

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Научный руководитель: **Тарабукин Иван Алексеевич,**
кандидат физико-математических наук, ФГБУ «ГГО»

Официальные оппоненты: **Мелентьев Владимир Владимирович,**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор Института инноватики и базовой магистерской подготовки ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» .

Бочарников Николай Владимирович,
кандидат физико-математических наук, первый заместитель директора ООО «Институт радарной метеорологии»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик.

Защита состоится 26 сентября 2019 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79. Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.
Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



Л. В. КАШЛЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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 Pluvio² 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 пювигрофов 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 плевнграфов, 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 станционных 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 станционными 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. Адаптированный 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 станционных 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.

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. Результаты исследований отображены в монографии «Слияние конвективных облаков».

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертации и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, обоснованы теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов работы.

В **первой главе** приводятся общие сведения об атмосферных осадках, средствах их оценки и методах восстановления полей осадков по радиолокационным и наземным измерениям.

В разделе 1.1 дается определение атмосферным осадкам. Описывается процесс образования осадков в облаках. Приводятся три класса осадков по морфологическому признаку: морозящие, обложные и ливневые. Приведены значения интенсивности осадков, характерные для этих классов. Отмечена высокая пространственная и временная изменчивость полей осадков.

В разделе 1.2 описываются особенности измерения характеристик осадков осадкомерами. Преимуществом данного вида измерения является высокая точность. Недостаток заключается в том, что для воспроизведения полей осадков с высоким пространственно-временным разрешением необходима густая сеть осадкомеров. Организация, построение и эксплуатация такой сети является весьма дорогостоящим мероприятием.

В разделе 1.3 дается краткая информация о процессе оценки характеристик осадков по данным радиолокационных измерений. Для оценки интенсивности осадков по значениям радиолокационной отражаемости представлена степенная зависимость Маршалла-Пальмера:

$$Z = A \cdot I^B \quad (1)$$

, где Z – радиолокационная метеорологическая отражаемость ($\text{мм}^6/\text{м}^3$), I – интенсивность осадков ($\text{мм}/\text{ч}$), A и B – коэффициенты, зависящие от многочисленных факторов, в первую очередь, от типа осадков и особенностей синоптических процессов в районе наблюдений. Маршаллом и Пальмером были получены коэффициенты $A = 200$ и $B = 1,6$.

Преимуществом радиолокационного метода является то, что современные ДМРЛ способны обеспечить покрытие обширной территории и при этом имеют высокое пространственно-временное разрешение. С другой стороны, существует один серьезный недостаток радиолокационных измерений – низкая точность получаемых значений слоя осадков. Это связано с рядом факторов: некачественная калибровка, неопределенность при переходе от отражаемости к интенсивности осадков, нелинейное распространение радиоволн из-за рефракции и сферичности Земли,

уширение радиолокационного луча с расстоянием, затухание мощности радиолокационного излучения при распространении в атмосфере.

Раздел 1.4 посвящен сравнению имеющихся методов восстановления полей осадков на основе комбинирования радиолокационных и наземных измерений. Рассмотрены следующие методы: среднее смещение поля, кригинг с внешним дрейфом, интерполяция невязки и вариационное согласование.

При сравнении методов сделаны следующие выводы. Метод среднего смещения поля не учитывает локальных особенностей осадков, а только глобальное смещение. Кригинг с внешним дрейфом зависит от качества тренда между наземными и радиолокационными оценками осадков, который, как показано в разделе 3.2, оказался неудовлетворительным. 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, а значения количества осадков на станциях только один раз. Поэтому данный метод сильно зависит от качества радиолокационных данных.

В итоге, в данном исследовании для восстановления полей осадков по радиолокационным и наземным данным выбран метод интерполяции невязки. Который работает следующим образом. Для каждого срока вначале рассчитываются «невязки радиолокационных осадков» по каждому i -му осадкомеру: $E(x_i) = Q_R(x_i) - Q_G(x_i)$, где x_i – место установки i -го осадкомера, Q_R – количество осадков, оцененное по данным радиолокационного зондирования атмосферы, Q_G – количество осадков, полученное по данным осадкомера. Затем методом пространственной интерполяции невязка воспроизводится в каждом пикселе радарной области и вычитается из поля радиолокационных оценок осадков. Таким образом, происходит динамическая калибровка поля количества осадков, восстановленного на основе радиолокационных наблюдений, измерениями датчиков осадков.

Вторая глава посвящена району исследования, источникам исходных данных и их предварительной обработке.

В разделе 2.1 описана краткая физико-географическая и климатическая характеристика Санкт-Петербурга и ближайших пригородов. Отмечено, что основной особенностью климата здесь является непостоянство погоды, обусловленное частой сменой воздушных масс, которые, в зависимости от района формирования, подразделяются на морские, континентальные и арктические. Сравнение, проведенное по

средним многолетним данным, показывает, что количество осадков, выпадающих в разных частях города и окрестностях, существенно различается.

Раздел 2.2 посвящен сети pluвиографов АИС «Осадки», которая включает в себя 34 датчика атмосферных осадков ОТТ Pluvio² 200. Плотность у сети относительно высокая: среднее расстояние между приборами 9,4 км. В основной части города (без пригородов) плотность сети больше: среднее расстояние между приборами 7,1 км.

Датчики сети ОТТ Pluvio² 200 определяют количество выпавших осадков по их весу каждые 6 секунд. Эти 6-секундные значения интенсивности добавляются к накопленной сумме осадков. 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 ± 1 % от измеренного значения.

В разделе 2.3 даются основные сведения о радиолокаторе «ДМРЛ-С», расположенном в 10 км восточнее Санкт-Петербурга в поселке Воейково.

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. 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.

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 2.4 описаны данные, которые использовались для восстановления полей осадков различными методами. Это значения количества осадков за час, полученные от pluвиографов ОТТ Pluvio² 200 и поля часовых сумм осадков, оцененные по данным «ДМРЛ-С».

Для расчета часовых сумм атмосферных осадков Q_G , полученных на основе данных pluвиографов, складывались 5-минутные значения количества атмосферных осадков: $Q_G = \sum_{k=1}^{12} q_k$, где q_k – количество осадков за 5 минут (мм), полученное от pluвиографа, 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, рассчитывалось на основе поля радиолокационной метеорологической отражаемости Z_I , измеренного на минимальном угле места. Вначале отражаемость переводилась в интенсивность осадков по формуле Маршалла-Пальмера (1). Затем, для каждого радиолокационного пикселя количество осадков Q_R рассчитывалось путем накопления значений интенсивности осадков в текущем часе по формуле: $Q_R = \sum_{k=1}^6 I_k \cdot t$, где I_k – интенсивность осадков (мм/ч), полученная при переводе из радиолокационной отражаемости по формуле 1, t – время обзора (10 мин), k – номер 10-минутного обзора.

Исследование проводилось по территории, на которой расположены плювиографы, с размерами 74 на 74 км (рисунок 1). В работе использовались синхронные оценки осадков радиолокатором и сетью наземных измерителей за теплые периоды 2016 и 2017 года.

За два теплых периода выборка составила 1306 часовых сроков.

На основе анализа статистической характеристики выборки было показано, 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 значения количества осадков за час. Разброс значений осадков велик, C_V для всех интервалов больше 100%.

Подбору параметров разных методов восстановления полей осадков посвящена **третья глава**.

В разделе 3.1 описывается используемый метод оценки качества восстановленного поля осадков – перекрестная проверка.

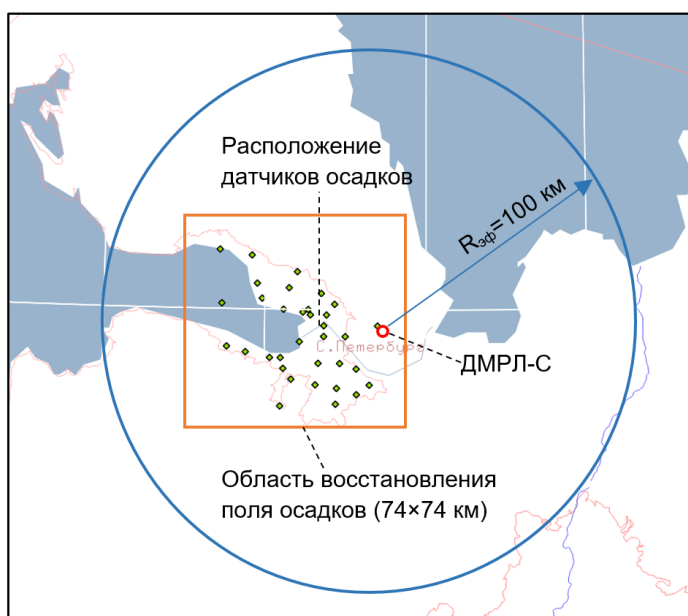


Рисунок 1 – Взаимное расположение: осадкомеров, «ДМРЛ-С», зоны восстановления полей осадков, зоны эффективного обнаружения осадков радиолокатором

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.

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

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

где n – число измерений, i – номер измерения.

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

В разделе 3.2 подбираются параметры уравнения (1), связывающего радиолокационную отражаемость и интенсивность осадков. Также показаны различия оценок осадков радиолокатором в 2016 и 2017 году.

Для перевода отражаемости в интенсивность осадков сравнивались три набора коэффициентов $Z-I$ соотношения (1): коэффициенты, полученные Маршаллом и Пальмером ($A=200, B=1,6$), и две комбинации коэффициентов, полученные отечественными исследователями для северо-западной части страны ($A=220, B=1,54; A=230, B=1,5$).

На рисунке 2 нанесены совместные оценки количества осадков за час 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.

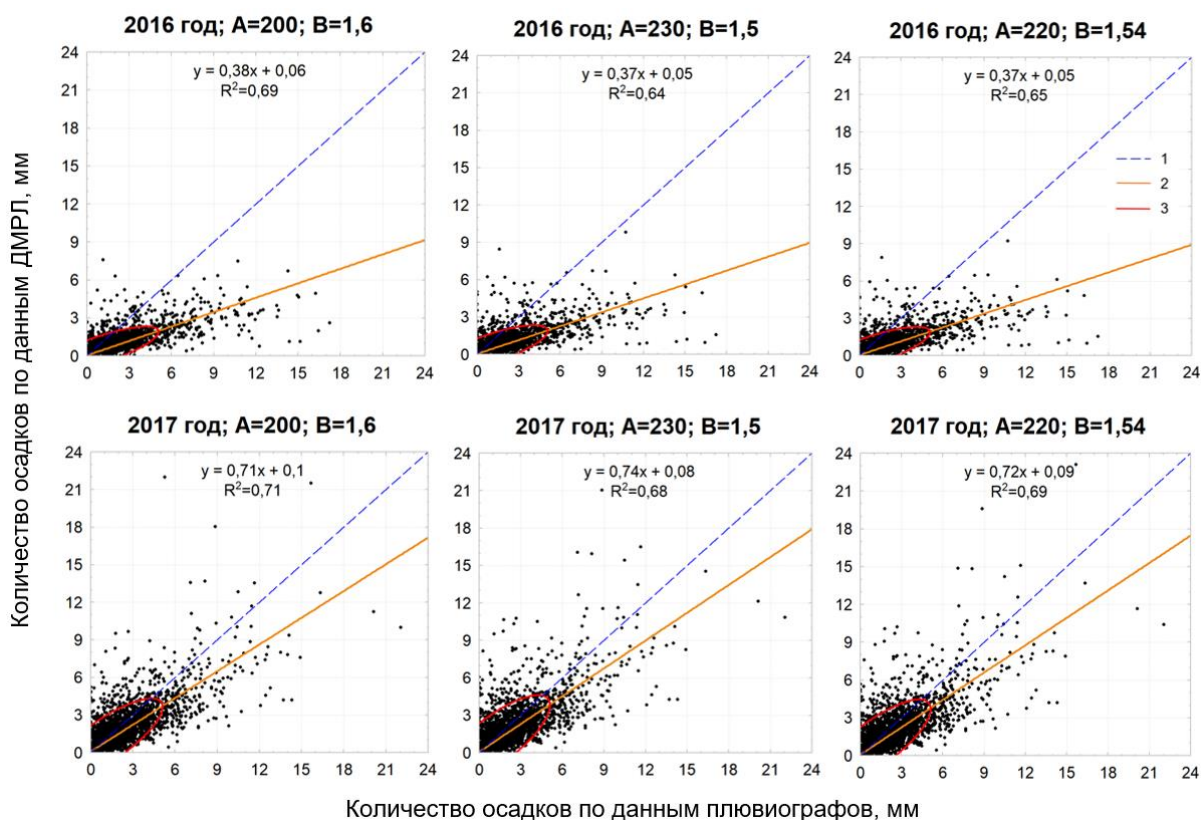


Рисунок 2 – Сравнение станционных и радиолокационных оценок количества осадков с разными комбинациями коэффициентов $Z-I$ соотношения для 2016 и 2017 г.

1 – биссектриса $Q_R = Q_G$; 2 – линейная регрессия;

3 – 95% процентов точек с $Q_G > 0,1$ мм

Проведем сравнительный анализ коэффициентов $Z-I$ соотношения. Как видно из точечной диаграммы рисунка 2, 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. Коэффициенты $A=200$ $B=1,6$ будут использоваться в дальнейшем для восстановления поля количества осадков за час по радиолокационным данным.

Графики (рисунок 2) 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.

Для оценки возможности пространственной интерполяции количества осадков в разделе 3.3 проведен анализ пространственной структуры этой характеристики. Для анализа распределения статистических величин количества осадков в пространстве были рассчитаны \bar{Q}_G и $\sigma(Q_G)$ для каждой станции.

В данном разделе показано, что среднее и стандартное отклонение для отдельных приборов меняется более чем на 20% относительно общего значения для всех станций.

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).

По имеющемуся набору станционных измерений часовых сумм осадков была вычислена корреляционная функция μ_Q для всех комбинаций пар станций. Были получены значения данной функции в зависимости от расстояния между станциями $\mu_Q(d)$.

Найдены радиусы корреляции при заданных пороговых значениях корреляционной функции 0,5 и 0,7. 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 неравномерно, поэтому качество интерполяции в разных областях исследуемой зоны будет разным.

В разделе 3.4 описаны методы пространственной интерполяции, которые использовались в данном исследовании.

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

Рассматривались следующие детерминистические интерполяторы: метод обратных расстояний (ОР), метод локальных полиномов (ЛП), триангуляция Делоне (ТД), метод радиальных базисных функций (РБФ).

В разделе 3.5 подбирался оптимальный интерполятор для восстановления полей количества осадков за час только по данным сети АИС «Осадки».

Среди всех интерполяторов можно выделить три, при которых восстановленные значения количества осадков 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 .

На рисунке 3 с помощью линейной регрессии показаны зависимости между значениями количества осадков по плювиографам и восстановленные выбранными интерполяторами для всей имеющейся выборки.

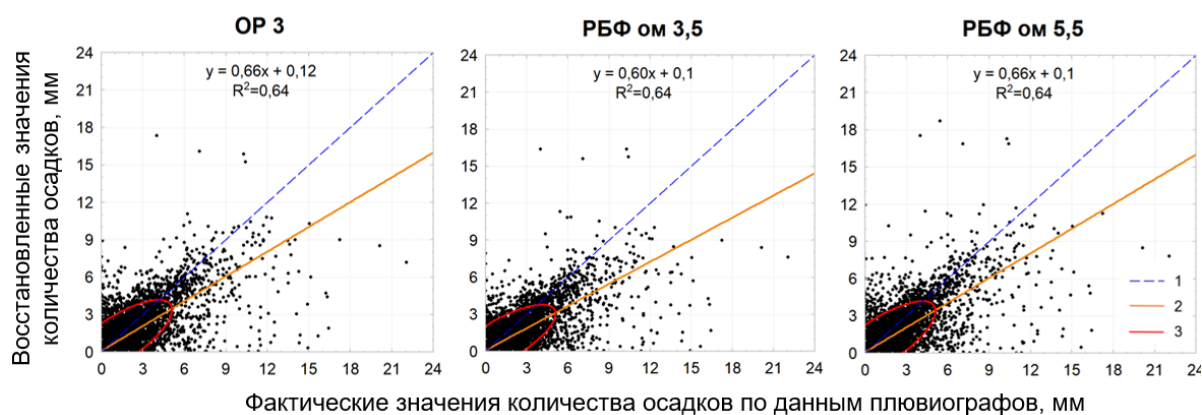


Рисунок 3 – Сравнение фактических значений количества осадков и восстановленных тремя интерполяторами

- 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 плювиографов.

В разделе 3.6 приводится анализ пространственной структуры невязки радиолокационных и станционных оценок осадков E . Для этой задачи по всем станциям были получены статистические характеристики этой случайной величины: среднее и дисперсия отдельно для 2016 и 2017.

При сравнении статистических характеристик невязки в 2016 и 2017 годах сделаны следующие выводы. В 2016 году 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 полей невязки в различных точках была рассчитана корреляционная функция невязки в зависимости от расстояния $\mu_E(d)$.

Радиусы корреляции получились: для функции 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 стационарных данных может быть интерполируемо с приемлемым качеством в большинстве случаев. С другой стороны, качество интерполяции будет зависеть от плотности pluviографов в каждой части исследуемой области.

В разделе 3.7 приведено сравнение интерполяторов из раздела 3.4 для интерполяции невязки между значениями количества осадков по pluвиографам и по «ДМРЛ-С».

Были выделены три наиболее действенных интерполятора для этой задачи: 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 4.

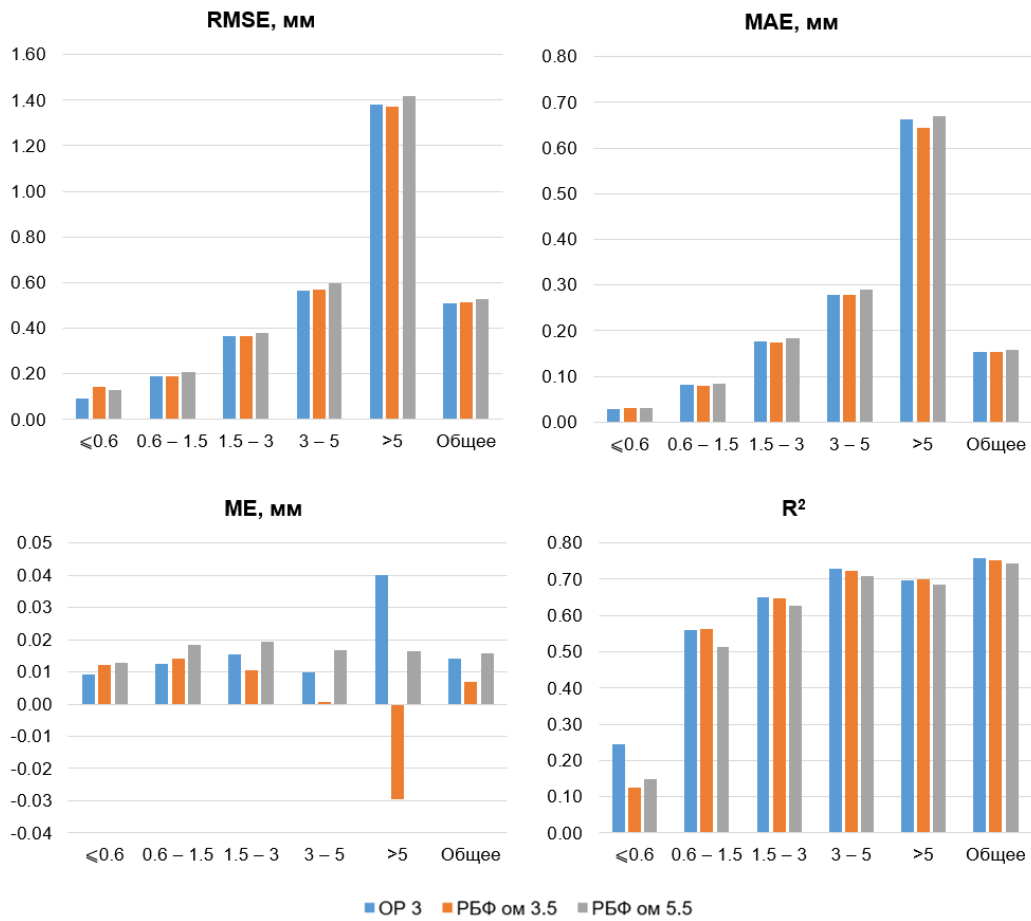


Рисунок 4 – Гистограммы сравнения трех методов пространственной интерполяции невязки для пяти интервалов Q_{max} и для всей выборки

Для интерполяции невязки был выбран метод РБФ om 3,5. Этот метод имеет наименьшее смещение ME в общем случае. Важным фактором является также то, что метод РБФ om 3,5 для наиболее интенсивных осадков ($Q_{max} > 5$ мм/ч) имеет наименьшие отклонения $RMSE$ и MAE по сравнению с OP 3 и РБФ om 5,5.

В четвертой главе представлены результаты сравнительного анализа трех методов восстановления полей количества осадков за час: радиолокационного метода, метода пространственной интерполяции данных на станциях и комбинирования радиолокационных и наземных измерений.

Раздел 4.1 посвящён статистическому сравнению методов.

На рисунке 5 показаны точечные графики зависимости восстановленных и измеренных значений количества осадков для всей выборки, проведены линии регрессии и также отмечена изолиния 95% точек для $Q_G > 0,1$ мм.

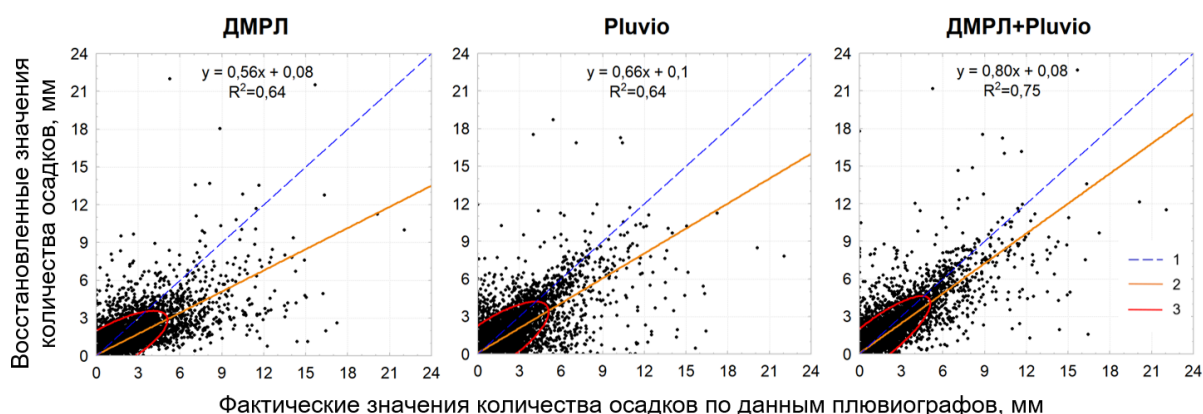


Рисунок 5 – Сравнение фактических значений количества осадков и восстановленных тремя основными методами.

- 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 5), 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 полей количества осадков были построены гистограммы статистических характеристик невязки (рисунок 6).

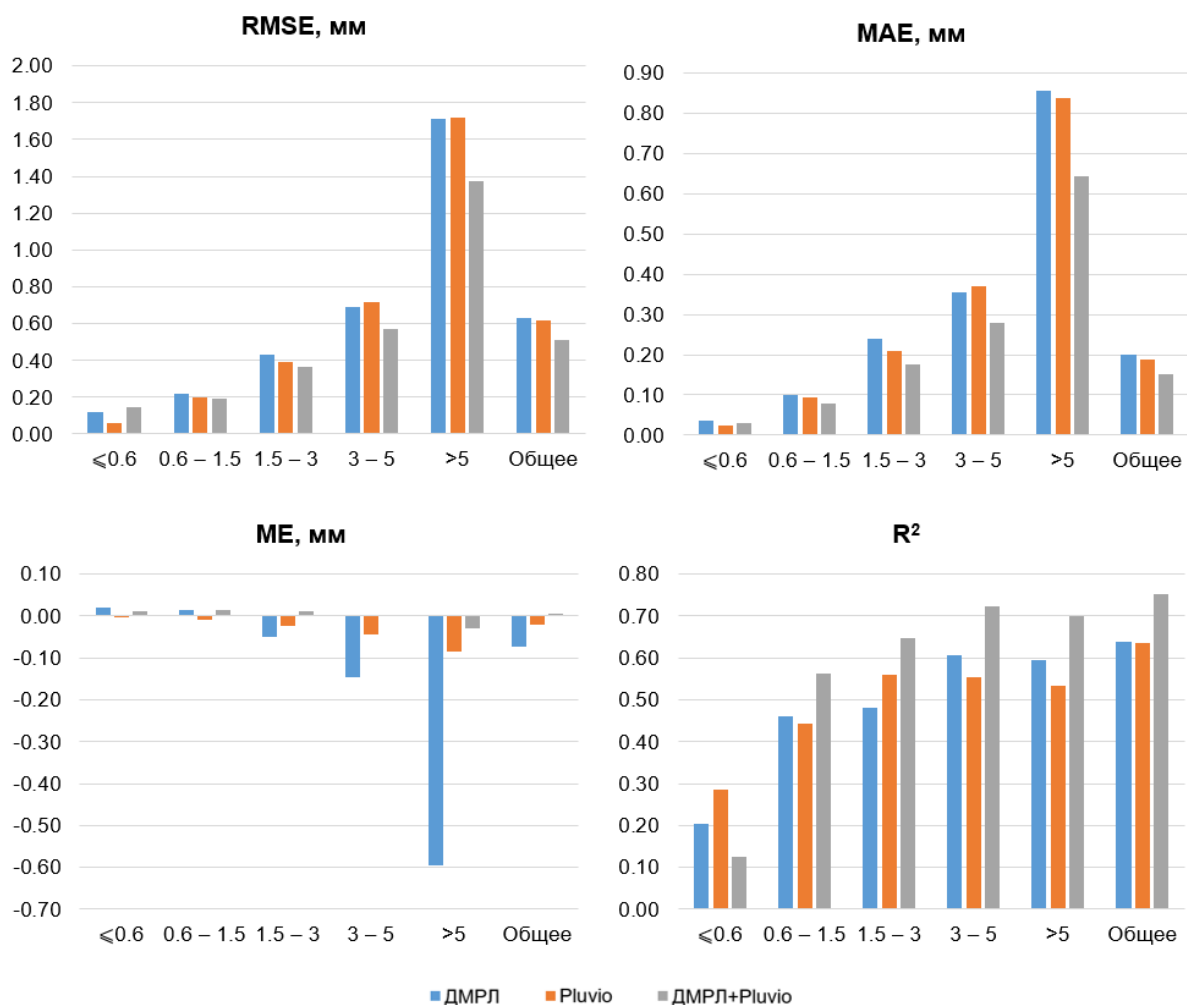


Рисунок 6 – Гистограммы сравнения трех основных методов восстановления полей часовых сумм осадков для пяти интервалов Q_{max} и для всей выборки

Из гистограмм (рисунок 6) 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 количества осадков работает лучше остальных по всем показателям. Начиная с интервалов >0,6 мм поля, восстановленные комбинированным методом, получаются наиболее качественными. 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 пьювиографов.

В разделе 4.2 приводится детальный анализ восстановления полей количества осадков за час тремя рассматриваемыми методами для различных синоптических ситуаций.

Были выбраны следующие синоптические ситуации и соответствующие им виды осадков: циклоническая депрессия, сопровождаемая моросью; теплый фронт и фронт окклюзии с обложными осадками; конвективные осадки на холодном фронте, внутримассовые и образовавшиеся в центре циклона.

По сравнительному анализу работы методов восстановления полей количества осадков на отдельных случаях были сделаны следующие выводы. Метод интерполяции 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 полей конвективных осадков с одним максимумом или имеющего «мультиячеиковую» структуру. Данные выводы подтверждают результаты, полученные в разделе 4.1.

В пятой главе приведены результаты исследования полей количества и интенсивности осадков. Поля количества осадков рассчитывались методом интерполяции невязки, а для восстановления полей интенсивности осадков была предложена новая методика подбора коэффициентов $Z-I$ соотношения(1).

Раздел 5.1 посвящен исследованию распределения характеристик пятен конвективных осадков. Под пятном в данном случае понимается область осадков с повышенным по отношению к окружающей территории количеством осадков.

В разделе представлена формула расчета вероятности 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 , определяемая выражением:

$$P_Q = 1 - \left(1 - \frac{S_Q}{S_T}\right)^n \quad (5)$$

Были рассмотрены распределения двух важных характеристик пятен осадков: их площадь S и средний поток осадков \bar{F} за час. Поток осадков ($\text{м}^3/\text{с}$) — это объем воды, выпадающий из конвективной ячейки в единицу

времени, рассчитывался как интеграл от интенсивности осадков по площади облака: $\bar{F} = \iint I dx dy$.

Для оценки повторяемости площадей и потока пятен осадков были построены диаграммы «ящик с усами» (рисунок 7) для различных уровней изолинии. На диаграммах с помощью условных обозначений представлены минимальное и максимальное значения, первый и третий квантили, а также медиана. Для вертикальных осей используется логарифмическая шкала.

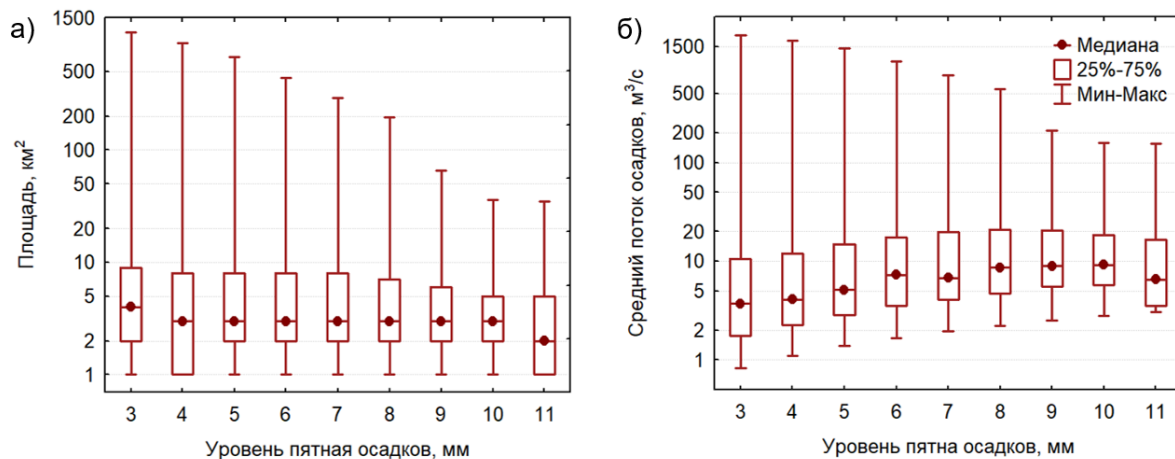


Рисунок 7 – Диаграммы «ящик с усами» площади (а) и среднего потока осадков (б) в зависимости от уровня изолинии пятна

По диаграмме (рисунок 7а) 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 км² (рисунок 7а). 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 км², а третий квантиль 9 км², то для пятен с уровнем 11 мм – 2 км² и 5 км² соответственно.

Диапазон среднего потока осадков (рисунок 7б), как и площади, уменьшается с увеличением уровня изолинии, но большая часть пятен имеет \bar{F} менее 21 м³/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.

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 км².

По формуле вероятности обнаружения пятна (5) и диаграммам «ящик с усами» (рисунок 7) можно сделать вывод, что при восстановлении полей осадков только по данным сети АИС «Осадки», вероятность обнаружения более 75% всех конвективных пятен осадков меньше 11%, а для основной части города меньше 18%. Дополнение измерений pluviографов

радиолокационными данными позволяет идентифицировать пятна осадков с площадью до 1 км².

В разделе 5.2 предлагается новая методика восстановления полей интенсивности осадков. Приводится исследование процесса осадкообразования при слиянии конвективных облаков.

Методика основывается на динамическом подборе коэффициентов $Z-I$ соотношения (1) с наименьшей погрешностью восстановления полей по нескольким радиолокационным обзорам. 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 пювигрофов. Интенсивность вычисляется на основе измерений количества осадков пювигрофами 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 пювигрофов для всех комбинаций коэффициентов A в диапазоне 100–1000 с шагом 50 и B в диапазоне 0,1–1,7 с шагом 0,05.

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

4. По набору невязок для всех данных за дождь, проводится оценка среднеквадратического отклонения $RMSE$ (раздел 3.1) восстановления полей 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 интенсивности 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 первом исследовании было рассмотрено слияние двух кучево-дождевых облаков Cb1 и Cb2.

На рисунке 8 представлены графики изменения характеристик осадков исследуемых кучево-дождевых облаков до и после слияния. Время, соответствующее предыдущему скану радиолокатора перед слиянием, было принято за начало отсчета «0 мин».

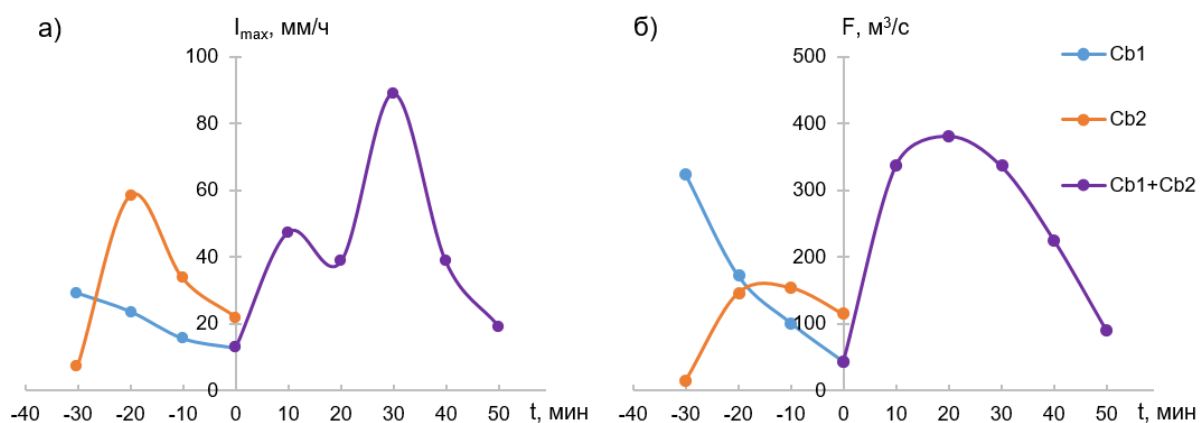


Рисунок 8 – Изменение максимальной интенсивности осадков (I_{max}) и потока осадков (F) до слияния ($t \leq 0$ мин) и после ($t > 0$ мин)

Из рисунка 8 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 . 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.

В другой работе 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 km^2 . Случаи слияния наблюдались, когда существовало только две изолированные ячейки, а также при наличии большого количества конвективных облаков в поле зрения радиолокатора.

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 9 представлены диаграммы «ящик с усами» 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.

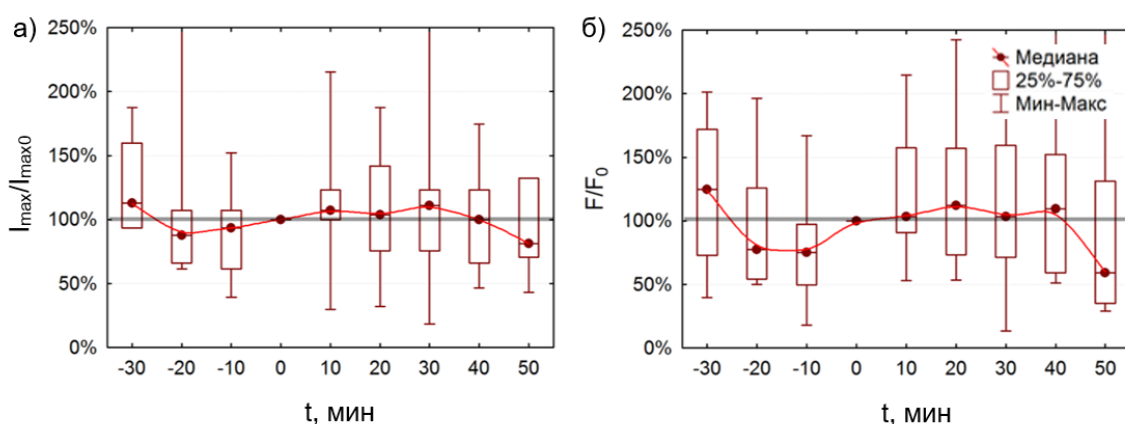


Рисунок 9 – Диаграмма «ящик с усами» изменения относительных характеристик осадков до и после слияния. а – максимальная интенсивность осадков; б – поток осадков

Из рисунка 9 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 медиана потока осадков достигает максимального значения на 20 минуте (113 %), и далее происходит уменьшение медиан.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. По результатам сравнительного анализа различных методов объединения радиолокационных данных и измерений пювиографов выбран метод интерполяции невязки. Преимущество данного метода заключается в том, что в нем используется динамическая калибровка радиолокационного поля осадков по наземным измерениям за каждый срок, поэтому этот метод не зависит от однородности рядов радиолокационных измерений.

2. Проведен анализ пространственной структуры количества осадков и невязки радиолокационных и станционных оценок осадков. По результатам анализа сделан вывод, что на данный момент для интерполяции количества осадков и невязки лучше использовать детерминистические методы пространственной интерполяции, а не геостатистические. Также были найдены радиусы корреляции часовых сумм осадков, 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» подобраны параметры трех основных методов восстановления полей осадков: по данным радиолокатора, с помощью пространственной интерполяции измерений плювиографов и на основе комбинирования данных этих измерителей.

4. На основе сравнительного анализа трех методов восстановления полей 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 полей конвективных осадков с одним максимумом или имеющих «мультиячеиковую» структуру.

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.

6. Предложена методика восстановления полей интенсивности осадков по результатам радиолокационных измерений. С использованием предложенной методики удалось оценить рост максимальной интенсивности и потока осадков при слиянии мощных кучевых и кучево-дождевых облаков.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах:

1. Дорофеев 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.