48 \pm 0,01$	$0,88 \pm 0,027$
ЛП $R=24$	1,96	1,09	0,04	0,40	$0,48 \pm 0,009$	$0,88 \pm 0,027$
ЛП $R=26$	1,95	1,09	0,04	0,41	$0,48 \pm 0,009$	$0,88 \pm 0,026$
ЛП $R=28$	1,95	1,10	0,04	0,41	$0,48 \pm 0,009$	$0,88 \pm 0,026$
ТД	8,00	1,78	0,88	0,03	$0,51 \pm 0,048$	$1,59 \pm 0,142$
РБФ $М R=3,5$	1,81	0,89	0,08	0,51	$0,66 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,029$
РБФ $М R=5,5$	1,90	0,95	0,11	0,49	$0,67 \pm 0,01$	$0,64 \pm 0,031$
РБФ $М R=7,5$	2,02	1,02	0,16	0,45	$0,68 \pm 0,011$	$0,68 \pm 0,033$
РБФ $М R=9,5$	2,20	1,12	0,24	0,40	$0,68 \pm 0,013$	$0,74 \pm 0,037$
РБФ $OM R=3,5$	1,70	0,85	-0,18	0,54	$0,52 \pm 0,007$	$0,61 \pm 0,021$
РБФ $OM R=5,5$	1,72	0,84	-0,08	0,53	$0,58 \pm 0,008$	$0,6 \pm 0,024$
РБФ $OM R=7,5$	1,77	0,88	-0,02	0,51	$0,62 \pm 0,009$	$0,6 \pm 0,027$
РБФ $OM R=9,5$	1,87	0,94	0,04	0,48	$0,64 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,03$
РБФ $КС R=3,5$	2,32	1,15	0,26	0,37	$0,67 \pm 0,013$	$0,78 \pm 0,039$
РБФ $КС R=5,5$	2,52	1,24	0,34	0,33	$0,67 \pm 0,014$	$0,85 \pm 0,042$
РБФ $КС R=7,5$	2,81	1,37	0,46	0,28	$0,67 \pm 0,017$	$0,96 \pm 0,048$
РБФ $КС R=9,5$	3,24	1,54	0,61	0,22	$0,65 \pm 0,019$	$1,12 \pm 0,056$

## Приложение В

### Значения статистических характеристик восстановления поля осадков по данным АИС «Осадки» и «ДМРЛ-С»

*Примечание* – Выделены наилучшие значения каждой характеристики

Таблица В.1 – Вся выборка

<i>Интерполятор</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>A±da</i>	<i>B±db</i>
ОР $\beta=1$	0.54	0.17	0.01	0.73	0.73 ± 0.002	0.09 ± 0.002
ОР $\beta=3$	0.51	0.15	0.01	0.76	0.82 ± 0.002	0.08 ± 0.002
ОР $\beta=5$	0.53	0.16	0.01	0.74	0.87 ± 0.003	0.07 ± 0.002
ЛП $R=22$	0.58	0.18	0.02	0.69	0.8 ± 0.003	0.1 ± 0.003
ЛП $R=24$	0.56	0.17	0.02	0.71	0.79 ± 0.003	0.09 ± 0.002
ЛП $R=26$	0.55	0.17	0.02	0.72	0.79 ± 0.003	0.09 ± 0.002
ЛП $R=28$	0.55	0.17	0.02	0.72	0.79 ± 0.003	0.09 ± 0.002
ТД	1.96	0.28	0.05	0.18	0.91 ± 0.009	0.15 ± 0.009
РБФ <sub>м</sub> $R=3,5$	0.56	0.17	0.02	0.73	0.88 ± 0.003	0.08 ± 0.003
РБФ <sub>м</sub> $R=5,5$	0.59	0.18	0.02	0.71	0.89 ± 0.003	0.09 ± 0.003
РБФ <sub>м</sub> $R=7,5$	0.64	0.19	0.03	0.67	0.9 ± 0.003	0.1 ± 0.003
РБФ <sub>м</sub> $R=9,5$	0.72	0.21	0.03	0.63	0.91 ± 0.004	0.1 ± 0.003
РБФ <sub>ом</sub> $R=3,5$	0.51	0.15	0.01	0.75	0.8 ± 0.002	0.08 ± 0.002
РБФ <sub>ом</sub> $R=5,5$	0.53	0.16	0.02	0.74	0.82 ± 0.002	0.08 ± 0.002
РБФ <sub>ом</sub> $R=7,5$	0.55	0.17	0.02	0.73	0.86 ± 0.003	0.08 ± 0.002
РБФ <sub>ом</sub> $R=9,5$	0.59	0.18	0.02	0.70	0.88 ± 0.003	0.09 ± 0.003
РБФ <sub>кс</sub> $R=3,5$	0.76	0.22	0.03	0.59	0.9 ± 0.004	0.11 ± 0.004
РБФ <sub>кс</sub> $R=5,5$	0.87	0.24	0.04	0.54	0.92 ± 0.004	0.12 ± 0.004
РБФ <sub>кс</sub> $R=7,5$	1.02	0.27	0.05	0.46	0.94 ± 0.004	0.14 ± 0.005
РБФ <sub>кс</sub> $R=9,5$	1.23	0.31	0.06	0.38	0.95 ± 0.005	0.16 ± 0.006

Таблица В.2 –  $Q_{Gmax} \leq 0,6$  мм

<i>Интерполятор</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>A±da</i>	<i>B±db</i>
ОР $\beta=1$	0.12	0.03	0.01	0.16	0.69 ± 0.012	0.02 ± 0.001
ОР $\beta=3$	0.09	0.03	0.01	0.24	0.73 ± 0.009	0.02 ± 0.001
ОР $\beta=5$	0.13	0.03	0.01	0.17	0.76 ± 0.014	0.02 ± 0.001
ЛП $R=22$	0.13	0.03	0.01	0.17	0.75 ± 0.014	0.02 ± 0.001
ЛП $R=24$	0.12	0.03	0.01	0.17	0.74 ± 0.014	0.02 ± 0.001
ЛП $R=26$	0.12	0.03	0.01	0.17	0.74 ± 0.012	0.02 ± 0.001
ЛП $R=28$	0.12	0.03	0.01	0.17	0.74 ± 0.012	0.02 ± 0.001
ТД	0.41	0.05	0.02	0.03	0.96 ± 0.044	0.03 ± 0.003

## Продолжение таблицы В.2

РБФ <sub>М</sub> R=3,5	0,13	0,04	0,03	0,21	0,94 ± 0,015	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>М</sub> R=5,5	0,14	0,05	0,04	0,20	0,95 ± 0,015	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>М</sub> R=7,5	0,15	0,05	0,04	0,19	0,95 ± 0,016	0,04 ± 0,001
РБФ <sub>М</sub> R=9,5	0,16	0,06	0,05	0,17	0,97 ± 0,017	0,04 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=3,5	0,14	0,04	0,03	0,19	0,91 ± 0,014	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=5,5	0,14	0,04	0,03	0,19	0,93 ± 0,014	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=7,5	0,14	0,04	0,03	0,21	0,93 ± 0,015	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>ОМ</sub> R=9,5	0,14	0,05	0,04	0,20	0,94 ± 0,015	0,03 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=3,5	0,17	0,06	0,05	0,15	0,95 ± 0,017	0,04 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=5,5	0,19	0,06	0,05	0,13	0,98 ± 0,02	0,05 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=7,5	0,22	0,07	0,06	0,11	0,99 ± 0,023	0,05 ± 0,001
РБФ <sub>КС</sub> R=9,5	0,26	0,08	0,07	0,08	1 ± 0,027	0,06 ± 0,001

Таблица В.3 –  $Q_{Gmax} \in 0,6-1,5$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	R <sup>2</sup>	A±da	B±db
ОР β=1	0.19	0.08	0.01	0.53	0.72 ± 0.007	0.04 ± 0.001
ОР β=3	0.19	0.08	0.01	0.56	0.78 ± 0.007	0.04 ± 0.002
ОР β=5	0.20	0.08	0.02	0.54	0.81 ± 0.008	0.04 ± 0.002
ЛП R=22	0.21	0.09	0.02	0.51	0.78 ± 0.008	0.05 ± 0.002
ЛП R=24	0.20	0.09	0.02	0.53	0.76 ± 0.008	0.05 ± 0.002
ЛП R=26	0.20	0.09	0.02	0.53	0.76 ± 0.007	0.05 ± 0.001
ЛП R=28	0.20	0.09	0.02	0.54	0.75 ± 0.007	0.05 ± 0.001
ТД	0.70	0.14	0.04	0.12	0.97 ± 0.027	0.08 ± 0.006
РБФ <sub>М</sub> R=3,5	0.20	0.09	0.02	0.54	0.81 ± 0.008	0.05 ± 0.002
РБФ <sub>М</sub> R=5,5	0.21	0.09	0.02	0.53	0.82 ± 0.008	0.06 ± 0.002
РБФ <sub>М</sub> R=7,5	0.23	0.10	0.02	0.50	0.83 ± 0.008	0.06 ± 0.002
РБФ <sub>М</sub> R=9,5	0.25	0.11	0.03	0.45	0.83 ± 0.009	0.07 ± 0.002
РБФ <sub>ОМ</sub> R=3,5	0.19	0.08	0.01	0.56	0.79 ± 0.007	0.04 ± 0.002
РБФ <sub>ОМ</sub> R=5,5	0.21	0.08	0.02	0.51	0.79 ± 0.008	0.05 ± 0.002
РБФ <sub>ОМ</sub> R=7,5	0.20	0.09	0.02	0.54	0.81 ± 0.008	0.05 ± 0.002
РБФ <sub>ОМ</sub> R=9,5	0.21	0.09	0.02	0.52	0.81 ± 0.008	0.06 ± 0.002
РБФ <sub>КС</sub> R=3,5	0.28	0.11	0.03	0.41	0.83 ± 0.01	0.07 ± 0.003
РБФ <sub>КС</sub> R=5,5	0.32	0.13	0.04	0.35	0.85 ± 0.012	0.08 ± 0.003
РБФ <sub>КС</sub> R=7,5	0.37	0.14	0.04	0.29	0.85 ± 0.014	0.09 ± 0.003
РБФ <sub>КС</sub> R=9,5	0.44	0.16	0.05	0.22	0.85 ± 0.016	0.11 ± 0.004



Таблица В.4 –  $Q_{Gmax} \in 1,5-3$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	R <sup>2</sup>	A±da	B±db
ОР β=1	0.37	0.19	0.01	0.61	0.72 ± 0.007	0.11 ± 0.005
ОР β=3	0.36	0.18	0.02	0.65	0.8 ± 0.007	0.1 ± 0.005
ОР β=5	0.38	0.18	0.02	0.63	0.83 ± 0.008	0.1 ± 0.006
ЛП R=22	0.41	0.20	0.02	0.59	0.78 ± 0.008	0.12 ± 0.006
ЛП R=24	0.39	0.20	0.02	0.61	0.78 ± 0.008	0.11 ± 0.005
ЛП R=26	0.38	0.20	0.02	0.62	0.77 ± 0.007	0.11 ± 0.005
ЛП R=28	0.38	0.20	0.02	0.62	0.77 ± 0.007	0.11 ± 0.005
ТД	1.39	0.33	0.06	0.11	0.83 ± 0.029	0.2 ± 0.021
РБФ м R=3,5	0.39	0.19	0.02	0.63	0.83 ± 0.008	0.11 ± 0.006
РБФ м R=5,5	0.42	0.20	0.03	0.60	0.84 ± 0.008	0.11 ± 0.006
РБФ м R=7,5	0.45	0.22	0.03	0.57	0.84 ± 0.009	0.13 ± 0.007
РБФ м R=9,5	0.51	0.24	0.03	0.51	0.84 ± 0.01	0.14 ± 0.007
РБФ ом R=3,5	0.36	0.17	0.01	0.65	0.79 ± 0.007	0.1 ± 0.005
РБФ ом R=5,5	0.38	0.18	0.02	0.63	0.8 ± 0.007	0.1 ± 0.005
РБФ ом R=7,5	0.39	0.19	0.02	0.63	0.82 ± 0.008	0.11 ± 0.006
РБФ ом R=9,5	0.41	0.20	0.02	0.61	0.83 ± 0.008	0.11 ± 0.006
РБФ кс R=3,5	0.56	0.25	0.03	0.45	0.83 ± 0.011	0.14 ± 0.008
РБФ кс R=5,5	0.65	0.27	0.04	0.39	0.84 ± 0.013	0.16 ± 0.01
РБФ кс R=7,5	0.77	0.30	0.05	0.31	0.83 ± 0.016	0.18 ± 0.011
РБФ кс R=9,5	0.93	0.34	0.06	0.23	0.83 ± 0.019	0.21 ± 0.014

Таблица В.5 –  $Q_{Gmax} \in 3-5$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	R <sup>2</sup>	A±da	B±db
ОР β=1	0.58	0.31	0.01	0.70	0.73 ± 0.007	0.18 ± 0.009
ОР β=3	0.57	0.28	0.01	0.73	0.81 ± 0.008	0.15 ± 0.01
ОР β=5	0.60	0.28	0.01	0.71	0.84 ± 0.009	0.14 ± 0.011
ЛП R=22	0.63	0.32	0.01	0.68	0.79 ± 0.009	0.18 ± 0.011
ЛП R=24	0.60	0.31	0.01	0.70	0.78 ± 0.008	0.18 ± 0.01
ЛП R=26	0.59	0.31	0.01	0.70	0.78 ± 0.008	0.18 ± 0.01
ЛП R=28	0.59	0.31	0.01	0.70	0.77 ± 0.008	0.19 ± 0.01
ТД	1.94	0.50	0.05	0.16	0.84 ± 0.029	0.32 ± 0.036
РБФ м R=3,5	0.61	0.30	0.02	0.71	0.85 ± 0.009	0.17 ± 0.011
РБФ м R=5,5	0.66	0.33	0.02	0.67	0.86 ± 0.01	0.18 ± 0.012
РБФ м R=7,5	0.74	0.36	0.03	0.62	0.87 ± 0.01	0.21 ± 0.013
РБФ м R=9,5	0.86	0.40	0.03	0.54	0.87 ± 0.012	0.24 ± 0.016
РБФ ом R=3,5	0.57	0.28	0.00	0.72	0.8 ± 0.008	0.15 ± 0.01
РБФ ом R=5,5	0.60	0.29	0.02	0.71	0.81 ± 0.008	0.15 ± 0.01
РБФ ом R=7,5	0.62	0.30	0.01	0.70	0.84 ± 0.009	0.17 ± 0.011
РБФ ом R=9,5	0.67	0.33	0.02	0.66	0.85 ± 0.01	0.18 ± 0.012

## Продолжение таблицы В.5

РБФ <sub>КС</sub> $R=3,5$	0.93	0.41	0.03	0.49	$0.86 \pm 0.014$	$0.24 \pm 0.017$
РБФ <sub>КС</sub> $R=5,5$	1.15	0.46	0.04	0.39	$0.87 \pm 0.017$	$0.28 \pm 0.021$
РБФ <sub>КС</sub> $R=7,5$	1.45	0.53	0.05	0.28	$0.88 \pm 0.021$	$0.33 \pm 0.027$
РБФ <sub>КС</sub> $R=9,5$	1.87	0.61	0.07	0.19	$0.88 \pm 0.027$	$0.39 \pm 0.034$

Таблица В.6 –  $Q_{Gmax} > 5$  мм

Интерполятор	RMSE	MAE	ME	$R^2$	$A \pm da$	$B \pm db$
ОР $\beta=1$	1.47	0.79	0.02	0.67	$0.62 \pm 0.007$	$0.59 \pm 0.019$
ОР $\beta=3$	1.38	0.66	0.04	0.70	$0.75 \pm 0.007$	$0.45 \pm 0.022$
ОР $\beta=5$	1.43	0.67	0.06	0.68	$0.81 \pm 0.008$	$0.4 \pm 0.024$
ЛП $R=22$	1.59	0.79	0.06	0.61	$0.71 \pm 0.008$	$0.54 \pm 0.025$
ЛП $R=24$	1.52	0.78	0.06	0.63	$0.71 \pm 0.008$	$0.53 \pm 0.024$
ЛП $R=26$	1.52	0.78	0.05	0.64	$0.71 \pm 0.008$	$0.53 \pm 0.023$
ЛП $R=28$	1.50	0.78	0.06	0.64	$0.71 \pm 0.008$	$0.53 \pm 0.023$
ТД	5.42	1.24	0.42	0.10	$0.76 \pm 0.035$	$0.87 \pm 0.101$
РБФ <sub>М</sub> $R=3,5$	1.51	0.71	0.09	0.65	$0.81 \pm 0.008$	$0.43 \pm 0.026$
РБФ <sub>М</sub> $R=5,5$	1.60	0.76	0.12	0.63	$0.82 \pm 0.009$	$0.46 \pm 0.028$
РБФ <sub>М</sub> $R=7,5$	1.73	0.83	0.17	0.59	$0.83 \pm 0.01$	$0.5 \pm 0.031$
РБФ <sub>М</sub> $R=9,5$	1.90	0.91	0.22	0.54	$0.83 \pm 0.012$	$0.56 \pm 0.033$
РБФ <sub>ОМ</sub> $R=3,5$	1.37	0.64	-0.03	0.70	$0.73 \pm 0.007$	$0.41 \pm 0.021$
РБФ <sub>ОМ</sub> $R=5,5$	1.42	0.67	0.02	0.68	$0.76 \pm 0.008$	$0.41 \pm 0.023$
РБФ <sub>ОМ</sub> $R=7,5$	1.48	0.70	0.06	0.66	$0.8 \pm 0.008$	$0.43 \pm 0.025$
РБФ <sub>ОМ</sub> $R=9,5$	1.59	0.76	0.11	0.63	$0.81 \pm 0.009$	$0.46 \pm 0.027$
РБФ <sub>КС</sub> $R=3,5$	2.00	0.93	0.21	0.51	$0.81 \pm 0.012$	$0.57 \pm 0.035$
РБФ <sub>КС</sub> $R=5,5$	2.22	1.02	0.28	0.46	$0.83 \pm 0.014$	$0.64 \pm 0.04$
РБФ <sub>КС</sub> $R=7,5$	2.54	1.14	0.37	0.39	$0.82 \pm 0.015$	$0.74 \pm 0.046$
РБФ <sub>КС</sub> $R=9,5$	2.98	1.30	0.47	0.31	$0.82 \pm 0.019$	$0.86 \pm 0.054$