



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

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

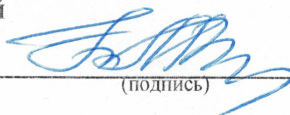
Исполнитель Тюриков Иван Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

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

Саенко Андрей Геннадьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой


(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 1 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Теоретические аспекты радиолокационного и наземного измерения осадков.....	6
1.1 Климатическое положение Санкт-Петербурга.....	6
1.2 Распределение капель по размерам.....	6
1.2 Радиолокационная отражаемость.....	8
1.3 Допплеровский метеорологический радиолокатор meteor 50dx.....	10
1.4 Автоматизированный метеорологический комплекс (амрк) «метеор-метеочейка».....	13
1.5 Измерение жидких осадков.....	17
1.6 Современные измерительные приборы.....	19
Глава 2. Расчет коэффициентов в формуле Маршалла-Палмера.....	24
2.1 Инструменты для работы с базами данных.....	24
2.2 Формирование базы данных с наблюдениями осадкомеров.....	25
2.3 Формирование базы данных с радиолокационными наблюдениями.....	29
2.4 Первичная обработка данных.....	33
2.5 Проведение расчетов.....	39
Заключение.....	45
Список использованных источников.....	46
Приложение 1.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокаторы являются незаменимым инструментом в современной метеорологии и изучении осадков. Они используются для измерения и наблюдения атмосферных явлений, таких как дождь, снег, град, а также для прогнозирования погоды и оценки степени ее влияния на окружающую среду. Это позволяет получать детальную информацию о форме, интенсивности и распределении осадков. Данные, полученные с помощью радиолокаторов, играют важную роль в прогнозировании погоды, в решении экологических проблем и управлении ресурсами воды.

Одним из основных преимуществ радиолокационного метода можно считать возможность покрытия достаточно большой территории при снятии измерений.

Ключевыми параметрами при расчете интенсивности выпадающих осадков для данной местности являются коэффициенты в уравнении Маршалла-Палмера. Они ответственны за осуществление перехода от радиолокационной отражаемости к искомой величине интенсивности осадков.

Дипломная работа на тему нахождения коэффициентов в уравнении Маршалла-Палмера для радиолокатора, расположенного в Санкт-Петербурге имеет высокую актуальность. Во-первых, данная работа позволит получить новые данные и результаты, учитывающие специфику географических условий и климата Санкт-Петербурга. Во-вторых, полученные результаты могут быть использованы для улучшения работы радиолокаторов и улучшения качества рассчитываемых косвенным образом величин.

В данной дипломной работе проводится попытка привязки отдельных переводных коэффициентов в уравнении Маршалла-Палмера к конкретным географическим точкам. Такой подход может позволить повысить точность работы радиолокаторов для конкретных условий местности, что может значительно повысить качество получаемых данных и улучшить работу систем контроля за количеством выпадающих осадков.

Однако, данная работа также имеет свои трудности и ограничения. Необходимо учитывать множество факторов, которые могут влиять на коэффициенты и точность радиолокатора, включая погодные условия, объекты инфраструктуры и т.д.

Дипломная работа имеет целью исследование и анализ механизмов формирования осадков на определенной территории, а также расчет коэффициентов в формуле Маршалла-Палмера. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи.

Первая задача заключается в том, чтобы разобраться с радиолокационным и наземным измерением осадков. Для этого был проведен анализ существующих методов и приборов для измерения осадков. Также были проведены сравнительные исследования радиолокационных и наземных методов, чтобы определить наиболее эффективный подход.

Вторая задача состоит в создании архивов с данными по радиолокационной отражаемости на территории исследования и количеству выпавших осадков. Для этого был использован специализированный радар, который позволил получить необходимые данные. В результате была создана база данных, которая была использована для дальнейших исследований.

Третья задача заключалась в создании географической привязки к новым коэффициентам, полученным в результате расчетов.

Исследования в данной области проводились, начиная с 1940-х годов 20 века, когда радиолокационная метеорология только зарождалась. Исследования проводились на территории Соединенных Штатов Америки (Вашингтон, Гавайские острова, Массачусетс, Иллинойс, Майами), Канады, Великобритании, Австралии, Индии, Японии и СССР (Эльбрус, Московская область, Ленинградская область, Киев). Исследования по поиску коэффициентов в ранние годы проводились для различных явлений погоды, но преимущественно для жидких осадков в летние периоды, в частности, обложные, ливневые осадки, исследования для гроз. Также интересно отметить, что работа Шупяцкого для Московской области

содержала расчет коэффициентов не просто для различных дождей, но и для различных интенсивностей осадков [1].

Для региона Санкт-Петербурга также проводились изыскания по нахождению переводных коэффициентов. В 1957 году Сальман Е.М. проводил расчеты для ливневых и обложных осадков. Полученные им коэффициенты составили $A = 200$ и $b = 1.54$. Другое большое исследование, проводившееся пусть и не в Санкт-Петербурге, но в пределах Северо-Западного федерального округа было описано Боровиковым А.М.. Результатом его расчетов на Валдае стали коэффициенты $A = 230$ и $b = 1,5$.

Для умеренных широт России существуют соотношения $Z = 209I^{1.69}$ и $Z = 200I^{1.6}$, о чем пишет в своем учебнике Степаненко В.Д. [2]

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И НАЗЕМНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДКОВ

1.1 Климатическое положение Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург известен своим умеренным и влажным климатом. Топографически он представляет из себя ступенчатую равнину. Высота города над уровнем моря растет от центра к окраинам от 1 метра до приблизительно 20. По большей части все возвышенности сосредоточены на отдалении от городской среды. Наивысшей точкой является Ореховая гора, высота которой составляет 176 м.

Непостоянство погоды – одна из отличительных особенностей климата города. Она обуславливается расположением региона на территории, где климат переходит от морского в континентальный. Благодаря этому наблюдается большая сменяемость воздушных масс.

Сильно зависимый от Атлантического океана, Санкт-Петербург зачастую претерпевает большое количество циклонов, приносящих пасмурную погоду, осадки разных типов и порывистые ветра. В то же время воздействие континентального климата заключается приходящих с востока и юга антициклонах, которые приводят к благоприятному теплему летнему сезону.

Важной особенностью климата, которая проявит себя в некоторых частях данной работы является неравномерное распределение масс осадков. Их количество, выпадающее в разных частях города, различается существенно. Для количества осадков выделяются зоны, аналогичные зонам различающегося климата. Согласно многолетним данным, количество выпадающих осадков увеличивается с юга на север.

1.2 Распределение капель по размерам

Закон Маршалла-Палмера (Marshall-Palmer law) описывает распределение капель в облаках. Согласно этому закону, размеры капель в облаке распределены по экспоненциальному закону.

Распределение Маршалла-Палмера было впервые описано в 1948 году Дж. Стюартом Маршаллом и его коллегой Уолтером Палмером [11]. Это распределение широко используется для описания физических свойств облаков и осадков.

Благодаря данной функции можно выразить количество капель в единичном объеме пространства, которые приходятся на определенный единичный интервал диаметров или радиусов капель.

Закон Маршалла-Палмера можно записать следующим образом:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (1)$$

$$\Lambda = 4.1 R^{-0.21} \text{ мм}^{-1} \quad (2)$$

$$N_0 = 8 * 10^3 \text{ м}^{-3} \text{ мм}^{-1} \quad (3)$$

, где $N(D)$ – распределение капель по размерам, D – диаметр капли, R – интенсивность дождя, [мм/ч], N_0 – величина $N(D)$ при $D = 0$.

Другие двухпараметрические функции, такие как функции Катанео и Стоута (1968) и функции Остина и Геотиса (1979), представляют собой альтернативные модели, которые также хорошо подходят для описания наблюдаемых зависимостей $N(D)$ в рамках радиолокационных измерений. Однако, чтобы использовать трех- и более параметрические функции и получить более точные оценки параметров $N(D)$, требуется больше независимых измерений.

Проведенные исследования, в которых теоретические распределения были настроены на экспериментальные данные, показывают, что максимальный предельный диаметр капли составляет около 8 мм. В то же время, при таянии гигантских снежинок или хлопьев возможно образование капель большего диаметра, что означает, что реальные распределения могут значительно отличаться от теоретических предположений.

Именно от выбора закона распределения капель по формам и размерам будет зависеть то, как варьируется величина радиолокационной отражаемости, а, следовательно, и величина интенсивности осадков.

Во многих литературных источниках особенно подчеркивается успешное использование данного распределения для обложных осадков.

1.2 Радиолокационная отражаемость

Радиолокационная отражаемость является важным показателем при изучении поведения электромагнитных волн в атмосфере и гидросфере. В гидрометеорологии радиолокационная отражаемость используется для изучения физических свойств атмосферных и гидросферных объектов, таких как облака, осадки, морские волны и ледяные образования. Различные параметры, такие как размер, форма, плотность, состав и структура этих объектов, оказывают влияние на их радиолокационную отражаемость.

Сама величина радиолокационной отражаемости может быть определена как шестой момент диаметра капли, интегрально по всем каплям в данном единичном объеме [2]. Для заданного распределения капель можно записать:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (4)$$

, где Z – отражаемость [дБZ], $N(D)$ – закон распределения капель по размерам, D – диаметр [м].

Величину радиолокационной отражаемости принято выражать в дБZ, где $1 \text{ дБZ} = 10 \log Z \text{ (мм}^6/\text{м}^3\text{)}$

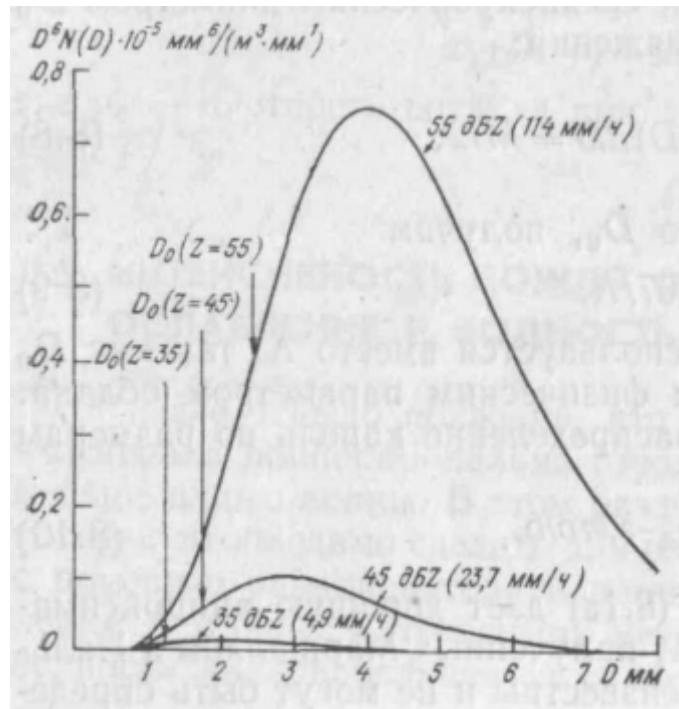


Рисунок №1. Зависимость радиолокационной отражаемости от диаметра капли.

На рисунке №1 продемонстрирована зависимость используемого подынтегрального выражения для расчета отражаемости от диаметра капли. Из данного графика можно отметить, что, когда отражаемость увеличивается более, чем в 2 раза, среднекубический диаметр капель, дающий наибольший вклад в итоговую величину отражаемости, увеличивается менее, чем в 2 раза.

$$Z = N_0(6!)(D_0/3.67)^7 = N_0(6!) \Lambda^{-7} \quad (5)$$

Интенсивность осадков может быть вычислена однопараметрически, имея только величину Z . Наиболее известным соотношением, связывающим радиолокационную отражаемость и интенсивность осадков, является соотношение Маршалла-Палмера, также известное как Z -I соотношение (в некоторых источниках Z -R соотношение).

$$Z = A I^b \quad (6)$$

, где Z – радиолокационная отражаемость [$\text{мм}^6/\text{м}^3$], I – интенсивность осадков [мм/ч]

Коэффициенты A и b , используемые в соотношении могут быть вычислены для разных географических и климатических зон, а также для разных видов осадков, что повышает точность определения интенсивности осадков. Само соотношение было получено эмпирически из соотношения плевниографических и радиолокационных наблюдений. Наиболее известным считается соотношение:

$$Z = 200I^{1.6} \quad (7)$$

1.3 Допплеровский метеорологический радиолокатор Meteor 50DX

Метеорологический радиолокатор Meteor 50DX - это современный метеорологический радиолокатор, разработанный для дистанционного обнаружения и измерения параметров атмосферных явлений. Он широко применяется в метеорологических исследованиях, а также в метеорологической службе.

Meteor 50DX обладает высокой разрешающей способностью и способен обнаруживать и отслеживать движущиеся объекты в атмосфере, такие как осадки, грозовые фронты, снежные бури и другие метеорологические явления. Он использует принцип радарной системы, излучая радиосигналы и анализируя отраженные от объектов сигналы для получения информации о их расстоянии, скорости и направлении.

Обладая высокой чувствительностью, радиолокатор способен обнаруживать слабые сигналы от мелких атмосферных объектов, что делает его мощным инструментом для изучения и прогнозирования погодных условий. Он может предоставлять данные о вертикальном распределении осадков, структуре облачности, скорости и направлении ветра, а также других параметрах атмосферы.

Meteor 50DX – двухполяризационный доплеровский радиолокатор, основанный на магнетронном передатчике. Радар работает на длине волны 3,2 сантиметра.

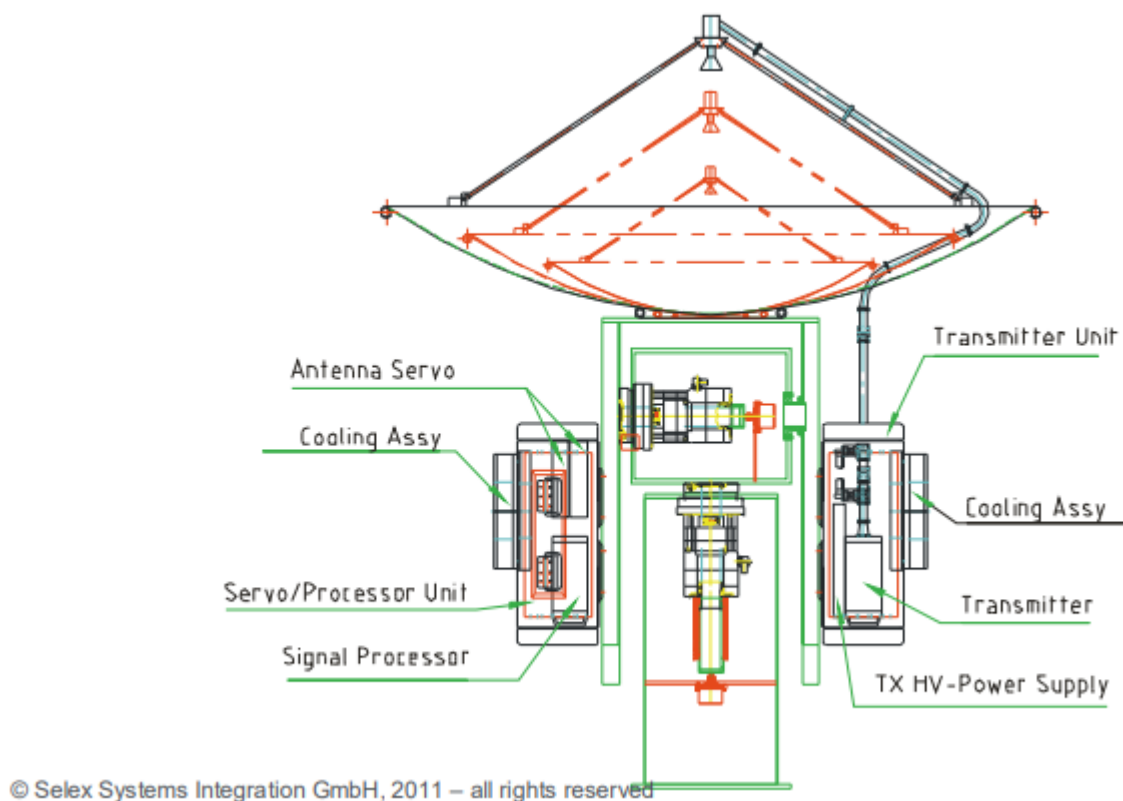


Рисунок №2. Структурная схема Meteor 50DX.

На схеме представлены такие элементы радиолокационной станции, как антенный сервопривод, охлаждающее оборудование, процессор сигналов, источник высоковольтного питания, передатчик, излучающий элемент.

Ниже представлены базовые характеристики радиолокатора. Режимы «Отражаемость» и «Скорость»

Наименование параметра	Значение параметра
Полоса частот	X
Год выпуска	2004
Рабочий диапазон частот (МГц)	9300-9500
Длина волны (см)	3,2
Импульсная мощность (кВт)	Не менее 55
Тип передатчика	Коаксиальный магнетрон
Длительность импульса (мкс) в режиме «Отражаемость»	2±0,1

в режиме «Скорость»	0,83±0,05
Частота повторения зондирующих импульсов (Гц) в режиме «Отражаемость» в режиме «Скорость»	От 250 до 550 От 250 до 1200
Тип модуляции	Нелинейная частотная модуляция
Чувствительность приёмного устройства (дБ/мВт) в режиме «Отражаемость» в режиме «Скорость»	-112 -108
Коэффициент шум (дБ)	1,5
Промежуточная частота (МГц)	60
Ширина полосы пропускания (МГц) в режиме «Отражаемость» в режиме «Скорость»	0,6±5% 1,5±10%
Линейный динамический диапазон (дБ)	90
Подавление местников (дБ)	-40
Антенна	Зеркальная параболическая
Диаметр антенны (м)	2,4
Апертурная площадь (м ²)	4,5
Ширина диаграммы направленности (°)	1,0
Коэффициент усиления антенны (дБ)	45
Уровень боковых лепестков (дБ)	-30
Поляризация	Линейная горизонтальная и вертикальная
Угол места (°)	От -6 до 182
Скорость вращения (°/с)	От 1 до 36
Точность установки (°)	±0,1
Дальность обнаружения (км) в режиме «Отражаемость» в режиме «Скорость»	256 125
Минимальная дальность (м)	625
Максимальная высота обнаружения (км)	
АЦП (бит)	2 канала, 14-бит
Опорная частота (МГц)	80
Однозначно определяемая доплеровская скорость (м/с)	40
Темп обзора (мин)	10
Напряжение (В)	
Частота (Гц)	
Мощность потребляемая аппаратурой (кВт)	

Таблица №1. Основные характеристики Meteor 50DX.

В качестве небольшого уточнения к приведенной выше таблице стоит указать то, что в составе АМРК «Метеор-Метеоячейка» имеет место подразделение на два режима работы: «Отражаемость» и «Скорость». Об этих режимах говорится далее в разделе о «Метеоячейке».



Рисунок №3. Радиолокатор Meteor 50DX, установленный на крыше РГГМУ.

1.4 Автоматизированный метеорологический комплекс (АМРК) «Метеор-Метеоячейка»

Автоматизированный метеорологический радиолокационный комплекс "Метеоячейка" был создан для автоматизации работы с радиолокационными системами с целью предоставления информации о состоянии облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды в режиме реального времени для аэродромов и автоматизированных систем управления воздушным движением. Изначально комплекс разрабатывался для работы с радиолокатором МРЛ-5, но позднее был приспособлен и для прочих радиолокаторов, включая Meteor 50DX. Комплекс обеспечивает высокую надежность и оперативность предоставления данных, и имеет повышенную помехозащищенность. Он состоит из радиолокатора Meteor 50DX и системы автоматизации получения, обработки и передачи радиолокационной информации. Эта система включает в себя центральную систему и специализированные рабочие станции. АМРК является пространственно

распределенной системой управления, и центральная система формирует управляющие команды для устройства предварительной обработки сигналов дистанционного управления.

На АМРК "Метеоячейка" явления погоды и формы облачности определяются с помощью заданных алгоритмов распознавания. Для каждого пункта установки алгоритмы могут быть настроены отдельно на основе сопоставления радиолокационной и наземной информации. Фундаментальная настройка алгоритмов производится в течение первого года эксплуатации, а затем каждый год производится оценка качества распознавания с возможной корректировкой алгоритмов.

Очень важным свойством, которое предоставляет в своем функционале «Метеор-Метеоячейка» является способность к корректировке местников, что имеет большое значение для радиолокационной станции, размещенной на крыше здания в городской среде.

Фильтр местников служит для удаления отражений от земных объектов. Введение такого фильтра позволяет получать на выходе скорректированную информацию по отражаемости, из которой будут вычтены мешающие отражаемости местных объектов.

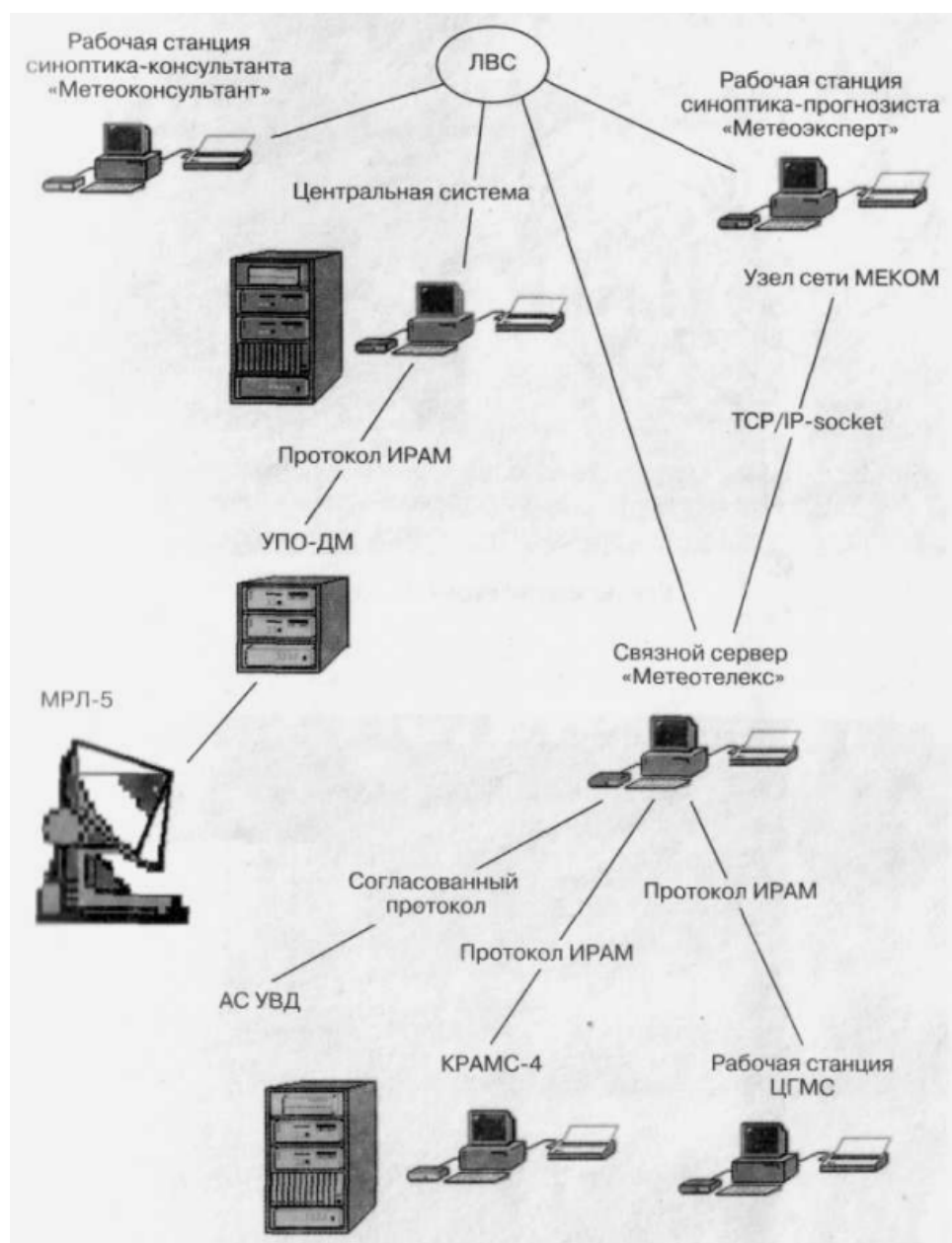


Рисунок №4. Структурная схема «Метеоячейки»

Из представленного выше рисунка стоит пояснить назначение УПО-ДМ. Она представляет из себя специальную электронно-вычислительную машину, которая непосредственно устанавливается в радиолокатор. УПО-ДМ делает возможным дистанционное управление РЛС, производит обработку информации и ее сжатие [5].

При использовании в составе АМРК когерентного доплеровского радиолокатора мы можем также говорить о существовании двух режимов работы программного обеспечения. Имеется возможность работы в некогерентном режиме

«Измерение отражаемости» («Отражаемость») и в когерентном «Допплеровская скорость» («Скорость»).

Из функционального описания «Метеячейки» для данной работы стоит вынести 16 градаций метеорологических явлений:

- 1) облачность верхнего и среднего яруса С—А,
- 2) слоистообразная облачность,
- 3) осадки слабые,
- 4) осадки умеренные,
- 5) осадки сильные,
- 6) кучевая облачность,
- 7) ливень слабый,
- 8) ливень умеренный,
- 9) ливень сильный,
- 10) гроза с вероятностью 30—70 %,
- 11) гроза с вероятностью до 90 %,
- 12) гроза с вероятностью более 90 %,
- 13) град слабый,
- 14) град умеренный,
- 15) град сильный,
- 16) отсутствие радиозха

Что касается интенсивности осадков, данная величина измеряется для каждого срока наблюдения. Пространственно она отображается в ячейках 4х4 километра квадратных.

Ниже приведены стандартные градации интенсивности осадков:

Жидкие осадки		Твердые осадки	
Интенсивность, мм/ч	Характеристика	Интенсивность, мм/ч	Характеристика
0,5—2,9	Слабые	0,02—0,1	Слабые
3,0—25,0	Умеренные	0,11—1,0	Умеренные
25,1—140,0	Сильные	>1,0	Сильные
>140,0	Очень сильные		

Таблица №2. Градации интенсивности осадков, применяемые в «Метеочейке».

1.5 Измерение жидких осадков

Измерение количества выпавших осадков является важным параметром при изучении климата и погоды в различных регионах мира. Эта практика ведется уже многие десятилетия и позволяет получать ценные данные для исследования и прогнозирования климатических изменений.

Для этой цели используются различные инструменты, среди которых осадкомеры являются одними из наиболее распространенных. Они позволяют точно измерять количество выпавших осадков, определять их интенсивность, а также следить за динамикой изменения погодных условий. В этой части мы рассмотрим принципы работы осадкомеров, их типы, особенности и применение в метеорологии.

Для измерения количества осадков используются различные приборы, которые могут быть как непрерывно следящими, так и требующими ручного снятия показаний.

Тем не менее, многие приборы для измерения осадков требуют ручного снятия показаний. Например, такие приборы, как дождемеры или снегомеры, могут использоваться для измерения количества осадков на определенных участках

территории. Для снятия показаний с таких приборов требуется присутствие наблюдателя, который будет периодически проверять и записывать показания.

Количество осадков определяется путем сбора жидкой воды, выпавшей на фиксированную приемную поверхность за определенный период времени.

Интенсивность определяется как количество осадков, выпавшее в единицу времени и вычисляется как [мм/мин] с требуемой точностью до 0,01 мм/мин.

При измерении количества атмосферных осадков возможны различные искажения результатов. Одним из основных источников ошибок является ветровой недоучет, который возникает из-за искажения воздушного потока у поверхности осадкомера. Это приводит к тому, что в осадкомере попадает меньше частиц осадков, чем реально выпало на ту же площадь. Ветровой недоучет больше при большой скорости ветра и малой скорости падения частиц осадков, и особенно заметен в холодный сезон [6].

Кроме ветрового недоучета, возможны другие ошибки измерения, такие как испарение осадков из осадкосборного сосуда и потери на смачивание его внутренней поверхности. Все эти погрешности могут приводить к занижению измеренного количества осадков. Однако, возможен и обратный эффект: во время метели снег, поднятый сильным ветром с поверхности снежного покрова, может попадать в осадкомер, что приводит к увеличению измеренного количества осадков.

Интенсивность жидких осадков определяется с помощью плювиографа, и в этом случае погрешности за счет смачивания и испарения отсутствуют.

Чтобы достичь достоверности измерений, необходимо учитывать различные факторы, такие как защищенность места измерений, правильная установка и уход за осадкомером и плювиографом, их исправность. Кроме того, следует проверять расстояние от осадкомера до ближайших препятствий и контролировать угол закрытости горизонта [7].

1.6 Современные измерительные приборы

Однако в последние десятилетия происходит активная разработка и внедрение приборов по измерению метеорологических величин, способных осуществлять измерения и передачу данных в автоматическом режиме. Непрерывно следящие приборы, такие как автоматические современные осадкомеры, самостоятельно фиксируют количество осадков и передают данные на удаленный компьютер для анализа. Эти приборы имеют высокую точность измерений и позволяют получать данные в реальном времени. На сети Росгидромет на данный момент присутствует множество автоматизированных метеорологических станций общего и специального назначения, осуществляющих слежение за осадками.

Основным преимуществом подобных станций является то, что они не нуждаются в постоянном обслуживании.

В качестве примера мы рассмотрим 3 принципа измерения осадков, применяемых в современных осадкомерах.

1) Лазерный осадкомер.

По принципу действия можно поставить данный прибор рядом с трансмиссометром. В его основе лежит измерение затухания лазерного луча, проходящего от излучателя к приемнику. Данное затухание, соответственно, должно вызываться тем, что на пути луча возникают капли выпадающих осадков. Лазер способен покрывать десятки квадратных сантиметров пространства, становящегося «приемной поверхностью». Внутренние алгоритмы данных приборов способны осуществлять классификацию типов осадков. Данная особенность делает их пригодными для использования в любое время года. Более того, данный способ измерения делает возможным косвенный расчет таких величин, как кинетическая энергия осадков, что может быть использовано при оценке эрозии почв, а также видимости в осадках и эквивалентной отражательной способности.



Рисунок №5. Осадкомер с лазерным принципом действия.

Примером подобных измерительных приборов может послужить Лазерный дистрометр OTT Parsivel² или Лазерный датчик осадков Microstep-MIS.

2) Осадкомер с опрокидывающимся ковшом. Данный инструмент использует механизм, включающий опрокидывающийся сосуд, для создания контакта при получении заданного объема дождевой воды (например, 0,2 мм в RG13 производства Vaisala). Механизм опрокидывающегося сосуда установлен внутри корпуса и имеет регулировочные винты и спиртовой уровень. Дождевая вода собирается в верхней половине сосуда и опрокидывается для слива воды и наполнения второй половины. Калибровка упрощается и точность улучшается благодаря постоянной скорости потока в опрокидывающийся сосуд. Магнит мгновенно замыкает контакты герконового выключателя при каждом опрокидывании сосуда.

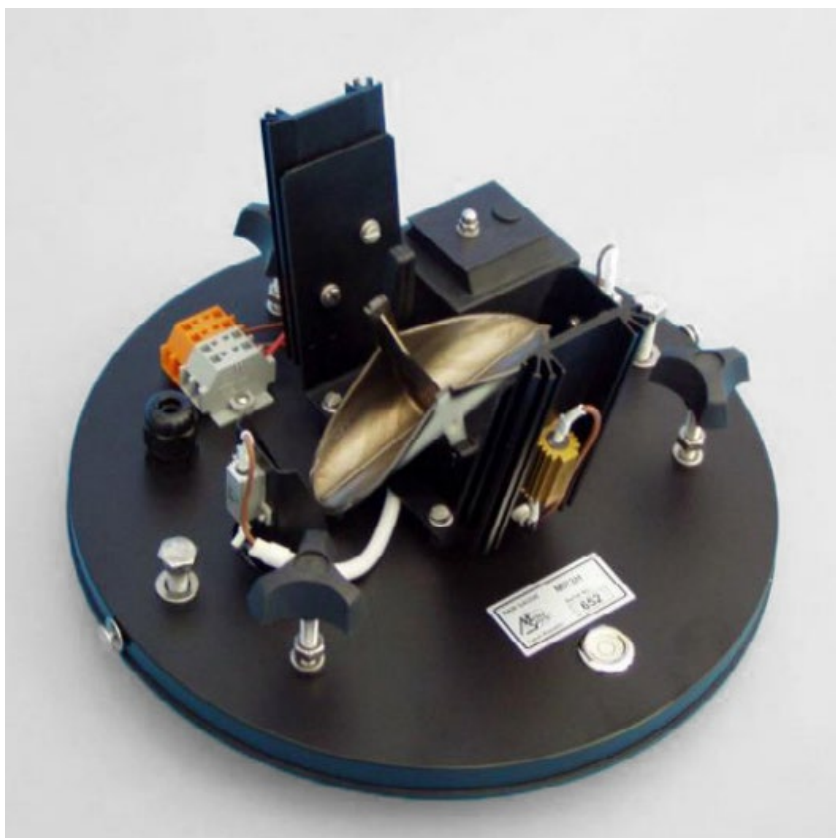


Рисунок №6. Механизм ковша из автоматического осадкомера.

Примером осадкомера, работающего с механизмом «опрокидывающего ковша», можно назвать MR3, MR3H, MR2, MR2H компании Microstep-MIS или RG13 RG13H производства компании Vaisala.

3) Весовой датчик измерения суммарных осадков.

В основе весовых дождемеров лежит использование тензометрического датчика. Тензометрический датчик – датчик, который способен преобразовывать величину своей деформации в электрический сигнал. Как правило, тензометрический датчик конструируется из собранной в пружину проволоки, через которую пропускается электрический ток. Когда элемент получает внешнее воздействие, заставляющее пружину удлиняться, сопротивление в цепи увеличивается. И наоборот, при внешнем воздействии, сжимающем пружину, сопротивление в цепи уменьшается. Таким образом, вес, накопленный во внутренней емкости измерителя количества осадков преобразуется в электрический сигнал.

Представителем измерительного прибора такого характера может быть TRwS214/514/215/415 Microstep-MIS или OTT Pluvio² 200/400.

Обратимся к детальному рассмотрению осадкомера OTT Pluvio² 200.

OTT Pluvio² - это осадкомер, который используется для автоматического измерения метеорологической интенсивности и объема осадков. Как уже было отмечено, он работает по принципу взвешивания, определяя вес сборного ведра для надежного обнаружения жидких или твердых осадков. Особенностью OTT Pluvio² является низкая потребность в обслуживании благодаря высокочувствительному ведру, отсутствию сборного лотка и прочному весовому механизму. Сенсорный элемент - высокоточный датчик нагрузки из нержавеющей стали, который остается стабильным в течение длительного периода благодаря герметичной упаковке. Интегрированный датчик температуры компенсирует изменения температуры в весовом механизме. Механическая защита от перегрузки предотвращает повреждение датчика нагрузки в случае силовых воздействий в вертикальном направлении, превышающих допустимые значения, например, во время транспортировки или опорожнения сборного ведра.

Данный измерительный прибор выпускается в модификациях с различным диаметром приемного отверстия.

Тип	весовой датчик
Чувствительный элемент	тензометрический датчик
Тип осадков	жидкие, твердые, смешанные
Рабочая температура	-40 ... +60°C
Температура хранения	-50 ... +70°C
Влажность	0 ... 100%
Источник питания	5,5 ... 28 V DC
Потребление тока	9,2 мА в 12 V (без нагрева)
Потребляемая мощность	от 110 мВт (без нагрева)
Точность (при -25 ... +45°C)	
Сумма	±0,1 мм или ±1% от измеренного значения
Интенсивность осадков	±0,1 мм/мин, ±6 мм/ч или ±1% от измеренного значения
Диапазон	
Осадки	0 ... 50 мм/мин или 0 ... 3000 мм/ч
Суммарный порог осадков при времени сбора 60 мин	0,05 мм/ч
Порог интенсивности осадков	0,1 мм/мин или 6 мм/ч

Таблица №3. Основные сведения и характеристики осадкомера Pluvio².

В представленной выше таблице продемонстрированы основные характеристики осадкомера ОТТ Pluvio² для его наиболее распространенных модификаций.

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ФОРМУЛЕ МАРШАЛЛА-ПАЛМЕРА

2.1 Инструменты для работы с базами данных

Основными инструментами при выполнении практической части данной дипломной работы будут выступать язык программирования Java и СУБД PostgreSQL.

СУБД - это аббревиатура, которая расшифровывается как "система управления базами данных". Она представляет собой программное обеспечение, разработанное для хранения, организации, управления и обработки больших объемов данных. СУБД обеспечивает удобный и эффективный способ взаимодействия с данными, позволяя пользователям создавать, изменять, извлекать и удалять информацию из базы данных.

СУБД предоставляет набор функций и возможностей, которые облегчают работу с данными. Это включает создание структуры базы данных с определением таблиц, полей и связей между ними. СУБД также предоставляет язык запросов, который позволяет пользователю извлекать нужную информацию из базы данных с помощью различных операций и условий.

Популярные примеры СУБД включают PostgreSQL, MySQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server и SQLite. Каждая СУБД имеет свои особенности и набор функциональных возможностей, чтобы удовлетворить различные потребности и требования проектов и приложений.

Для взаимодействия с базами данных PostgreSQL внутри приложения Java мной был выбран JDBC API.

JDBC (Java Database Connectivity) - это Java API (Application Programming Interface), предоставляющий возможность взаимодействия с базами данных с использованием языка программирования Java. JDBC позволяет разработчикам создавать Java-приложения, которые могут подключаться к различным СУБД, выполнять запросы, получать и обрабатывать данные.

Основная цель JDBC - обеспечить стандартный способ взаимодействия с базами данных в Java-приложениях, независимо от конкретной СУБД, которую использует приложение. JDBC предоставляет набор классов и интерфейсов, которые позволяют установить соединение с базой данных, отправлять SQL-запросы, получать результаты запросов и управлять транзакциями.

2.2 Формирование базы данных с наблюдениями осадкомеров

Автоматизированная информационная система (АИС) "Осадки" является частью проекта по слежению и управлению за водоотведением Санкт-Петербурга. Она позволяет рассчитывать объемы поверхностного стока и водного баланса. Система создавалась для уточнения пространственного распределения количества осадков по Санкт-Петербургу и ближайшим пригородам.

АИС "Осадки" состоит из 34 стационарных осадкомеров, установленных самостоятельно, либо в составе метеорологических станций, которые расположены на территории Санкт-Петербурга и его пригородов. Система включает в себя оборудование связи, аппаратно-программные комплексы для сбора, обработки, хранения и передачи данных. Каждому посту присвоен уникальный четырехзначный номер (например, 1001, 1002 и т.д.), и для каждого из них указаны географические координаты (широта и долгота в градусах, минутах, секундах) в соответствии с требованиями к системе учета атмосферных осадков в данной области.



Рисунок №7. Расположение осадкомеров АИС «Осадки»

На рисунке №7 продемонстрировано распределение осадкомеров Pluvio на территории Санкт-Петербург и ЛО. Из рисунка можно отметить, что большинство осадкомеров располагаются в пределах или на Кольцевой Автодороге или ближайших городах области. Расположение объясняется востребованностью получения информации об осадках с дорог, дорожных развязок и объектов инфраструктуры.

В приложении можно найти полное описание осадкомеров, входящих в АИС «Осадки», включающее порядковый номер, номер, присвоенный данному прибору в рамках измерительной системы, название данного прибора, а также его географические координаты.

Известно, что среднее расстояние между ближайшими друг к другу осадкомерами составляет 9,3 км. Дискретность измерений составляет 5 минут.

1001	23.08.2019	23:25:00	0.00
1001	23.08.2019	23:30:00	0.08
1001	23.08.2019	23:35:00	0.17
1001	23.08.2019	23:40:00	0.04
1001	23.08.2019	23:45:00	0.37
1001	23.08.2019	23:50:00	0.40
1001	23.08.2019	23:55:00	0.30
1001	24.08.2019	00:00:00	0.42
1001	24.08.2019	00:05:00	0.05
1001	24.08.2019	00:10:00	0.06
1001	24.08.2019	00:15:00	0.25
1001	24.08.2019	00:20:00	0.19
1001	24.08.2019	00:25:00	0.25

Таблица №4. Пример архива наблюдений за осадками в системе АИС
«Осадки»

В таблице № 4 представлен фрагмент архива наблюдений за осадками, зарегистрированного осадкомеров с номером 1001. В первой колонке представлен порядковый номер осадкомера. Во второй колонке представлена дата наблюдений. В третьей колонке представлено время наблюдения. В четвертой колонке представлено количество измеренных осадков в миллиметрах за прошедшие 5 минут.

Для дальнейшей работы были выбраны только летние месяцы из годовых архивов осадкомерных наблюдений.

В СУБД PostgreSQL было создано табличное соотношение, повторяющее структуру и наполнение архивных наблюдений за осадками. Создание реляционной базы данных обусловлено удобством при манипуляции над данными с помощью языка SQL. SQL предусматривает возможности определения ограничений выборки данных, формируемой с помощью гибкой системы синтаксиса запросов. Помимо этого, во время переноса данных в базу данных SQL из изначального архива, были удалены данные, содержащие сообщение об ошибке в измерениях. Ниже приводится пример подобного элемента данных:

1017	27.08.2019	08:50:00	0.00
1017	27.08.2019	08:55:00	999999
1017	27.08.2019	09:00:00	0.00

Таблица №5. Пример неверной регистрации данных.

Подобные «выбросы» могут быть зафиксированы как единично, что продемонстрировано в приведенной таблице, так и системно. В последнем случае сообщения могут занимать от нескольких сроков подряд, до множества дней для данных, регистрируемых конкретным осадкомером, что может говорить о явной неисправности измерительного прибора.

	id [PK] integer	measurementdate date	measurementtime time without time zone	raingauge integer	amount numeric (3,2)
1	10750812	2016-05-31	18:10:00	1001	0.00
2	10750813	2016-05-31	18:10:00	1002	0.00
3	10750814	2016-05-31	18:10:00	1003	0.00
4	10750815	2016-05-31	18:10:00	1004	0.00
5	10750816	2016-05-31	18:10:00	1005	0.00

Таблица №6. Пример данных в СУБД PostgreSQL

В представленной выше таблице изображены данные в системе PostgreSQL. В столбце id записан серийный уникальный номер данной строки с измерениями. В столбце measurementdate записана дата снятия измерения. В столбце measurementtime записано время снятия измерения. В столбце raingauge записан порядковый номер осадкомера. В столбце amount записано количество выпавших осадков за 10 минут.

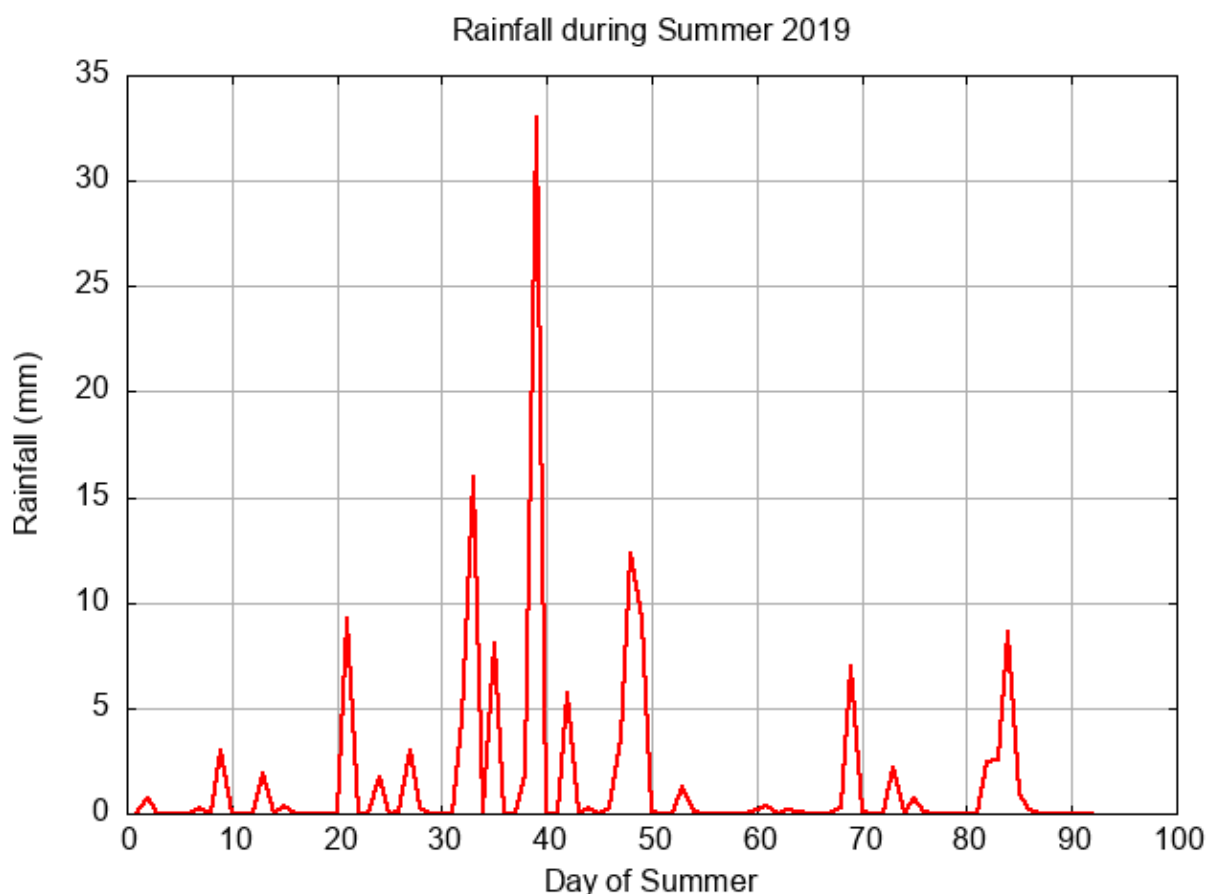


Рисунок №8. Количество осадков для осадкомера № 1034 летом 2019 года.

На рисунке выше продемонстрировано посуточная сумма осадков, зафиксированных осадкомером № 1034. Из данного графика можно вынести общие периоды дождей, прошедших летом в Санкт-Петербурге в точке расположения данного осадкомера.

2.3 Формирование базы данных с радиолокационными наблюдениями

Помимо базы данных, содержащей данные о количестве выпавших осадков, была создана база данных для информации, получаемой с АМРК «Метеоячейка». На представленном ниже рисунке можно подробно рассмотреть величины, предоставляемые АМРК «Метеоячейка».

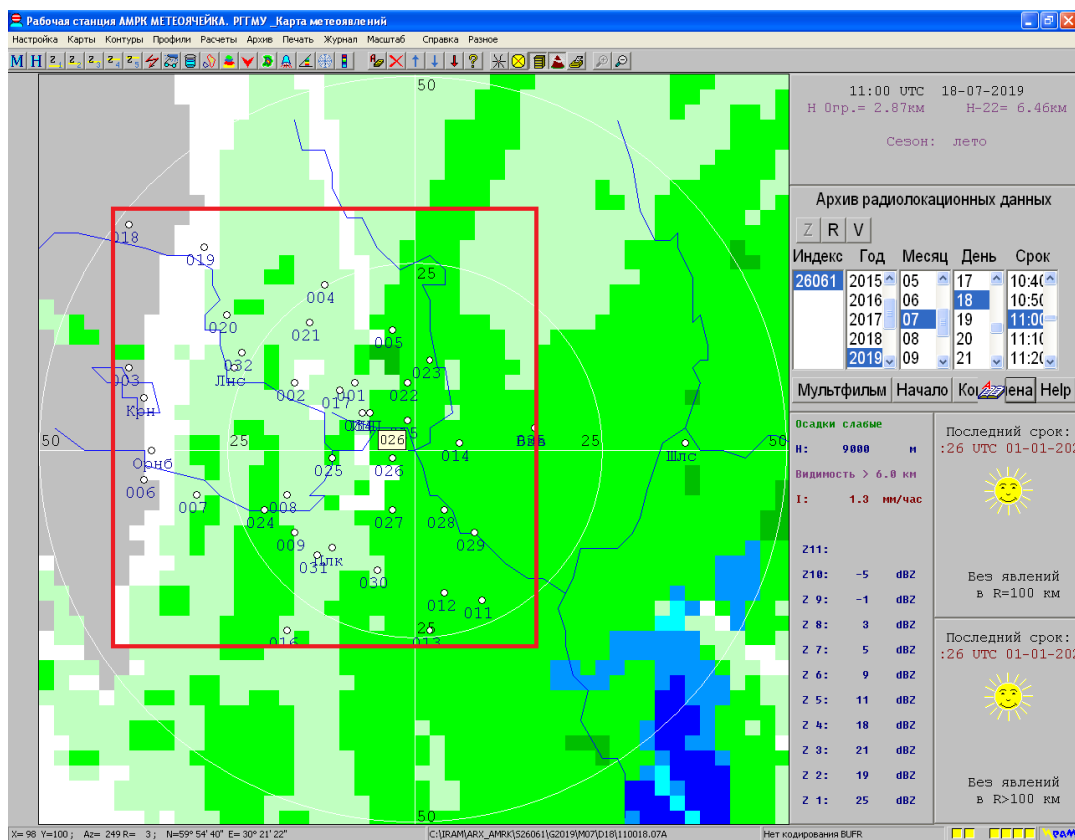


Рисунок №9. Рабочее окно АМРК «Метеоячейка» в режиме просмотра индикатора кругового обзора.

На рисунке №9 представлено рабочее окно АМРК «Метеоячейка». В данном окне на индикаторе кругового обзора (ИКО) можно наблюдать 33 точки, отображающие положения осадкомеров Pluvio на территории Санкт-Петербурга и прилегающих пригородов. Все точки измерительных приборов умецаются в радиусе 50 километров от радиолокатора, так что на изображении приведен укрупненный масштаб. Для корректного отображения на ИКО все точки были по географическим координатам внесены в специальный файл Mst.dat, отвечающий за отображение всех специальных точек в программе. Помимо этого, в правой нижней части рабочего экрана можно рассмотреть показатели радиолокационной отражаемости в [дБz] на одиннадцати уровнях, высоту верхней границы регистрируемой облачности, измеряющейся кратно 250, в метрах, значение видимости и значение интенсивности осадков в [мм/ч]. Все вышеперечисленные показатели продемонстрированы для осадкомера №1026 в срок 11:00 18 июля 2019 года.

Красной рамкой на рисунке выделен прямоугольник, границы которого определены крайними положениями какого-либо из осадкомеров. На поле аналогичных размеров позднее будут демонстрироваться статистические и расчетные величины. Глядя на расположение измерительных приборов внутри этого прямоугольника сходу можно обратить внимание на большой пустой регион в северо-восточной части выделенной области. Данная граница определяется пролеганием Кольцевой Автомобильной Дороги.

Для создания базы данных с информацией, извлекаемой с РЛС была написана отдельная программа на языке Java. Целью данной программы было создание и наполнение табличного соотношения в СУБД PostgreSQL данными, извлеченными из файлов данных, формируемых непосредственно «Метеоячейкой». Были взяты те точки радиолокационного поля обзора, которые соответствовали расположению дождемеров на местности. Помимо этого, в таблицу были внесены дата и время произведенных измерений и координаты данной точки в АМРК [x, y]

Ниже приведено 2 таблицы, иллюстрирующие созданное табличное соотношение с примером 5 строк данных.

Таблица №7. Пример базы из базы данных, созданной для радиолокатора.

	id [PK] integer	date date	time time without t	y integer	x integer	altitude integer	weatherevent character (36)
971	11584	2016-06-12	08:47:00	99	102	3750	Слабые осадки
972	11713	2016-06-12	09:57:00	99	102	6750	Слабые осадки
973	11828	2016-06-12	10:57:00	99	102	5000	Слабые осадки
974	11842	2016-06-12	11:07:00	99	102	5000	Слабые осадки
975	11856	2016-06-12	11:17:00	99	102	2500	Слабые осадки

z1 integer	z2 integer	z3 integer	z4 integer	z5 integer	z6 integer	z7 integer	z8 integer	z9 integer	z10 integer	z11 integer
18	3	-4	-9	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
19	[null]	-3	[null]	2	6	-5	[null]	[null]	[null]	[null]
19	-5	6	[null]	-3	-2	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
19	9	7	[null]	-5	-6	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]
20	-2	6	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]	[null]

На приведенных выше изображениях можно рассмотреть, как данные радиолокаторы были внесены в созданную мной базу данных. Таблица содержит уникальный id номер, дату и время снятия измерений (date, time), координаты данной точки в системе «Метеоячейка» (y, x), высоту верхней границы облачности (altitude), явление погоды (weatherEvent), которое было зарегистрировано АМРК для данного момента времени в данной ячейке, а также 11 значений радиолокационной отражаемости на 11 уровнях (z1 – z11).

Для дальнейшей работы будут востребованы только значения даты и времени проведенного измерения, координаты точки в АМРК, данные о зафиксированном погодном явлении и отражаемость z1.

Из полученного архива можно вычлениить пределы радиолокационной отражаемости для метеорологических явлений. Нижи приведена таблица, иллюстрирующая минимальное и максимальное значение радиолокационной отражаемости для того или иного метеоявления в [дБz]. В выборке для данной таблицы, участвовали данные, полученные летом 2018 и летом 2019 года в точках с установленными осадкомерами.

Таблица №8. Минимальные и максимальные значения отражаемости для явлений погоды АМРК «Метеоячейка»

Погодное_явление_АМРК character (36)	Минимальное_значение_z1 integer	Максимальное_значение_z1 integer
Гроза с вероятностью >85%	3	60
Гроза с вероятностью 30-70%	-5	60
Гроза с вероятностью 70-85%	0	60
Кучевые облака Q	-12	16
Облака верхнего и среднего яруса C-A	[null]	[null]
Облака нижнего яруса S	-12	16
Сильные ливневые осадки	46	59
Сильные осадки	46	48
Слабые ливневые осадки	18	29
Слабые осадки	18	29
Слабый град	37	57
Умеренные ливневые осадки	30	45
Умеренные осадки	30	45
Умеренный град	54	57

Из приведенной выше таблицы можно отметить, что пределы значений отражаемости полностью дублируются для некоторых явлений погоды. В частности, пределы полностью повторяются у:

1. Кучевых облаков Q (Конвективная облачность) и Облака нижнего яруса S
2. Слабых осадков и Слабых ливневых осадков
3. Умеренных осадков и Умеренных ливневых осадков

И частично повторяются у:

1. Сильных осадков и Сильных ливневых осадков

, где совпадение наблюдается только по нижнему пределу. Подобный результат может объясняться ограничениями выборки.

2.4 Первичная обработка данных

Рассмотрим значения стандартного отклонения для значений интенсивности, полученной с осадкомеров, распределенной по площади. Поле будет рассматриваться перенесенными с «Метеячейки» координатами реального положения измерительных приборов. Пространственная интерполяция была выполнена автоматически с помощью программы `gnuplot`. Выборка происходила по критерию интенсивности осадков, полученной с осадкомера, превышающей значение 0,6 [мм/ч]. Данный выбор я обуславливаю значением абсолютной погрешности для измерения количества осадков за один срок, которая составляет $\pm 0,1$ мм.

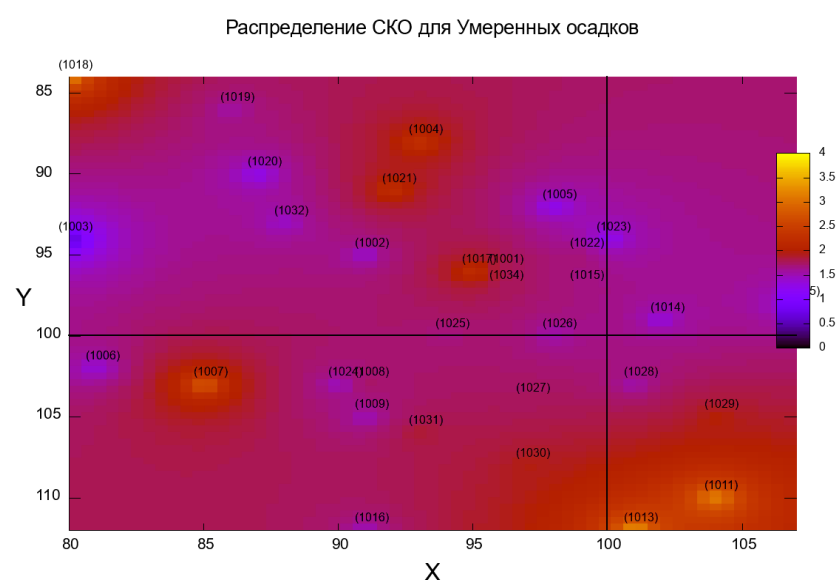
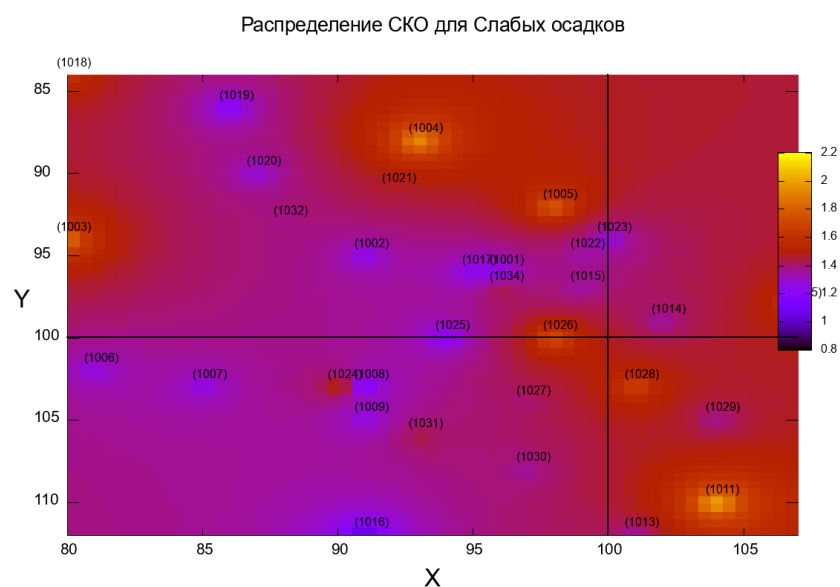


Рисунок №10. Поля стандартного отклонения Слабых и Умеренных осадков.

На представленных рисунках отображено пространственное распределение стандартного отклонения для значений интенсивности осадков, полученных с осадкомеров.

На графике для Слабых осадков можно наблюдать серьезную нестабильность поля, что можно объяснить тем, что данный тип осадков является наиболее распространенным. Значения варьируются от 1,3 до 1,7 [мм/ч]. Можно отметить возвышения к северо-западному направлению и занижения в центральном и юго-западном.

На графике для Умеренных осадков поле стандартного отклонения выглядит куда более однородным. Оно наблюдается в районе 1,5 [мм/ч] по всему полю. Резкое завышение на северо-западном углу может быть случайным, но в то же время нельзя не отметить аналогичное завышение на первом графике в том же месте. Помимо это, есть незначительное завышение в южной части.

График по Сильным осадкам не представлен, за 2018 и 2019 года не было зарегистрировано достаточное количество значений для построения подобного распределения.

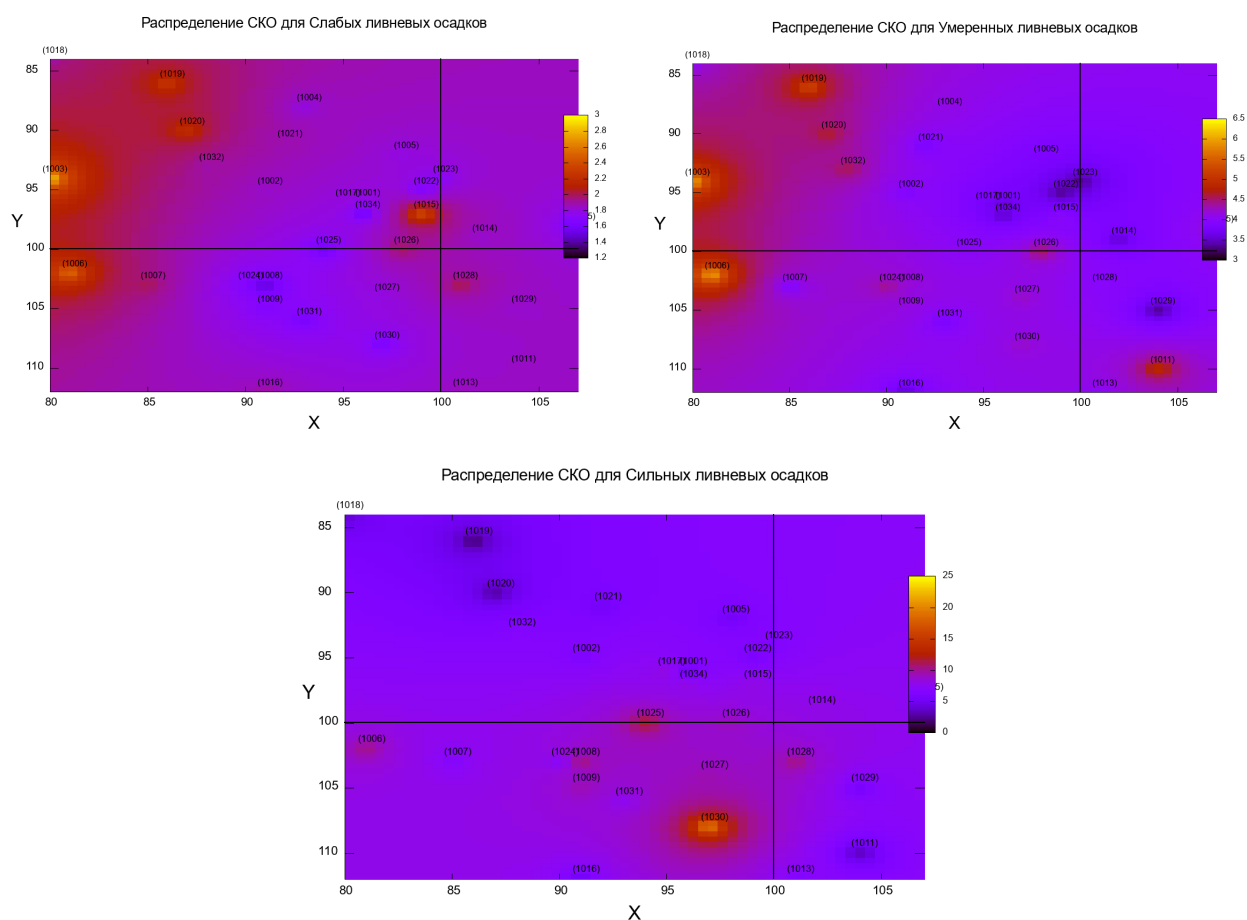


Рисунок №11. Поля стандартного отклонения Слабых ливневых осадков, Умеренных ливневых осадков и Сильных ливневых осадков.

На представленных рисунках изображены пространственные распределения стандартного отклонения для всех ливневых осадков.

На графике Слабых ливневых осадков есть 2 выраженных подъема в западной части рассматриваемой области, где величина стандартного отклонения достигает приблизительно 2,3 [мм/ч]. На остальном пространстве можно наблюдать достаточно гладкое распределение, составляющее приблизительно 1,8 [мм/ч].

На графике Умеренных ливневых осадков мы также наблюдаем выраженные подъемы в западной стороне. Значения СКО там приближаются к 5 [мм/ч]. В остальном значения по полю распространены достаточно равномерно и колеблются в районе 4 [мм/ч]. Невозможно также не отметить значительного сходства данного поля по форме с полем Умеренных осадков. Из подобного сходства можно предположить, что значения интенсивностей величин Слабых ливневых осадков и Умеренных ливневых осадков носят менее случайный характер. Южный пик также совпадает с аналогичным местом на графике Умеренных осадков.

На графике Сильных ливневых осадков наблюдается возвышение с центральной и юго-западной рассматриваемого участка, где в пике можно наблюдать около 10 [мм/ч]. Заниженные же участки есть с северо-западной и юго-восточной стороны в районе 4-6 [мм/ч]. Похожие завышения в данном северном участке также наблюдаются на графике Слабых осадков, и в меньшем масштабе на графиках Умеренных осадков и Умеренных ливневых осадков. Таким образом, итоговое поле, имеющее довольно уникальную форму, совпадает по максимуму с некоторыми другими возвышениями на других полях. Тем не менее, не стоит упускать из виду тот факт, что явления Сильных ливневых осадков было зафиксировано не так много, как Слабых ливневых осадков или Умеренных ливневых осадков. Аналогично Сильным осадкам данное явление встречается реже всего среди перечисленных. Можно обратить внимание, что некоторые точки (например, 1003 и 1004) отсутствуют на приведенном изображении. В данных пунктах за исследуемый период времени Сильные ливневые осадки не были зафиксированы вовсе.

На всех приведенных выше графиках никаких флуктуаций нет только в северо-восточном углу изображений. Это объясняется тем, что данная территория

не покрыта наземными измерительными приборами, о чем упоминалось при описании изображений индикатора кругового обзора.

Определимся с выборкой, которая будет принимать участие в расчете коэффициентов.

В качестве нижней границы будет рассматриваться 0,6 [мм/ч]. Выбор данного числа обусловлен значением абсолютной погрешности Pluvio²⁰⁰, которое составляет 0,1 [мм/ч] для фиксируемого количества осадков за один срок.

Верхняя граница будет определяться индивидуально для каждого значения отражаемости каждого отдельного осадкомера. В данных рассуждениях, я буду исходить из предположения, что величина количества, а, следовательно, и интенсивности осадков является случайной величиной и подчиняется нормальному распределению. В таком случае можно выделить участок $\pm\sigma$, соответствующий 68% значений. И раз нижняя граница выборки уже определена, то практическое значение представляет только значение $\bar{x} + \sigma$. Именно оно и будет выступать в роли верхней границы. Благодаря такому усечению, в расчете коэффициентов мы сможем избавиться от значений, однозначно искажающих результат.

Таблицы №9. Верхние границы для каждой отражаемости осадкомера №1007.

Отражаемость numeric	Верхняя_граница numeric	Число_случаев bigint	Отражаемость numeric	Верхняя_граница numeric	Число_случаев bigint
63	2.36	22	1995	11.47	8
79	2.72	26	2512	9.43	15
100	3.21	28	3162	9.52	10
126	3.02	29	3981	9.85	10
158	2.82	23	5012	9.79	3
200	4.54	33	6310	11.18	4
251	3.49	31	7943	13.39	3
316	4.56	37	10000	7.01	2
398	5.75	36	12589	11.92	4
501	4.24	32	15849	3.03	2
631	4.77	24	19953	[null]	1
794	4.19	27	31623	[null]	1
1000	6.84	23	39811	[null]	1
1259	3.85	21	63096	[null]	1
1585	7.25	26			

Отражаемость [мм⁶/м³], Верхняя граница [мм/ч], Число случаев [ед.]

На приведенной выше таблице продемонстрированы верхние границы для выборки, которая будет участвовать в расчете коэффициентов, на примере 1024 осадкомера. Глядя на данные таблицы можно заметить, что до определенного момента значения верхней границы возрастают с увеличением отражаемости, однако в определенный момент этот рост дестабилизируется. Данное явление объясняется тем, что больших значений отражаемости фиксируется гораздо меньше, в сравнении с маленькими значениями отражаемости. Таким образом, при небольшом количестве зарегистрированных наблюдений значение верхней границы малоустойчиво к выбросам. В некоторых случаях, имеющихся значений недостаточно даже проведения расчета как такового.

2.5 Проведение расчетов

Для нахождения коэффициентов A и b в соотношении Маршалла-Палмера был применен Метод Наименьших Квадратов (МНК). МНК является статистическим методом, который используется для аппроксимации или моделирования связей между теми или иными данными. МНК может быть применен к разным типам моделей.

$$Z = A * I^b \quad (8)$$

Прологарифмируем по основанию экспоненты

$$\ln Z = b * \ln I + \ln A \quad (9)$$

Примем, что

$$b = X$$

$$\ln A = Y$$

Тогда можно составить функцию для двух переменных и найти, при каких значениях двух переменных функция будет принимать наименьшие значения:

$$S(X, Y) = \sum_{i=1}^n (X \ln I_i + Y - \ln Z_i)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Вычислим частные производные для каждого параметра, после чего приравняем правые части выражений к нулю:

$$\begin{cases} S'_X(X, Y) = \sum_{i=1}^n 2(X \ln I_i + Y - \ln Z_i) * \ln I_i = 0 \\ S'_Y(X, Y) = \sum_{i=1}^n 2(X \ln I_i + Y - \ln Z_i) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

В таком случае, коэффициенты уравнения могут быть вычислены, как:

$$X = \frac{n * \sum_{i=1}^n \ln I_i * \ln Z_i - \sum_{i=1}^n \ln I_i \sum_{i=1}^n \ln Z_i}{n * \sum_{i=1}^n \ln I_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln I_i \right)^2} \quad (12)$$

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln Z_i - X * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln I_i \quad (13)$$

Тогда

$$b = X$$

$$A = e^Y$$

В качестве примера приводится поле точек отражаемость-интенсивность для осадкомера № 1011. На график также были добавлены кривые, построенные по коэффициентам Маршалла-Палмера ($A = 200$, $b = 1,6$) и новыми коэффициентами для данной точки ($A = 199$, $b = 1,0$).

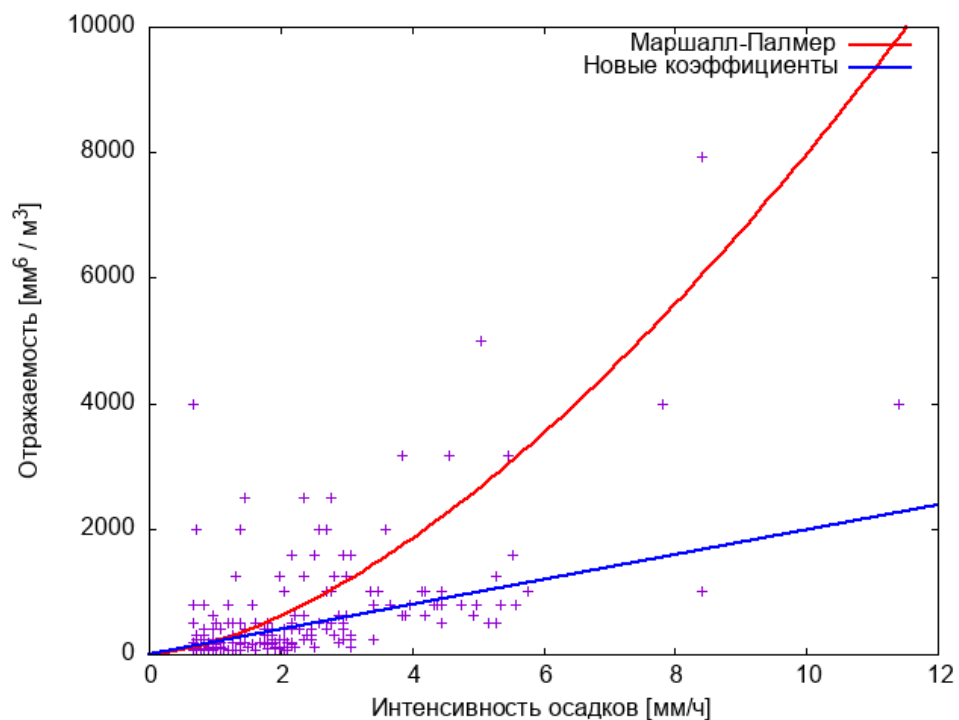


Рисунок №12. Зависимость интенсивности осадков от радиолокационной отражаемости.

В качестве примера приводится поле точек отражаемость-интенсивность для осадкомера № 1011. На график также были добавлены кривые, построенные по коэффициентам Маршалла-Палмера ($A = 200$, $b = 1,6$) и новыми коэффициентами для данной точки ($A = 199$, $b = 1,0$).

С помощью МНК были вычислены коэффициенты для уравнения Маршалла-Палмера для 33 осадкомеров и составлена карта их варьирования.

Распределение коэффициентов А

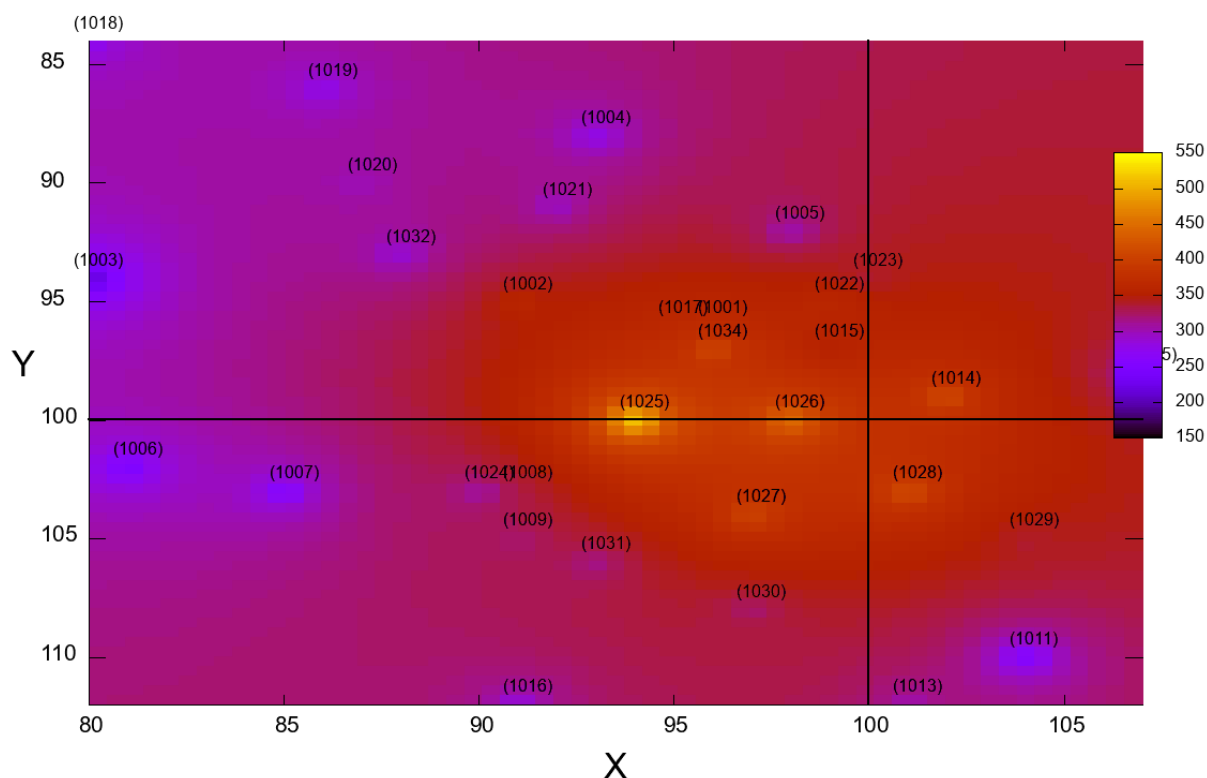


Рисунок №13. Пространственное распределение коэффициента А.

На представленном выше рисунке можно рассмотреть, как коэффициент А меняется на территории, покрытой осадкомерами. Пространственная интерполяция была автоматически произведена при построении графика в Gnuplot.

Из рисунка следует, что наибольшие значения А приходятся на место расположения локатора и, одновременно с этим, на территорию города Санкт-Петербурга. Со стороны финского залива значения понижаются примерно до 200.

В формуле $Z = A * I^b$ коэффициент А отвечает за «крутизну» наклона кривой. Таким образом, можно сказать, что чем выше значение А, тем больше значений маленьких интенсивностей осадков было зафиксировано для любых отражаемостей.

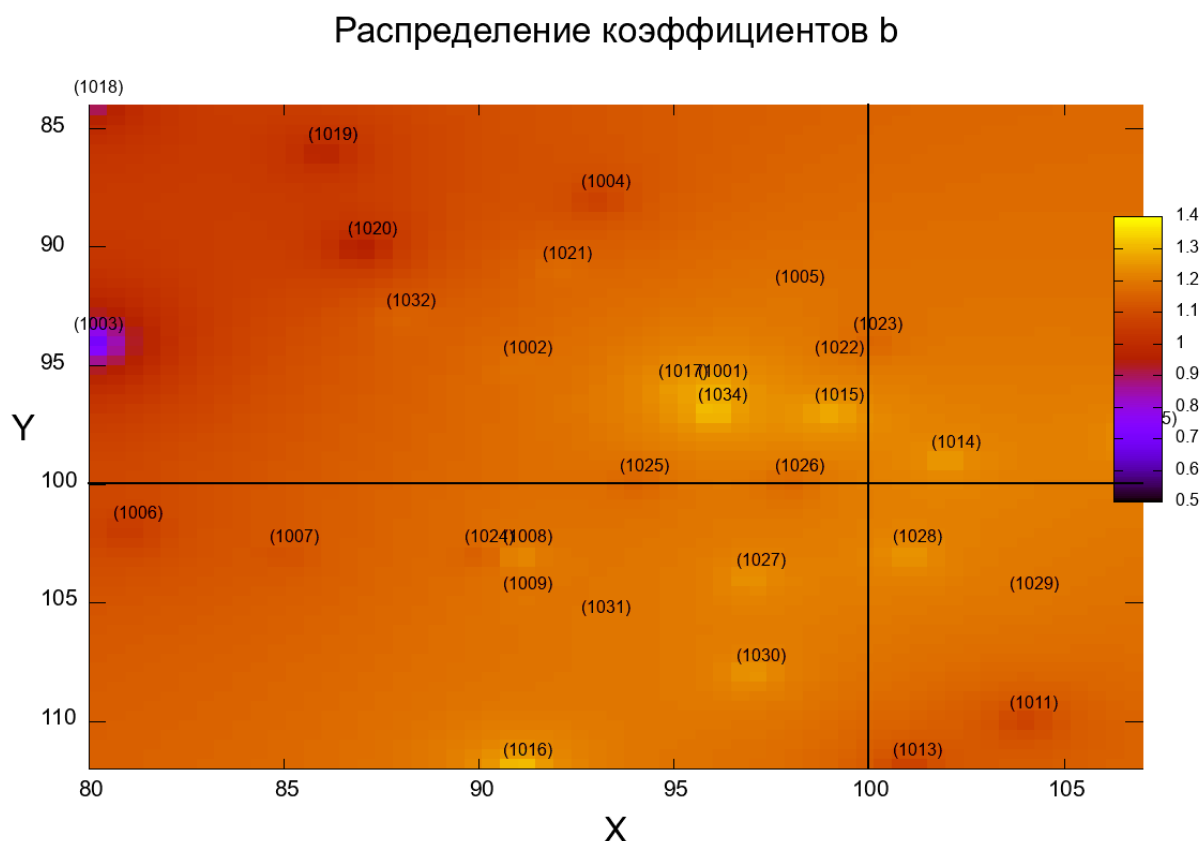


Рисунок №14. Пространственное распределение коэффициента b .

На представленном рисунке продемонстрировано, как варьируются значения коэффициента b по исследуемой территории.

Наибольшие значения коэффициента находятся в пределах Санкт-Петербурга и ближайших прилегающих к нему территориях. Занижения размещены локально на западе представленной зоны. Особо темная точка принадлежит 1003 осадкомеру, располагающемуся в Кронштадте. Низкие значения коэффициента b могут говорить о том, что кривая уравнения значительно завышает показания интенсивности осадков, получаемых радиолокационным способом.

Для того, чтобы посмотреть, как результаты расчетов влияют на значения интенсивности осадков, рассчитываемые косвенно в радиолокации, были найдены значения корреляции между интенсивностью по осадкомерам и интенсивностью по локатору.

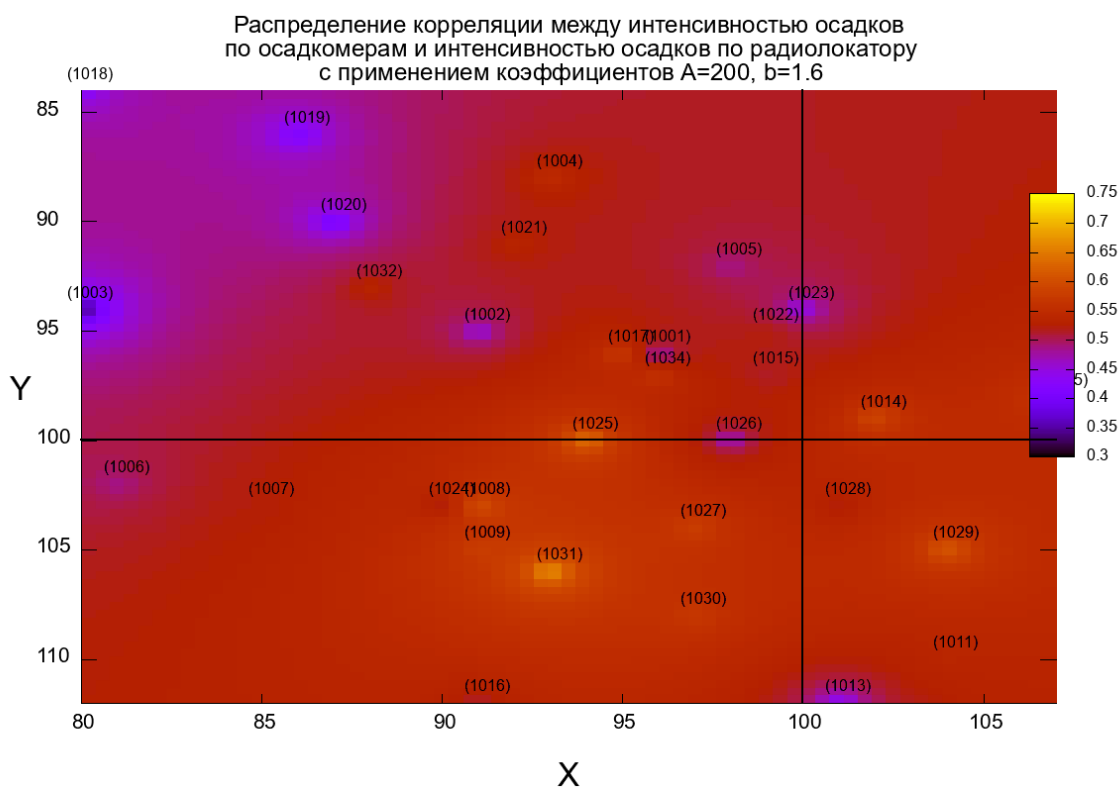


Рисунок №15. Поле корреляции интенсивностей осадков с использованием коэффициентов Маршалла-Палмера.

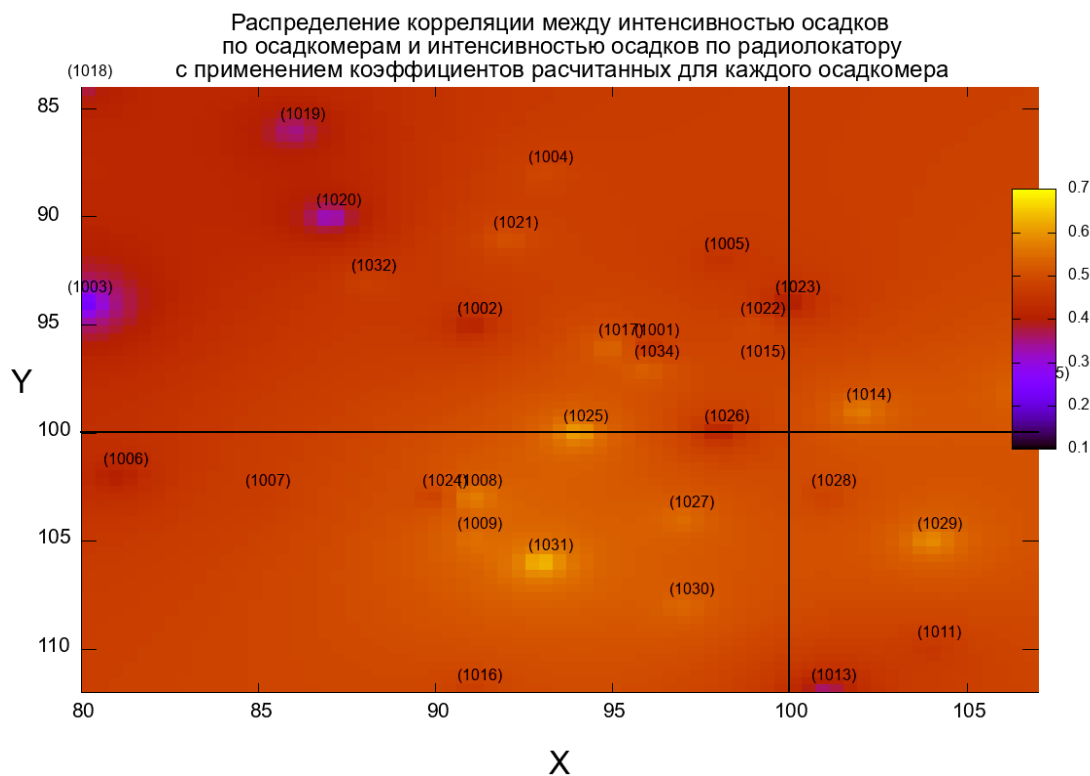


Рисунок № 16. Поле корреляции с использованием новых коэффициентов.

По результатам полученных значений корреляции можно сделать вывод, что расчетные коэффициенты не улучшили корреляционные показатели интенсивностей. Те позиции, на которых значение корреляции было достаточно высоким при используемых в настоящий момент коэффициентов Маршалла-Палмера, продолжают получать хорошие значения корреляционного значения. Те позиции, на которых значение корреляции было достаточно низким при используемых коэффициентах, все еще показывают низкую корреляцию.

На данных графиках отчетливо очень заметно проявляют себя все особенно яркие и особенно темные места, выделившиеся на полях распределения стандартного отклонения. Ожидаемо, для осадкомеров, демонстрировавших наибольшее СКО можно наблюдать наименьшую корреляцию.

Однако в среднем использование $A = 200$ и $b = 1,6$ дает более удовлетворительный результат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы были вкратце рассмотрены отличительные особенности климата Санкт-Петербурга. Непростое географическое расположение города оставляет его под влиянием сразу нескольких климатических зон одновременно. Из-за этого, даже в рамках одного региона и одного города могут наблюдаться те или иные климатические особенности более характерные для разных его частей. В том числе, это проявляется и в атмосферных процессах, связанных с выпадением жидких осадков. Многолетними наблюдениями на территории Санкт-Петербурга выявлялись зоны, показывающие неравномерное выпадение осадков на территории города.

Вторым аспектом, который я считаю важным отметить является создание баз данных в виде реляционных соотношений в SQL-виде для метеорологических параметров, из исходных данных, которые были мне предоставлены для выполнения данной работы. Данные могут быть подвержены дальнейшему анализу другими студентами, проводящими различные научные изыскания. Единственным фактическим ограничением для проведения манипуляций над данными может послужить незнание языка SQL.

Согласно озвученным в начале работы задачам, были проведены расчеты A и b для каждого осадкомера. Можно сказать, что данный подход пусть и незначительно, но оказал положительное влияние на правильность расчета, производимого в формуле Маршалла-Палмера.

Список литературы

1. Боровиков А.М., Костарев В.В., Радиолокационное измерение осадков, гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 1967.
2. Р. Довиак, Д. Зрнич, Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения, Ленинград Гидрометеоиздат 1988.
3. Степаненко В.Д., Радиолокация в метеорологии (радиометеорология), гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 1966.
4. Попов В.Б., Метод восстановления полей осадков по наземным и радиолокационным данным с высоким пространственно-временным разрешением для территории Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, 2019.
5. Автоматические метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка», Институт Радарной Метеорологии, Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 2007.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, выпуск 3, часть 1, Гидрометеоиздат, 1985.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, выпуск 10, Инспекция гидрометеорологический станций и постов, часть 1, Гидрометеоиздат, 2005.
8. , Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Февраль 2021.
9. Rainfall Amount and Intensity measured by the Thies Laser Precipitation Monitor, Eckhard Lanzinger, Manfred Theel, Herbert Windolph, Январь 2006.
10. Operating Instructions Precipitation gauge OTT Pluvio² L, OTT Hydromet, Document number 70.040.000B.E 01-0116
11. The distributions of raindrops with size, J.S. Marshall, W. McK. Palmer, Journal of meteorology, 1948.

Приложение 1

Перечень и координаты ПН, входящих в состав АИС «Осадки»

№	№ объекта	Название ПН	Координаты
1	1001	Канализационная насосная станция Комендантский аэродром ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 00' 03.7" с.ш. и 30° 16' 24.3" в.д.
2	1002	Северная станция аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 00' 14.3" с.ш. и 30° 07' 15.7" в.д.
3	1003	Канализационные очистные сооружения г. Кронштадт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 00' 57.1" с.ш. и 29° 43' 42.4" в.д.
4	1004	Водопроводная насосная станция Песочная ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 07' 04.6" с.ш. и 30° 11' 51.5" в.д.
5	1005	Водопроводная насосная станция Парнас ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 03' 44.1" с.ш. и 30° 21' 27.1" в.д.
6	1006	Водопроводная насосная станция г. Ломоносов ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 53' 17.1" с.ш. и 29° 45' 45.4" в.д.
7	1007	Водопроводная насосная станция Заячий ремиз ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 52' 09.1" с.ш. и 29° 53' 05.4" в.д.
8	1008	Красносельская станция аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 51' 21.4" с.ш. и 30° 06' 48.8" в.д.
9	1009	Юго-Западные очистные сооружения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 49' 14.0" с.ш. и 30° 07' 02.7" в.д.
10	1010	Водопроводная станция Колпинская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 46' 58.1" с.ш. и 30° 39' 57.7" в.д.
11	1011	Водопроводная насосная станция 4-ый подъем г. Колпино ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 44' 13.9" с.ш. и 30° 34' 27.3" в.д.
12	1012	Канализационная насосная станция Московская славянка ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 44' 54.2" с.ш. и 30° 28' 51.4" в.д.
13	1013	Канализационные очистные сооружения г. Пушкин ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 42' 26.5" с.ш. и 30° 26' 27.6" в.д.
14	1014	Северная водопроводная станция С ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 55' 53.1" с.ш. и 30° 30' 56.3" в.д.
15	1015	Главная водопроводная станция 2П ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 57' 09.6" с.ш. и 30° 22' 59.6" в.д.
16	1016	Водопроводная станция Дудергофская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 42' 18.2" с.ш. и 30° 06' 21.1" в.д.
17	1017	Стационарный снеголавинный пункт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 59' 26.2" с.ш. и 30° 14' 11.9" в.д.

		ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ	
18	1018	Канализационные очистные сооружения г. Зеленогорск ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 11' 16.0" с.ш. и 29° 43' 02.8" в.д.
19	1019	Канализационные очистные сооружения г. Репино ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 09' 40.8" с.ш. и 29° 54' 26,9" в.д.
20	1020	Канализационные очистные сооружения г. Сестрорецк ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 04' 43.1" с.ш. и 29° 57' 01.5" в.д.
21	1021	Канализационная насосная станция Иловые площадки ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 04' 33.7" с.ш. и 30° 09' 45.2" в.д.
22	1022	Водопроводная насосная станция Кушелевская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 59' 56.8" с.ш. и 30° 23' 32.8" в.д.
23	1023	Водопроводная насосная станция Муринская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 01' 36.1" с.ш. и 30° 26' 34.0" в.д.
24	1024	Водопроводная насосная станция Стрельна ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 51' 00.0" с.ш. и 30° 02' 46.5" в.д.
25	1025	Центральная станция аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 54' 53.4" с.ш. и 30° 13' 09.6" в.д.
26	1026	Водопроводная станция Волковская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 54' 31.7" с.ш. и 30° 21' 36.1" в.д.
27	1027	Водопроводная насосная станция Московская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 50' 46.3" с.ш. и 30° 20' 54.4" в.д.
28	1028	Южная водопроводная станция ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 50' 42.7" с.ш. и 30° 28' 32.1" в.д.
29	1029	Канализационные очистные сооружения г. Металлострой ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 49' 08.7" с.ш. и 30° 33' 32.6" в.д.
30	1030	Водопроводная насосная станция Пулковская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 46' 44.6" с.ш. и 30° 19' 15.1" в.д.
31	1031	Повысительная насосная станция Волхонка ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	59° 47' 32.7" с.ш. и 30° 10' 21.2" в.д.
32	1032	Водопроводная насосная станция Горская ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	60° 02' 04.4" с.ш. и 29° 59' 29.3" в.д.
33	1033	Не установлен	
34	1034	Объект ФГБУ «Северо-Западное УГМС» - ОГМС «Санкт-Петербург»	59° 58' 08.8" с.ш. и 30° 17' 02.3" в.д.
35	1035	Объект Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова	59° 56' 58.4" с.ш. и 30° 42' 16.0" в.д.