



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: «Влияние рельефа на поворот ветра с высотой»

Исполнитель Воробьев Николай Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

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

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 05 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| I. Исторический анализ исследований ветровой динамики | 5 |
| 1.1 Теоретические основы влияния рельефа на поворот ветра | 5 |
| 1.2. Экспериментальные исследования по данной теме..... | 7 |
| 1.3 Проблемы и недостатки предыдущих исследований..... | 9 |
| 1.4 Методы наблюдения и измерения ветра..... | 11 |
| II. Исходные материалы и методология | 15 |
| 2.1 Описание объекта исследования..... | 15 |
| 2.1.1 Физико-климатическое описание СПб и Петрозаводска | 15 |
| 2.2 Формирование базы данных по аэрологических радиозондовым наблюдениям..... | 19 |
| 2.3 Интерполяция значений параметров ветра по высотам..... | 22 |
| III Статистической анализ и обработка полученных данных | 23 |
| 3.1 Частотное распределение значений направления ветра | 23 |
| 3.2 Сравнение роз ветров | 32 |
| 3.3 Профили значений направления ветра в нижнем слое тропосферы | 41 |
| 3.4 Корреляционная матрица значений направления ветра..... | 47 |
| 3.5 Определение и аппроксимация «типичного» профиля значений направления ветра | 49 |
| 3.6 Верификация полученных уравнений | 51 |
| 3.7 Оценка влияния рельефа на поворот направления ветра..... | 52 |
| Заключение | 55 |
| Список литературы | 57 |

Введение

Исследование направления ветра и его изменения с высотой в пограничном слое атмосферы является ключевым фактором для прогнозирования загрязнения воздуха на определенной территории. Существует установленный факт, что наибольшее загрязнение атмосферы наблюдается в условиях антициклональной погоды и устойчивой стратификации. Поэтому необходимы данные о вращении ветра с высотой в таких атмосферных условиях в конкретном регионе.

Поворот ветра с высотой обусловлено шероховатостью подстилающей поверхности, поскольку движение воздуха в непосредственной близости к земной поверхности сдерживается трением, пропорциональным шероховатости поверхности. Таким образом, характер ландшафта, расположение и густота растительности, обилие

водоемов, рек, холмов и зданий оказывают влияние на градиенты направления ветра в вертикальном направлении.

Поэтому для более точных прогнозов загрязнения воздуха необходимо учитывать местные особенности и изменения направления ветра с высотой, особенно в условиях антициклональной погоды и устойчивой стратификации.

Атмосферный пограничный слой — область атмосферы между поверхностью Земли и высотой от 500 до 3000 метров, на которую существенно влияют энергия и влага с поверхности [Якобсон]. Его глубина изменчива в пространстве и времени, а сопротивление трению, испарение, теплопередача, выбросы загрязняющих веществ и орография местности являются основными параметрами, влияющими на его структуру, при отсутствии которых ветры были бы чисто геострофическими.

Примеры практического использования настоящего исследования.

Пример1. Для обеспечения долговечности материалов и конструкции линий электропередач сооружаются защитные экраны, ограждающие ЛЭП высоких напряжений от пылевидных частиц, приводящих к нежелательному

загрязнению изоляции ЛЭП. Для этого нужно знать типичное направление ветра на высоте стоек ЛЭП.

Пример 2. Расчет ветровой нагрузки, вызывающей колебания сооружений, и могущей нарушить нормальные условия эксплуатации в помещениях верхних этажей высотных зданий. Воздействие ветрового потока на конструкцию может привести к развитию аэродинамических неустойчивых колебаний, таких как ветровой резонанс и др.

Пример 3. Ветровые генераторы. Плоскость лопастей ветровой турбины генераторов с горизонтальной осью должна быть перпендикулярной направлению ветра.

Цель исследования заключается в оценке влияния характера подстилающей поверхности на изменение направления ветра с высотой в пограничном слое атмосферы.

I. Исторический анализ исследований ветровой динамики

1.1 Теоретические основы влияния рельефа на поворот ветра

Тесная связь поля давления с полем ветра приводит к тому, что барические системы являются одновременно системами ветров. В свободной атмосфере, где трение можно считать несущественным, ветер направлен вдоль изобар (изогипс) так, что низкое давление (в северном полушарии) остается слева. Таким образом, действительный ветер отклоняется у поверхности земли от геострофического влево в северном полушарии и вправо – в южном.

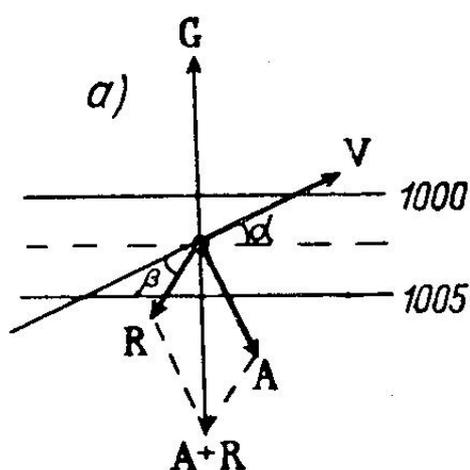


Рисунок 1.1.1. Взаимное расположение сил при прямолинейных изобарах.

«В пограничном слое по мере приближения к земной поверхности возрастает влияние силы трения и скорость ветра становится меньше скорости геострофического ветра, а по направлению он отклоняется от изобар в сторону низкого давления. В среднем, над сушей на уровне флюгера скорость фактического (измеренного) ветра составляет 0,55 от скорости геострофического ветра, а по направлению он отклоняется от изобар в сторону низкого давления на $35 - 45^\circ$. Над морем, в среднем, коэффициент перехода от геострофического ветра к фактическому равен 0,7, а отклонение от изобары в сторону низкого давления равно 15° .

«Отклонение направления ветра от изобар в слое трения в сторону низкого давления имеет очень большое значение, как фактор, определяющий

различие в погодных условиях в пределах областей пониженного и повышенного давления. В пределах депрессии (рис. 1.1.2.а) сходимось ветров (линий тока) приводит к накоплению массы воздуха в пограничном слое и к его вынужденному подъему вверх в виде, так называемых, упорядоченных вертикальных движений со скоростями нескольких см/с.

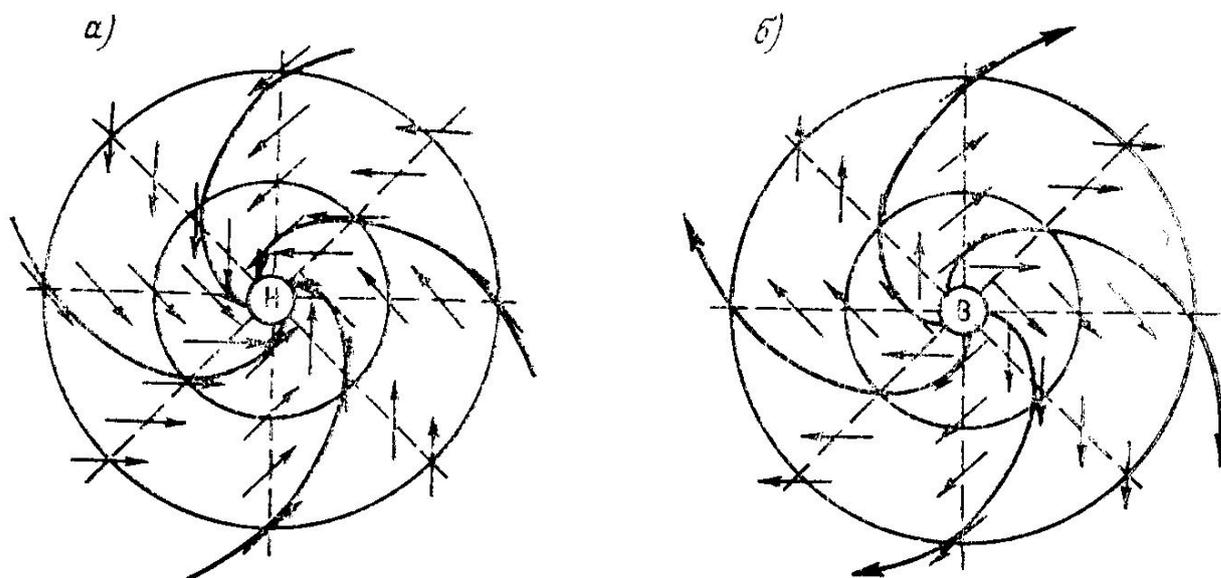


Рисунок 1.1.2. Поле ветра у поверхности земли: а) в дисперсии (циклон); б) в барическом максимуме (антициклоне).

Такой подъем воздуха вверх в устойчиво термически стратифицированной тропосфере вызывает его охлаждение, повышение относительной влажности и, затем, конденсацию водяного пара, образование облачности и выпадение осадков. Аналогичный процесс происходит и в ложбинах (рис. 1.1.3), где сходимось ветров происходит на их осях — линиях, соединяющих точки с наибольшей кривизной изобар.

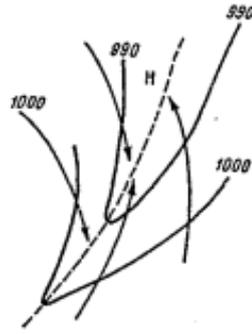


Рисунок 1.1.3. Поле ветра в ложбине.

Здесь также наблюдаются упорядоченные восходящие вертикальные движения. Более того, здесь создаются благоприятные условия для возникновения и поддержания длительного существования переходных зон между воздушными массами с различными погодными условиями - фронтальных разделов.

В областях повышенного давления (рис. 1.1.2.б), наоборот, расходимость ветров (линий тока) приводит к появлению упорядоченных нисходящих движений, компенсирующих убыль массы в пограничном слое. Опускающийся воздух нагревается, начинается испарение облачных капель, облачность постепенно деградирует и исчезает, воздух удаляется от состояния насыщения водяным паром. Поэтому в областях повышенного давления обычно (но не всегда) малооблачная погода с большим суточным ходом метеорологических величин» [1].

1.2. Экспериментальные исследования по данной теме

Изменение скорости и направления ветра с высотой в пограничном слое атмосферы (1-1,5 км) можно представить годографом.

Годограф – кривая, соединяющая концы векторов, изображающих ветер на разных высотах и проведенных из одной точки. Эта кривая представляет собой логарифмическую спираль, называемую спиралью Экмана. Представленную на рисунке 1.2.1.

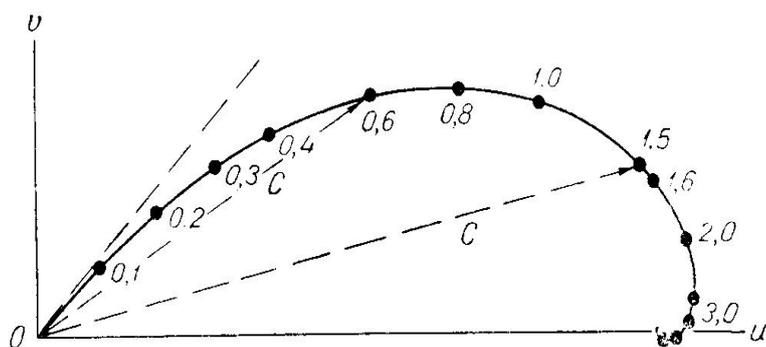


Рисунок 1.2.1. Спираль Экмана.

«На данный момент проблема своевременного прогнозирования опасных метеорологических явлений является актуальной, так как известно, что атмосферные явления категории ОЯ (опасное явление) наносят огромный материальный и экономический ущерб. Одним из наиболее опасных явлений считается ветер, в частности, сильный ветер.» [2]

Для исследования ветра и его прогнозирования необходимо знание его изменения с высотой. Данный анализ был проведен впервые Экманом, который показал, что учет сил вязкого трения приводит к тому, что направление ветра у земли составляет 45° с изобарой и только с высотой теоретически на бесконечности принимает направление геострофического ветра. Изменение профиля ветра с высотой получило название спирали Экмана, но эта модель учитывает лишь изменение давления вдоль меридиана, предполагая изменения давления вдоль параллели неизменным.

В пограничном слое атмосферы можно с достаточной точностью считать турбулентное трение не изменяющимся с высотой, что эквивалентно пренебрежению всеми силами, кроме сил турбулентной вязкости. Но влияние турбулентности существенно и в более высоких слоях, где наряду с этим влиянием необходимо уже учитывать и другие действующие силы, и прежде всего отклоняющую силу вращения Земли (сила Кориолиса).

1.3 Проблемы и недостатки предыдущих исследований

К сожалению, хотя спиралевидный профиль скорости действительно часто наблюдается в планетарных пограничных слоях, он довольно редко оказывается похож на аналитический экмановский профиль. Это обычно объясняется неудовлетворительностью гипотез замыкания. Дальнейшие исследования пограничного слоя в основном опирались на эмпирические данные.

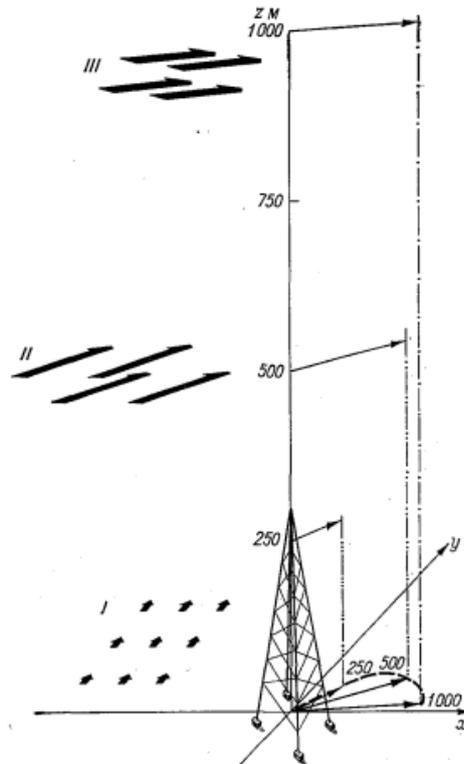


Рисунок 1.3.1. Спираль и годограф Экмана.

- I. Приземный ветер;
- II. Ветер в пограничном слое;
- III. Геострофический ветер.

«Модель пограничного слоя может быть получена в результате весьма различных предположений. Детальность описания пограничного слоя зависит от конкретной задачи. Мы, конечно, хотели бы располагать и полным решением, однако это вряд ли возможно. Ряд приближений позволяет получить весьма важные связи между параметрами без воспроизведения

полной структуры пограничного слоя. Эти зависимости являются очень важным шагом в направлении к получению полного решения.

Приземным слоем называется слой, где турбулентные потоки импульса, тепла и влаги не меняются с высотой. Эффекты не стационарности и влияния силы Кориолиса в этом слое очень малы.

Один из методов, прямо основанных на статистической природе флуктуаций, называется корреляционным. В довольно тонком приповерхностном слое, где сила Кориолиса пренебрежимо мала, в уравнениях пропадают все параметры, и в случае плоскопараллельного потока могут быть эффективно использованы гипотезы подобия. Пересмотр уравнений Навье — Стокса сводится к тому, что в них пренебрегают молекулярной вязкостью и вводятся допущения пограничного слоя. Поле скорости можно разбить на средние и пульсационные компоненты, а напряжение трения представляется как средний поток импульса. Предполагается, что среднее движение стационарно. Задача состоит в нахождении эмпирических параметров, таких, как коэффициент аэродинамической шероховатости, связывающий турбулентные потоки и трение со скоростью ветра над различными поверхностями.

Экспериментальные исследования в приземном слое включают как непосредственное измерение трения на поверхности, так и детальное фиксирование поля скорости. Прямой метод измерения потоков основан на измерении поля скорости с помощью малоинерционных датчиков. Другой метод, называемый профильным (или градиентным), дает возможность определять потоки и силу трения по данным о средней скорости и температуре. Для этого метода необходимо знание нескольких эмпирически определяемых констант.» [3]

1.4 Методы наблюдения и измерения ветра

Ветер представляет собой горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности и характеризуется скоростью и направлением перемещения.

Под скоростью ветра понимают расстояние, на которое перемещаются частицы воздуха за единицу времени; скорость ветра измеряется в метрах в секунду (V , м/с).

За направление ветра принимается то направление, откуда перемещается воздух. Направление ветра определяется углом между географическим меридианом и направлением на точку горизонта, откуда дует ветер. Направление измеряется в градусах от плоскости меридиана по ходу часовой стрелки от 0° до 360° или в румбах. Пример наименования направления ветра представлен в таблице 1.4.1.

| Название | Обозначение | | Градусы | | Цифры Кода |
|-----------------------|-------------|---------------|------------|------------|---------------|
| | Русское | Международное | От | До | |
| Северо-северо-восток | ССВ | NNE | 12 | 33 | 02 |
| Северо-восток | СВ | NE | 34 | 56 | 05 |
| Востоко-северо-восток | ВСВ | ENE | 57 | 78 | 07 |
| Восток | В | E | 79 | 101 | 09 |
| Востоко-юго-восток | ВЮВ | ESE | 102 | 123 | 11 |
| Юго-восток | ЮВ | SE | 124 | 146 | 14 |
| Юго-юго-восток | ЮЮВ | SSE | 147 | 168 | 16 |
| Юг | Ю | S | 169 | 191 | 18 |
| Юго-юго-запад | ЮЮЗ | SSW | 192 | 213 | 20 |
| Юго-запад | ЮЗ | SW | 214 | 236 | 23 |
| Западо-юго-запад | ЗЮЗ | WSW | 237 | 258 | 25 |
| Запад | З | W | 259 | 281 | 27 |
| Западо-северо-запад | ЗСЗ | WNW | 282 | 303 | 29 |
| Северо-запад | СЗ | NW | 304 | 326 | 32 |
| Северо-северо-запад | ССЗ | NNW | 327 | 348 | 34 |
| Север | С | N | 349 | 11 | 36 |
| Переменное | - | - | - | - | 99 |
| Штиль | - | - | - | - | 00 |

Таблица 1.4.1. Направление ветра и обозначения.

«При производстве метеорологических наблюдений измеряются средняя скорость ветра за 10 мин, максимальное значение за этот же интервал времени (скорость ветра при порывах) и направление ветра, а также максимальная скорость ветра между сроками. Направление ветра осредняется визуально — по непосредственному наблюдению его изменения, поэтому осреднение направления производится за 2 мин. Если на станции нет прибора с автоматическим осреднением скорости ветра за 10 мин, то приходится и скорость ветра осреднять по непосредственным наблюдениям за ее изменением. Такое осреднение приходится применять при определении скорости и направления по флюгеру.

Для измерения скорости ветра применяются приборы, основанные на преобразовании энергии ветрового потока в механическое вращение различного рода вертушек, ветровых колес или воздушных винтов и определении скорости вращения этих агрегатов — такого рода устройства для измерения скорости ветра называют вращающимися анемометрами. Анемометры обычно подразделяют на анемометры с вертикальной осью вращения и анемометры с горизонтальной осью вращения. К этой же группе приборов относятся термоанемометры, акустические (ультразвуковые) анемометры, ионизационные анемометры и др., каждый из которых основан на воздействии ветра на температуру нагретого тела, скорость распространения звука, или перенос ионизированных частиц. Все эти приборы измеряют скорость воздушного потока.

Другую группу приборов составляют устройства, измеряющие силовое воздействие воздушного потока на различные тела: пластины, шары, цилиндры и др. более сложной конфигурации. За этими устройствами не установилось какого-либо обобщающего названия, но они принципиально отличаются от анемометров тем, что в результате измерения непосредственно получается сила ветра, которая зависит от плотности воздуха. К таким

приборам относится широко применявшийся на сети флюгер Вильда (с легкой и с тяжелой доской), ветромер Третьякова и другие приборы того же рода.» [4]

К этим же приборам примыкают и приборы, измеряющие непосредственно динамическое давление ветрового потока (скоростной напор). Эти приборы составляют группу манометрических ветроизмерительных приборов. Из этих приборов на нашей сети применяется ураганомер.

Для измерения направления ветра в большинстве случаев применяются различные флюгарки, вращающиеся вокруг вертикальной оси и устанавливающиеся в потоке под воздействием ветра на ее хвостовую часть. Лишь в отдельных случаях применяются другие, более сложные устройства, которые обычно применяют на морских судах, где при измерениях (или при обработке результатов) необходимо исключать собственную скорость корабля.

«*Радиозонд* – прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (давления, температуры, влажности и др.), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

Радиозонд может прикрепляться к газонаполненной оболочке либо может сбрасываться (сбрасываемый зонд) с воздушного судна или ракеты.

Радиозондовое наблюдение – наблюдение с помощью радиозонда за метеорологическими параметрами на высотах, как правило, за атмосферным давлением, температурой и влажностью.

Аэрологическое наблюдение – метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямыми или косвенными методами измерения.

Аэрологическая станция – станция на поверхности земли, с которой проводятся аэрологические наблюдения.

Зондирование – определение одного или нескольких метеорологических параметров на высотах с помощью приборов, поднимаемых газонаполненной оболочкой, самолетом, змеем, планером, ракетой и т. п.» [5]

Радиозондовые системы обычно используются для измерения давления, температуры и относительной влажности. В большинстве оперативных пунктов радиозондовые системы используются также для определения ветра на высотах. Кроме того, на некоторых радиозондах установлены системы датчиков для определения актинометрических характеристик атмосферы или для определения концентрации озона. В этом случае радиозондирование называется актинометрическим или озонметрическим зондированием

II. Исходные материалы и методология

2.1 Описание объекта исследования

В данной работе рассмотрим влияние рельефа (подстилающей поверхности) на направление ветра. В ходе этой работы проследим за изменением направления ветра с высотой, как меняется это направление, по часовой или против часовой стрелки происходит сам поворот ветра с высотой. Разберем это на примере двух городов Российской Федерации, таких как Санкт-Петербург и Петрозаводск. Периодом исследования является месяц сентябрь.

Для города Санкт-Петербург стандартным направлением ветра в данный период является западный и юго-западный ветер. Ветер, который приходит в город с Балтийского моря через страны Прибалтики и юго-западную часть Ленинградской области, а также с водной глади Финского залива являясь западным для города.

Основным направлением ветра для города Петрозаводск является юго-западный ветер. Также преобладает южный и западный ветер. Приходит ветер в город с Олонецкой возвышенности.

2.1.1 Физико-климатическое описание СПб и Петрозаводска

Город Санкт-Петербург является вторым по величине городом Российской Федерации, расположен в Северо-Западной части страны. Город берет свое начало в дельте реки Невы на Васильевском острове, на правом и левом берегах дельты реки. Высота этой местности не превышает 5 метров ближе к окраинам города высота над уровнем моря растет. Более значительный рост имеет правобережная часть города. Высота рельефа превышает 30 метров над уровнем моря. Левобережная часть Санкт-Петербурга имеет более пологий подъем по сравнению с правобережной частью.

Севернее Санкт-Петербурга располагается Лемболовская возвышенность, максимальная высота, которой достигает 203 метра над

уровнем моря, средняя высота составляет свыше 50 метров. На западе город омывается водами Невской губы, после острова Котлин, на котором расположен город Кронштадт начинается Финский залив. На юге Санкт-Петербурга располагаются Пулковские высоты, которые в самой высокой точке достигают высоту в 75 метров. Далее они плавно переходят в Ижорскую возвышенность, расположенную юго-западнее города, и с резким склоном в сторону Финского залива. Средняя высота возвышенности 150 метров, а максимальная высота достигает 163 метра. На востоке город от Ладожского озера заболоченная местность Всеволожского района Ленинградской области на протяжении 30 километров.

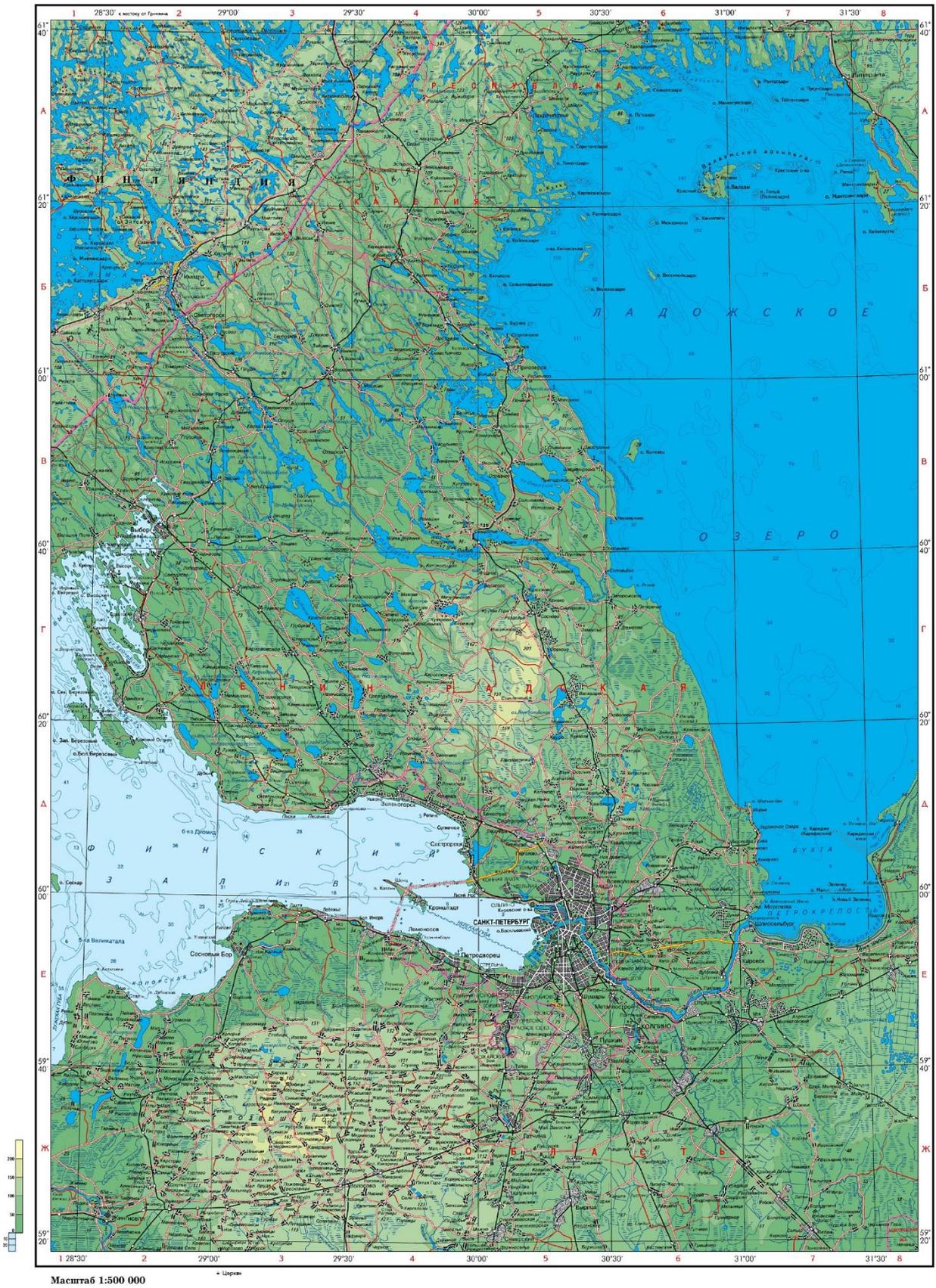


Рисунок 2.1.1. Физическая карта Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Для города и области характерна атлантико-континентальная область умеренного пояса. Зимы в городе не имеют значительно низкие значения температуры, как и летом высоких. Средняя температура составляет 6,3 градусов Цельсия. Осадков выпадает в среднем за год в районе 667,7 мм, основным источником для выпадений осадков является циклоническая деятельность.

Город Петрозаводск расположен на северо-западе Российской Федерации в Республике Карелия и является столицей республики. Город простирается на склоне Олонецкой возвышенности расположенной на юго-западе от Петрозаводска. Ее максимальная высота достигает 313 метров над уровнем моря. На востоке город вытянут по побережью Петрозаводской губы, являющейся частью Онежского озера. Севернее Петрозаводска возвышается гора Ялгора с высотой 187 метров. На северо-западе города расположена гора Сулажгора с высотой в 125 метров над уровнем моря. На юге Петрозаводска максимальную высоту имеет гора Кукковка с высотой 180 метров.



Рисунок 2.1.2. Физическая карта Республики Карелия.

В Петрозаводске климат умеренно-континентальный, продолжительная зима и прохладное короткое лето. Выпадает значительное количество осадков, среднегодовое количество осадков равно 756 мм, максимальное количество осадков выпадает в августе месяце, а минимальное в феврале. Среднегодовая температура в городе составляет 3,8°С.

2.2 Формирование базы данных по аэрологических радиозондовым наблюдениям

Чтобы узнать направление и скорость ветра у поверхности земли и на высотах нужно получить измеренные данные в атмосфере. Для получения

результата воспользуемся данными по зондированию атмосферы. Зондирование позволит нам получить результат на высотах. Были выбраны для работы и обработки данных города Санкт-Петербург и Петрозаводск. Данные по зондированию за сентябрь 2019 года получены с сайта University of Wyoming (Университет Вайоминга) Wyoming Weather Web. В разделе зондирование по Европейскому региону для каждого города нашел номер станции, расположение, широтные и долготные координаты. Пример с исходными данными для Санкт-Петербурга (Воейково) в рис. 2.2.1.

26075 ULLI St.Petersburg(Voejkovo) Observations at 00Z 01 Sep 2019

| PRES hPa | HGHT m | TEMP C | DWPT C | RELH % | MIXR g/kg | DRCT deg | SKNT knot | THTA K | THTE K | THTV K |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 1011.0 | 72 | 11.8 | 10.5 | 92 | 7.94 | 240 | 2 | 284.1 | 306.2 | 285.4 |
| 1000.0 | 166 | 13.6 | 12.7 | 94 | 9.30 | 270 | 12 | 286.8 | 312.8 | 288.4 |
| 997.0 | 191 | 14.7 | 13.8 | 94 | 10.03 | 275 | 14 | 288.1 | 316.3 | 289.9 |
| 992.0 | 234 | 16.6 | 15.6 | 94 | 11.36 | 284 | 13 | 290.4 | 322.6 | 292.4 |
| 973.0 | 399 | 15.8 | 13.9 | 88 | 10.34 | 320 | 12 | 291.2 | 320.6 | 293.0 |
| 969.0 | 434 | 15.6 | 13.5 | 87 | 10.13 | 323 | 11 | 291.4 | 320.2 | 293.1 |
| 966.0 | 460 | 17.2 | 15.2 | 88 | 11.37 | 326 | 11 | 293.2 | 325.8 | 295.2 |
| 952.0 | 584 | 16.0 | 9.0 | 63 | 7.62 | 337 | 8 | 293.2 | 315.4 | 294.6 |
| 949.0 | 611 | 15.8 | 9.0 | 64 | 7.62 | 340 | 8 | 293.4 | 315.5 | 294.7 |
| 925.0 | 828 | 14.6 | 8.6 | 67 | 7.63 | 335 | 6 | 294.2 | 316.5 | 295.6 |
| 918.0 | 892 | 14.6 | 8.6 | 67 | 7.69 | 331 | 6 | 294.9 | 317.4 | 296.2 |
| 902.0 | 1041 | 11.8 | 7.9 | 77 | 7.46 | 322 | 6 | 293.5 | 315.2 | 294.8 |
| 882.0 | 1228 | 10.5 | 7.0 | 79 | 7.19 | 310 | 6 | 294.0 | 315.0 | 295.3 |
| 874.0 | 1305 | 10.0 | 6.7 | 80 | 7.09 | 315 | 6 | 294.3 | 315.0 | 295.5 |
| 862.0 | 1420 | 10.0 | 6.9 | 81 | 7.29 | 322 | 7 | 295.4 | 316.8 | 296.7 |
| 852.0 | 1517 | 10.0 | 5.0 | 71 | 6.46 | 329 | 8 | 296.4 | 315.5 | 297.6 |
| 850.0 | 1537 | 10.4 | 5.4 | 71 | 6.66 | 330 | 8 | 297.0 | 316.8 | 298.2 |
| 844.0 | 1596 | 12.2 | 6.2 | 67 | 7.09 | 334 | 8 | 299.5 | 320.7 | 300.8 |
| 836.0 | 1676 | 11.2 | 4.2 | 62 | 6.22 | 339 | 8 | 299.3 | 318.0 | 300.4 |
| 820.0 | 1836 | 10.7 | 3.8 | 63 | 6.18 | 350 | 8 | 300.4 | 319.1 | 301.5 |
| 741.0 | 2677 | 8.1 | 1.9 | 65 | 5.98 | 320 | 6 | 306.4 | 324.9 | 307.5 |
| 727.0 | 2835 | 7.6 | 1.6 | 66 | 5.94 | 320 | 7 | 307.5 | 326.0 | 308.6 |
| 700.0 | 3146 | 5.2 | 0.3 | 71 | 5.62 | 320 | 10 | 308.2 | 325.8 | 309.3 |
| 685.0 | 3321 | 4.1 | -1.2 | 68 | 5.13 | 330 | 14 | 308.9 | 325.0 | 309.8 |
| 633.0 | 3957 | -0.1 | -6.9 | 60 | 3.63 | 310 | 14 | 311.2 | 322.9 | 311.9 |
| 593.0 | 4483 | -3.5 | -11.5 | 54 | 2.69 | 329 | 15 | 313.1 | 322.0 | 313.6 |
| 585.0 | 4590 | -3.5 | -7.1 | 76 | 3.86 | 333 | 15 | 314.3 | 326.9 | 315.0 |
| 582.0 | 4631 | -3.5 | -7.3 | 75 | 3.82 | 335 | 16 | 314.8 | 327.2 | 315.5 |
| 576.0 | 4713 | -3.5 | -7.7 | 73 | 3.74 | 334 | 16 | 315.7 | 328.0 | 316.4 |
| 506.0 | 5727 | -10.1 | -12.1 | 85 | 3.01 | 325 | 19 | 319.6 | 329.7 | 320.2 |
| 500.0 | 5820 | -10.7 | -12.5 | 87 | 2.94 | 325 | 19 | 319.9 | 329.9 | 320.5 |
| 469.0 | 6309 | -13.7 | -14.7 | 92 | 2.62 | 336 | 20 | 322.1 | 331.1 | 322.6 |
| 447.0 | 6757 | -16.5 | -21.2 | 67 | 1.60 | 347 | 21 | 324.1 | 329.8 | 324.4 |

Рисунок 2.2.1. Данные зондирования атмосферы по Санкт-Петербургу.

Для Санкт-Петербурга (Воейково) идентификатор станции: ULLI, номер станции: 26075, станция расположена по координатам 59,95 северной широты и 30,70 восточной долготы, высота станции над уровнем моря составляет 72 метра.

Имея координаты расположения метеорологической станции, с площадки которой происходит зондирование атмосферы, определим, какое

имеет расположение. Метеорологическая станция для города Санкт-Петербург расположена в поселке Воейково, Всеволожский район Ленинградской области. Пример с исходными данными для Петрозаводска в рис. 2.2.2.

22820 Petrozavodsk Observations at 00Z 01 Sep 2019

| PRES | HGHT | TEMP | DWPT | RELH | MIXR | DRCT | SKNT | THTA | THTE | THTV |
|--------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| hPa | m | C | C | % | g/kg | deg | knot | K | K | K |
| 1005.0 | 110 | 14.8 | 14.1 | 96 | 10.16 | 250 | 6 | 287.5 | 316.0 | 289.3 |
| 1000.0 | 154 | 14.6 | 13.7 | 94 | 9.94 | 260 | 8 | 287.8 | 315.7 | 289.5 |
| 976.0 | 359 | 17.2 | 15.9 | 92 | 11.77 | 294 | 14 | 292.4 | 326.0 | 294.4 |
| 968.0 | 428 | 16.6 | 15.0 | 90 | 11.22 | 305 | 16 | 292.5 | 324.5 | 294.4 |
| 925.0 | 811 | 13.4 | 10.3 | 82 | 8.57 | 315 | 12 | 293.0 | 317.8 | 294.5 |
| 921.0 | 848 | 12.9 | 9.9 | 82 | 8.36 | 315 | 12 | 292.8 | 317.0 | 294.3 |
| 910.0 | 949 | 11.4 | 8.7 | 83 | 7.81 | 308 | 11 | 292.3 | 314.9 | 293.7 |
| 877.0 | 1258 | 11.1 | 5.8 | 70 | 6.64 | 285 | 10 | 295.1 | 314.6 | 296.3 |
| 868.0 | 1345 | 11.0 | 5.0 | 66 | 6.34 | 270 | 9 | 295.9 | 314.6 | 297.0 |
| 856.0 | 1461 | 10.3 | 6.6 | 78 | 7.19 | 250 | 8 | 296.4 | 317.6 | 297.6 |
| 850.0 | 1520 | 10.0 | 7.4 | 84 | 7.65 | 250 | 8 | 296.6 | 319.1 | 298.0 |
| 826.0 | 1759 | 9.4 | -1.6 | 46 | 4.14 | 267 | 10 | 298.4 | 311.0 | 299.2 |
| 773.0 | 2309 | 7.8 | 2.2 | 68 | 5.85 | 305 | 16 | 302.4 | 320.2 | 303.4 |
| 768.0 | 2363 | 7.6 | 2.6 | 71 | 6.04 | 305 | 16 | 302.7 | 321.2 | 303.9 |
| 724.0 | 2848 | 4.0 | 0.6 | 78 | 5.55 | 305 | 16 | 303.9 | 321.0 | 305.0 |
| 717.0 | 2927 | 3.9 | 1.1 | 82 | 5.80 | 305 | 16 | 304.7 | 322.6 | 305.8 |
| 702.0 | 3100 | 3.8 | 2.1 | 89 | 6.38 | 296 | 19 | 306.4 | 326.1 | 307.6 |
| 700.0 | 3123 | 4.2 | 2.5 | 89 | 6.59 | 295 | 19 | 307.1 | 327.5 | 308.3 |
| 680.0 | 3358 | 3.4 | 1.2 | 85 | 6.16 | 285 | 17 | 308.8 | 328.0 | 309.9 |
| 666.0 | 3527 | 2.8 | 0.2 | 83 | 5.86 | 290 | 17 | 309.9 | 328.4 | 311.0 |
| 614.0 | 4176 | -0.7 | -2.6 | 87 | 5.17 | 310 | 17 | 313.2 | 329.7 | 314.2 |
| 597.0 | 4400 | -1.9 | -3.6 | 88 | 4.94 | 295 | 17 | 314.3 | 330.2 | 315.2 |
| 565.0 | 4839 | -4.3 | -5.5 | 91 | 4.52 | 300 | 21 | 316.5 | 331.2 | 317.4 |
| 563.0 | 4867 | -4.5 | -5.7 | 91 | 4.45 | 300 | 21 | 316.5 | 331.0 | 317.4 |
| 547.0 | 5092 | -6.6 | -7.7 | 92 | 3.93 | 315 | 23 | 316.7 | 329.6 | 317.5 |
| 537.0 | 5237 | -7.9 | -9.0 | 92 | 3.62 | 306 | 23 | 316.8 | 328.8 | 317.5 |
| 520.0 | 5486 | -8.3 | -9.3 | 93 | 3.65 | 290 | 21 | 319.2 | 331.4 | 320.0 |
| 504.0 | 5728 | -8.7 | -9.6 | 93 | 3.68 | 298 | 24 | 321.6 | 334.0 | 322.4 |
| 500.0 | 5790 | -9.3 | -10.1 | 94 | 3.57 | 300 | 25 | 321.6 | 333.6 | 322.3 |
| 479.0 | 6119 | -11.9 | -13.0 | 92 | 2.95 | 311 | 23 | 322.4 | 332.5 | 323.0 |
| 455.0 | 6510 | -13.4 | -14.4 | 92 | 2.77 | 325 | 21 | 325.3 | 334.9 | 325.9 |
| 434.0 | 6868 | -14.7 | -15.7 | 92 | 2.61 | 312 | 26 | 328.1 | 337.2 | 328.6 |

Рисунок 2.2.2. Данные зондирования атмосферы по Петрозаводску.

Для города Петрозаводска станция имеет номер: 22820, координаты станции: 61,81 северной широты и 34,26 восточной долготы, высота станции над уровнем моря составляет 110 метров.

По аналогии с Санкт-Петербургом находим расположение метеорологической станции в Петрозаводске. По координатам широты и долготы станция располагается в районе Сулажгора города Петрозаводск.

Так как зондирование проводится два раза в сутки в 00 и 12 часов по UTC, следовательно, в сентябре получаем 60 данных по зондированию атмосферы для каждого города. Взятые данные по каждому сроку помещаем в таблицы Excel, и дальнейшая обработка данных проводится в Excel.

2.3 Интерполяция значений параметров ветра по высотам

Скаченные данные подставленные в Excel для выполнения обработки не имеют общей высоты по результату полученных значений в метрах. Что не позволяет говорить о влиянии рельефа и подстилающей поверхности на направление ветра, так как для анализа следует приравнять эти значения к одной высоте. Приведем результаты зондирования атмосферы к общим значениям высот. В работе рассмотрены значения ветра на высотах от поверхности Земли (высота 0 метров) до высоты в 2 километра (2000 метров). Также выберу равный шаг для интерполирования значений в узел сетки кратный 100 метрам. На каждом шаге получим интерполированные значения направление и скорость ветра. Для выполнения такой работы воспользуемся Макросом для Excel «Сплайн N эталон». После каждого выполнения работы с Макросом данные записываются в таблицу для каждого срока, тем самым получено 21 значение по направлению и скорости ветра для одного срока. После этого нужно подготовить данные для построения графика по направлению ветра.

III Статистический анализ и обработка полученных данных

3.1 Частотное распределение значений направления ветра

Для рассмотрения значений по направлению ветра для обработки данных разделим значения интерполяции по высотам. Построим графики частотного распределения значений направления ветра на высотах: 100, 200, 300, 400, 500 метров над уровнем моря, а также в слоях: от 500 до 1000 метров и от 1000 до 1500 метров. На первых пяти высотах всего 60 значений для каждого города, так как график строится по одному значению зондирования атмосферы в каждый срок. Для графиков, которые построены в слое от 500 до 1000 метров и от 1000 до 1500 метров имеет 360 значений. Связанно это с тем, что в слое учитываются значения на граничных высотах, следовательно, данные для одного срока берутся с 6 высот.

Начнем строительство графиков для города Санкт-Петербург. График для высоты 100 метров представлен на рис. 3.1.1



Рисунок 3.1.1. Повторяемость направления ветра на высоте 100 метров для Санкт-Петербурга.

Для высоты в 100 метров за 60 сроков часто повторяемыми значениями направления ветра является 190° и 230° . Основное направление откуда дул ветер находится в диапазоне от 170° до 240° зафиксировано в 34 сроках на данной высоте.

Для высоты 200 метров построен график на рис. 3.1.2.



Рисунок 3.1.2. Повторяемость направления ветра на высоте 200 метров для Санкт-Петербурга.

Значения на высоте 200 метров имеют основное распределение от 160° до 270°, в таком направлении ветер был 37 сроков. Максимально встречающиеся направление ветра на этой высоте равно 270° – западное направление.

На рис. 3.1.3. представлен график распределения значений направления ветра на высоте 300 метров.



Рисунок 3.1.3. Повторяемость направления ветра на высоте 300 метров для Санкт-Петербурга.

На высоте 300 метров максимально встречающиеся направление ветра 150° , а распределение основного направления от 150° до 310° происходит равномерно и встречается 48 раз. В направлении от 50° да 140° ветер за все сроки был зафиксирован единожды, его направление равно 80° .

На высоте 400 метров график распределения представлен на рис. 3.1.4.



Рисунок 3.1.4. Повторяемость направления ветра на высоте 400 метров для Санкт-Петербурга.

Максимальное количество ветра на высоте 400 метров (6 раз) в направлении 270° , основное направление ветра расположилось в диапазоне от 200° до 330° , зафиксировано такое направление ветра в 41 срок. В диапазоне от 40° до 140° ветер был один раз и имел направление 120° .

На 500 метрах график распределения изображен на рис. 3.1.5.

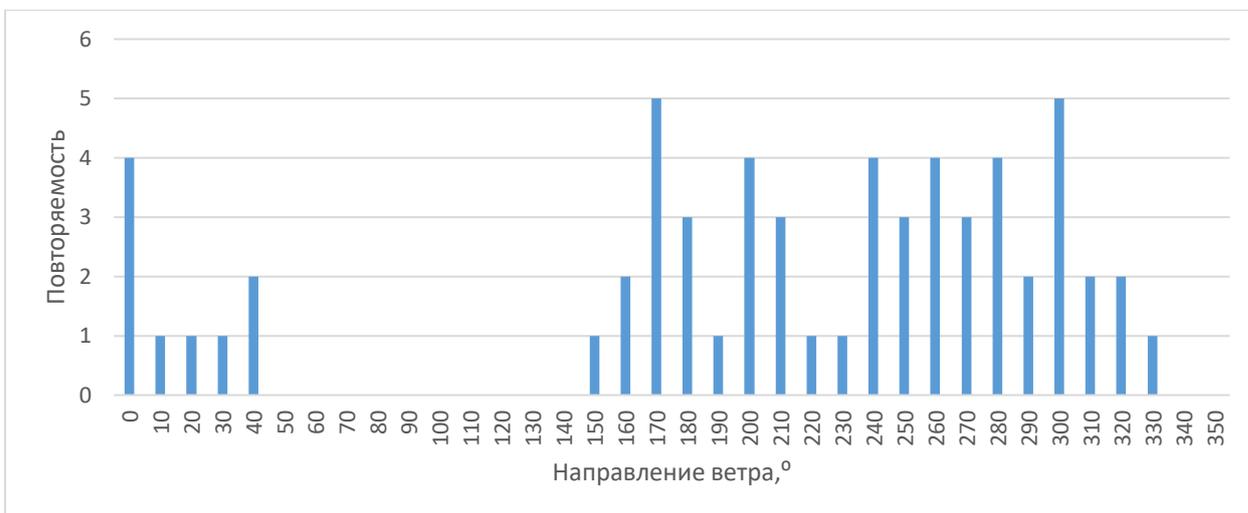


Рисунок 3.1.5. Повторяемость направления ветра на высоте 500 метров для Санкт-Петербурга.

На высоте 500 метров максимальное количество ветра было зафиксировано 5 раз для направлений 170° и 310° , а также между этими значениями встречалось наибольшее количество ветра в сроки измерения 43 раза. Направления от 50° до 140° не зафиксированы.

Для значений в слое от 500 до 1000 график представлен на рис. 3.1.6.



Рисунок 3.1.6. Повторяемость направления ветра в слое 500-1000 метров для Санкт-Петербурга.

В слое от 500 до 1000 метров включительно больше всего повторялось направление ветра 200° , встречалось оно 26 раз. Больше всего направлений

было в диапазоне от 170° до 320°, а в диапазоне от 50° до 150° зафиксировано всего три направления, в которых дул ветер.

Для слоя от 1000 до 1500 метров над уровнем моря график распределения направления ветра в слое изображен на рис.3.1.7.



Рисунок 3.1.7. Повторяемость направления ветра в слое 1000-1500 метров для Санкт-Петербурга.

В слое от 1000 до 1500 метров включительно имеется два преобладающих значения 300° встретилось в слое 28 раз и 200° встретилось 27 раз. Между этими значениями расположена максимальная повторяемость направления ветра.

Аналогичные графики по высотам построим по интерполированным данным зондирования для города Петрозаводск.

График на высоте 100 метров представлен рис. 3.1.8.



Рисунок 3.1.8. Повторяемость направления ветра на высоте 100 метров для Петрозаводска.

На высоте 100 метров максимально встречающееся направление 260° (встречается 10 раз), также в восьми случаях зафиксировано направление ветра 220° . Основное распределение на направления ветра находится между 190° и 280° , в этом диапазоне встречаются 38 сроков.

Для высоты 200 метров график изображен на рис. 3.1.9.



Рисунок 3.1.9. Повторяемость направления ветра на высоте 200 метров для Петрозаводска.

Для высоты 200 метров над уровнем моря максимальное количество зафиксированного направления ветра (5 сроков) для 220° . Также по четыре срока имеют направления ветра: 230° , 270° , 280° , 290° и 300° . Основное

направление для этой высоты располагается от 190° до 310°. Эти направления встречаются с 40 сроках.

На высоте в 300 метров над уровнем моря график изображен на рис. 3.1.10.



Рисунок 3.1.10. Повторяемость направления ветра на высоте 300 метров для Петрозаводска.

Ярко выражены 4 направления ветра (0°, 220°, 230° и 280°) для высоты 300 метров и каждое направление фиксировалось 5 раз. Основное направление лежит в диапазоне от 200° до 320°. Зафиксировано было на 37 сроках по зондированию атмосферы.

На высоте 400 метров график повторяемости представлен на рис. 3.1.11.

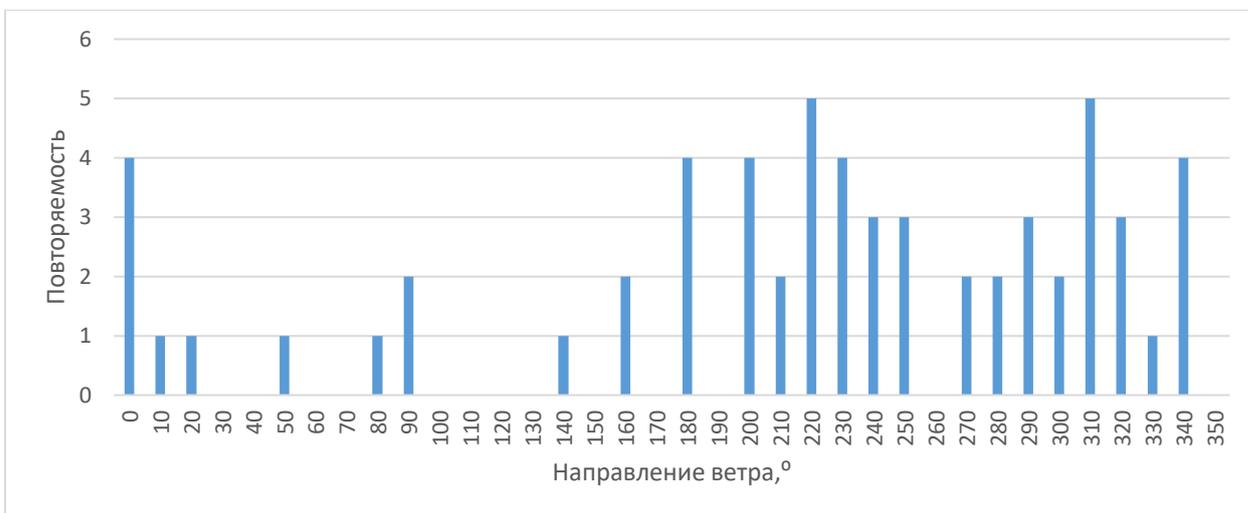


Рисунок 3.1.11. Повторяемость направления ветра на высоте 400 метров для Петрозаводска.

Направление ветра на высоте 400 метров имеет два часто встречаемых значений 220° и 310° , эти направления зафиксированы на пяти сроков, каждый. Основные значения лежат в интервале от 180° до 250° и от 290° до 0° . Наименьшее количество направления ветра расположен в диапазоне от 100° до 150° , было зафиксировано только направление 140° и встречается на одном сроке.

Для высоты 500 метров над уровнем моря график распределения направления ветра представлен на рис. 3.1.12.



Рисунок 3.1.12. Повторяемость направления ветра на высоте 500 метров для Петрозаводска.

На высоте 500 метров над уровнем моря на пяти сроках за месяц были зафиксированы направления ветра: 210°, 220°, 230 и 290°. Основное распределение направлений лежит в диапазонах от 210° до 250° и от 280° до 320°. Минимальное количество направлений ветра имеет интервал от 10° до 150°, на нем были зафиксированы всего 5 сроков.

Для слоя от 500 до 1000 метров включительно график распределения направления ветра изображен на рис. 3.1.13.



Рисунок 3.1.13. Повторяемость направления ветра в слое 500-1000 метров для Петрозаводска.

В слое от 500 до 1000 метров часто встречается направление 310°, фиксировалось 33 раза. Основное распределение значений на графике от 200° до 310°, а наименьшее распределение от 50° до 140°

Для слоя от 1000 до 1500 метров график представлен на рис. 3.1.14.



Рисунок 3.1.14. Повторяемость направления ветра в слое 1000-1500 метров для Петрозаводска.

Для слоя от 1000 до 1500 метров над уровнем моря основное направление 0° , встречалось 40 раз. В интервале от 50° до 140° было направление ветра фиксировалось 3 раза, одно имело направление 50° , а два имело направление 130° . Больше количество встречающихся направлений ветра лежит в диапазоне от 210° до 240° .

3.2 Сравнение роз ветров

По данным частотного распределения значений направления ветра строим розу ветров для каждой заданных высот. Для каждого города будет построено 7 роз ветра по данным зондирования атмосферы. Также построим розы ветров для каждого города на высоте 10 метров над землей. Данные о направлении ветра взяты из архива погоды gr5.ru, частота направлений ветра представлена в процентах.

Для начала представим частотное распределение на лепестковой диаграмме, чтобы визуальнo проанализировать основное направление ветра. Начнем анализ графиков для города Санкт-Петербург.

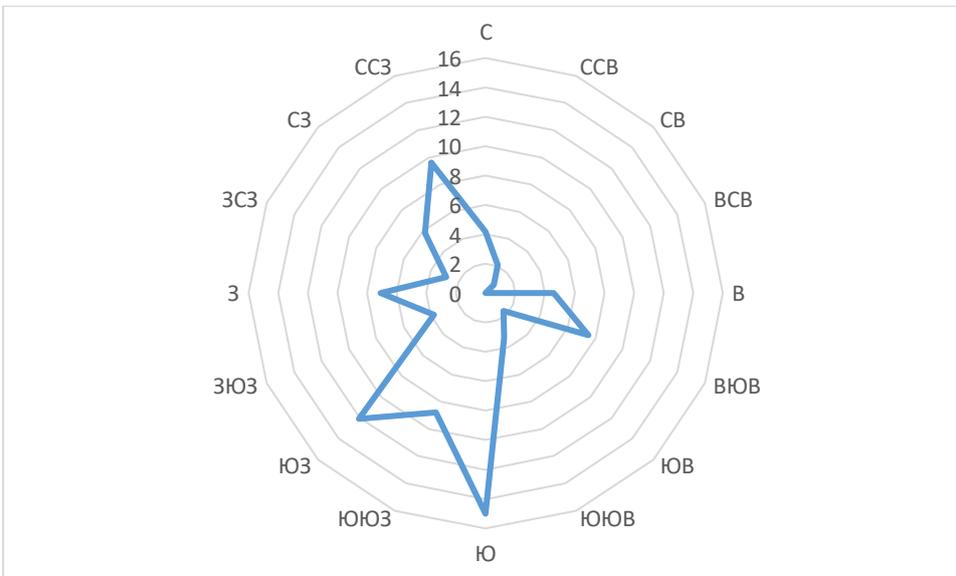


Рисунок 3.2.1. Роза ветров на высоте 10 метров для Санкт-Петербурга.

В Санкт-Петербурге на высоте 10 метров над уровнем земли преобладает южное и юго-западное направление. Слабее основных направлений зафиксирован северо-северо-западный ветер. Реже встречается ветер восточно-юго-восточных, восточных и западных румбов. По данным из архива погоды в 10,8% в городе был зафиксирован штиль.

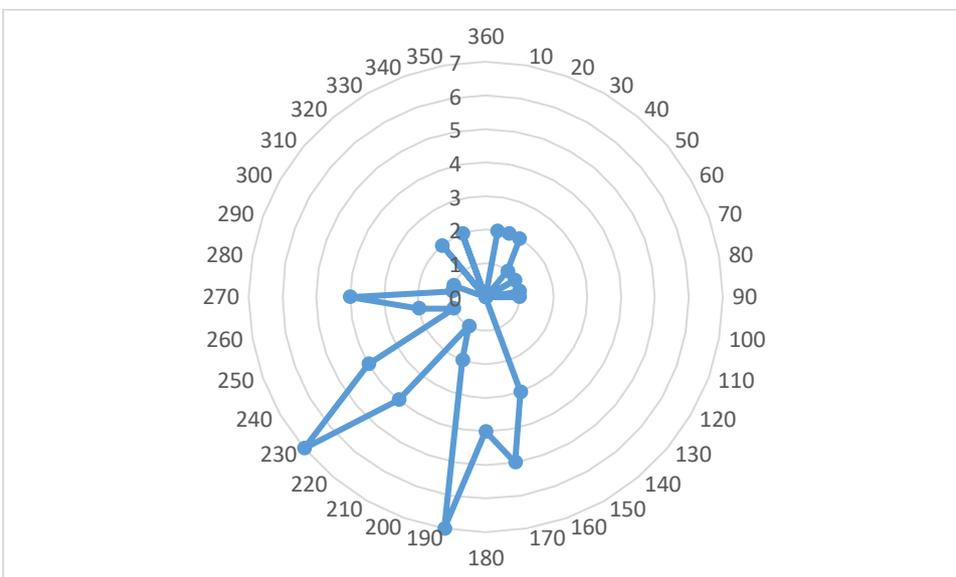


Рисунок 3.2.2. Роза ветров на высоте 100 метров для Санкт-Петербурга.

Для высоты 100 метров можно определить, что основными направлениями является южное и юго-западное. Менее выражено западное направление.

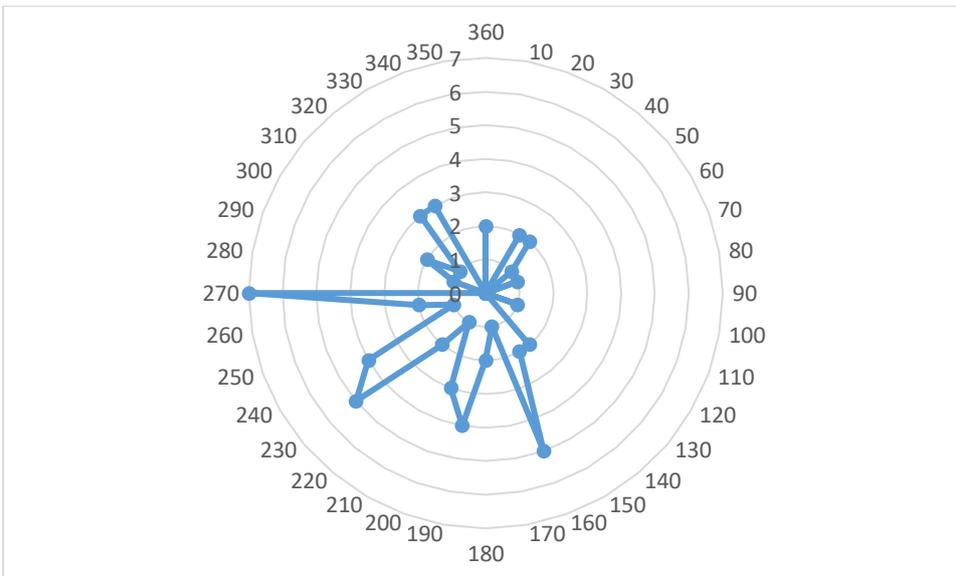


Рисунок 3.2.3. Роза ветров на высоте 200 метров для Санкт-Петербурга.

На высоте 200 метров основным направлением является – западное. Помимо этого, преобладает южное и юго-западное. Еще можно выделить северо-западное направление, которое имеет данные за 6 сроков в месяце.

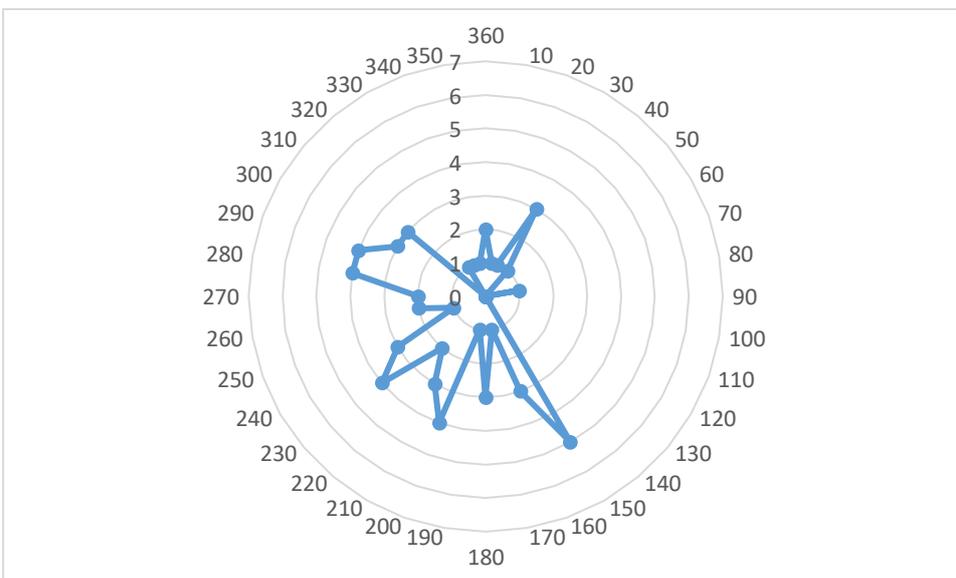


Рисунок 3.2.4. Роза ветров на высоте 300 метров для Санкт-Петербурга.

Основное направление для высоты 300 метров южное от 150° до 200°. Менее выражено юго-западное, западное и северо-западное.

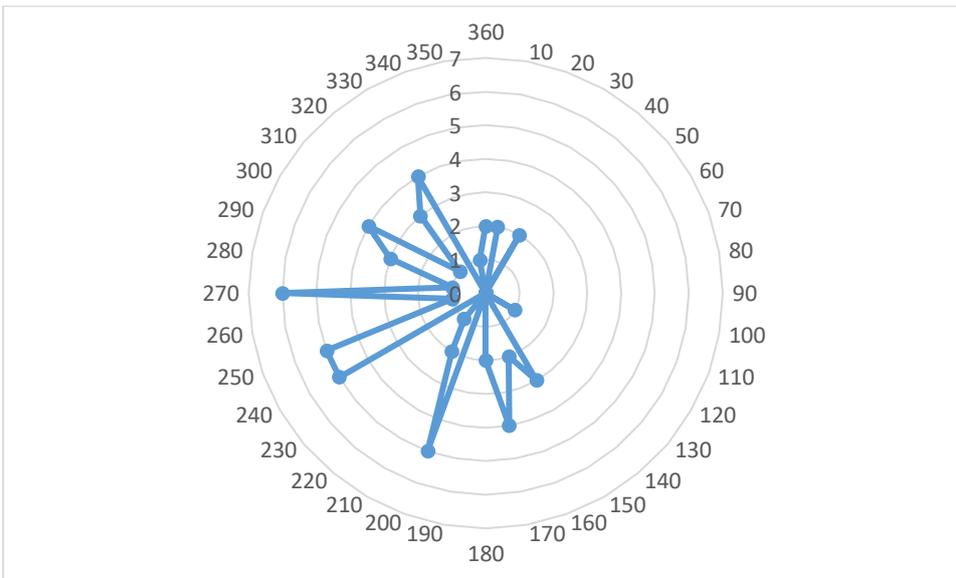


Рисунок 3.2.5. Роза ветров на высоте 400 метров для Санкт-Петербурга.

На высоте 400 метров основные направления западное и южное, они встречаются чаще всего на этой высоте по отношению к другим высотам. Слабее выражаются направления юго-западное и северо-западное направления ветра.

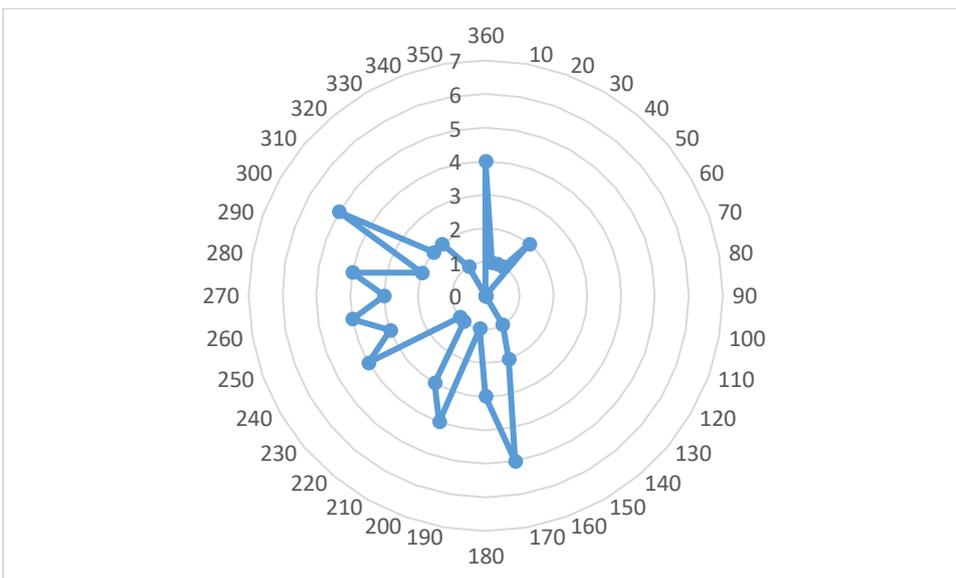


Рисунок 3.2.6. Роза ветров на высоте 500 метров для Санкт-Петербурга.

На высоте 500 метров над уровнем моря южное направление ветра встречается чаще всего. Незначительно меньше южного встречается западное направление ветра. Менее выражены направления северное и северо-западное направления.

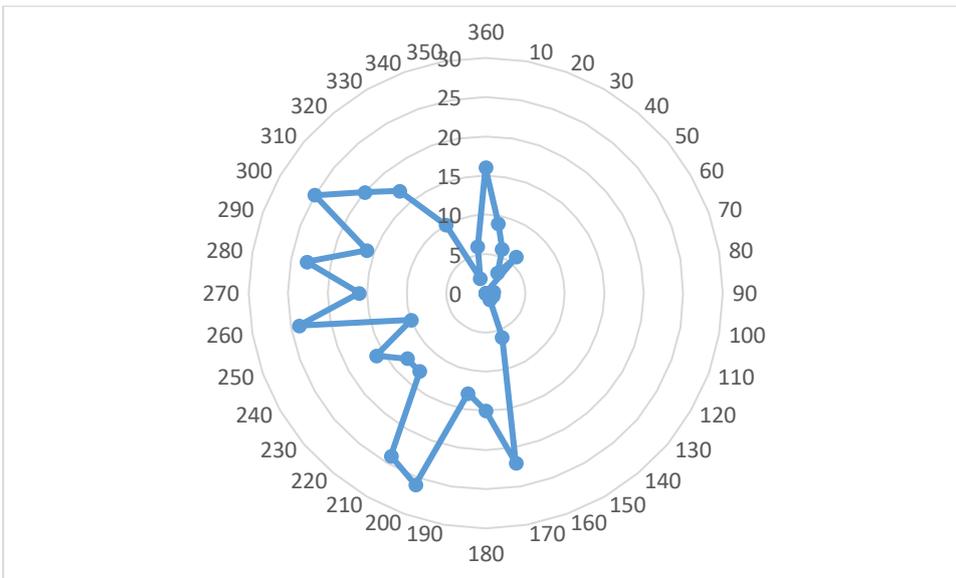


Рисунок 3.2.7. Роза ветров в слое 500-1000 метров для Санкт-Петербурга.

Для слоя от 500 до 1000 метров основное направление ветра является западным. Слабее выражено южное и северо-западное направления ветра. Также слабо, но встречаются северное и юго-западное.

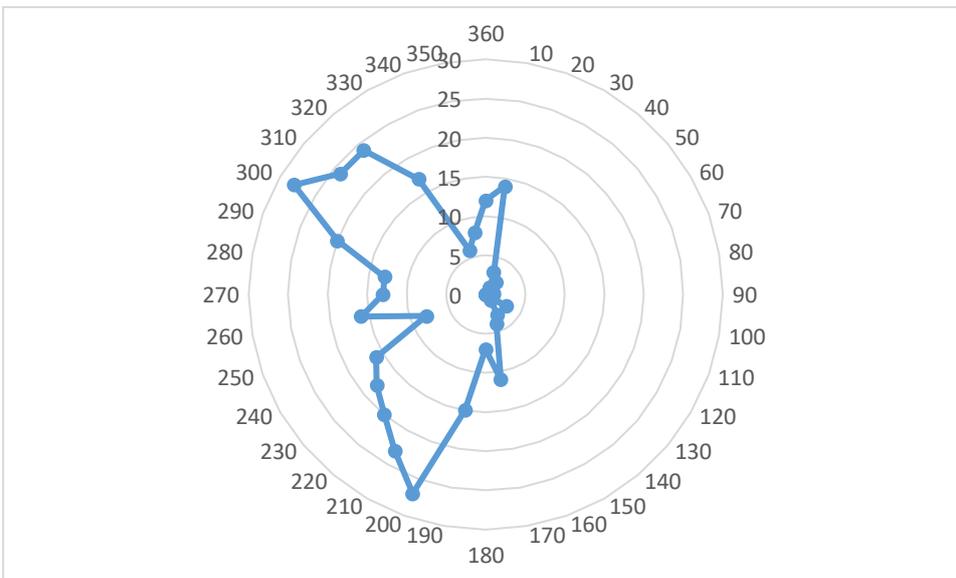


Рисунок 3.2.8. Роза ветров в слое 1000-1500 метров для Санкт-Петербурга.

В слое от 1000 до 1500 метров над уровнем моря основными являются северо-западное и юго-западное направления ветра. Также менее ярко выражены северное, южное и западное направление ветра.

Анализируя каждую розу ветров можно заметить тенденцию смещения направления ветра с высотой по часовой стрелке от южного направления к

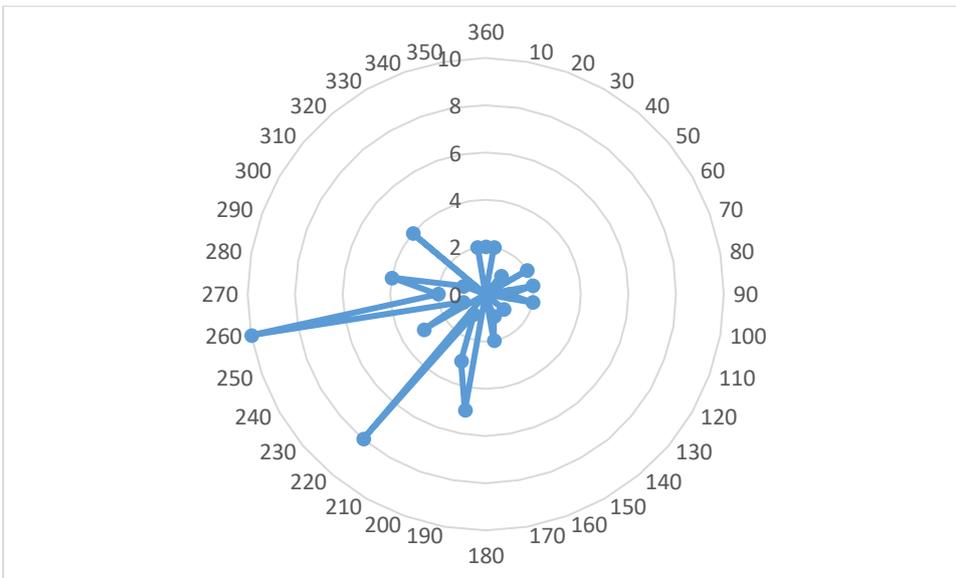


Рисунок 3.2.10. Роза ветров на высоте 100 метров для Петрозаводска.

На высоте 100 метров основное направление ветра – западное. Также преобладает юго-западное направление. И слабо выражены южное и северо-западное направления.

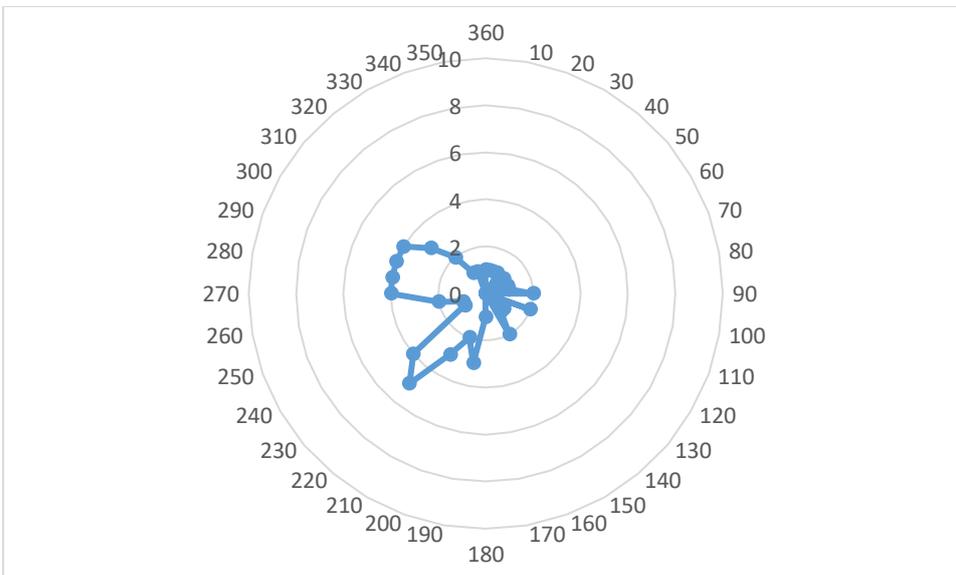


Рисунок 3.2.11. Роза ветров на высоте 200 метров для Петрозаводска.

На уровне 200 метров над уровнем моря основное направление ветра западное от 270° до 300°. Хорошо выражено юго-западное направление. Плохо, но выражено восточное и южное направление ветра.

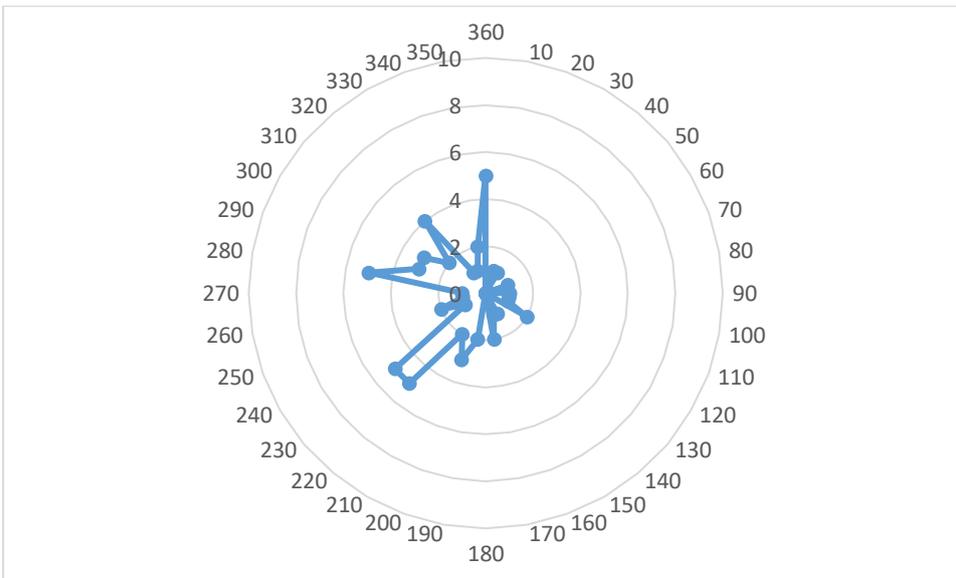


Рисунок 3.2.12. Роза ветров на высоте 300 метров для Петрозаводска.

На 300 метрах основное направление – юго-западное. Слабее выражено западное, северо-западное и северное направления. Гораздо реже встречаются юго-восточное и южное направления, но чаще, чем остальные.

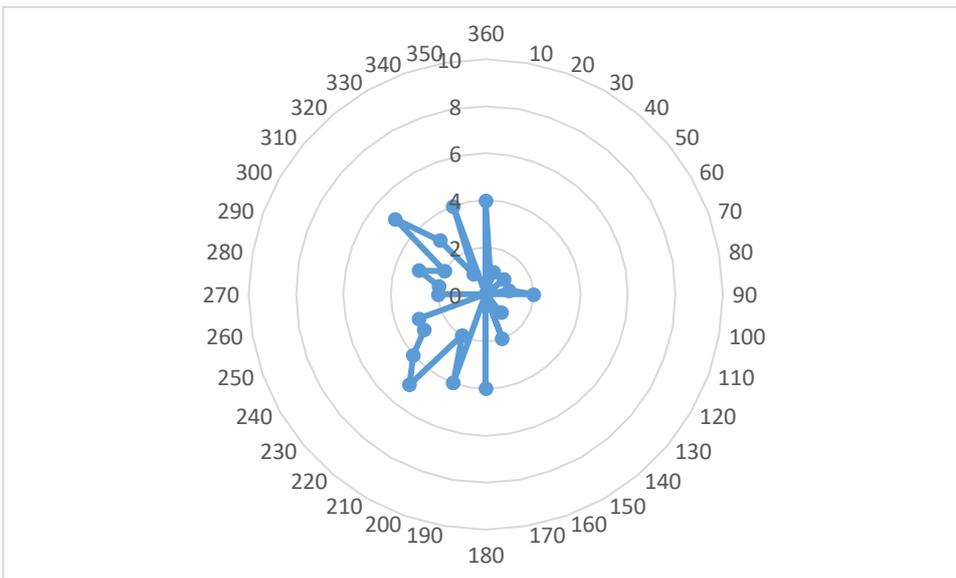


Рисунок 3.2.13. Роза ветров на высоте 400 метров для Петрозаводска.

Ярко выраженного направления на высоте в 400 метров нет, но чаще встречается юго-западное направление. Реже зафиксировано южное, северо-западное и северное направление. Слабее вышеперечисленных встречается западное направление ветра на этой высоте.

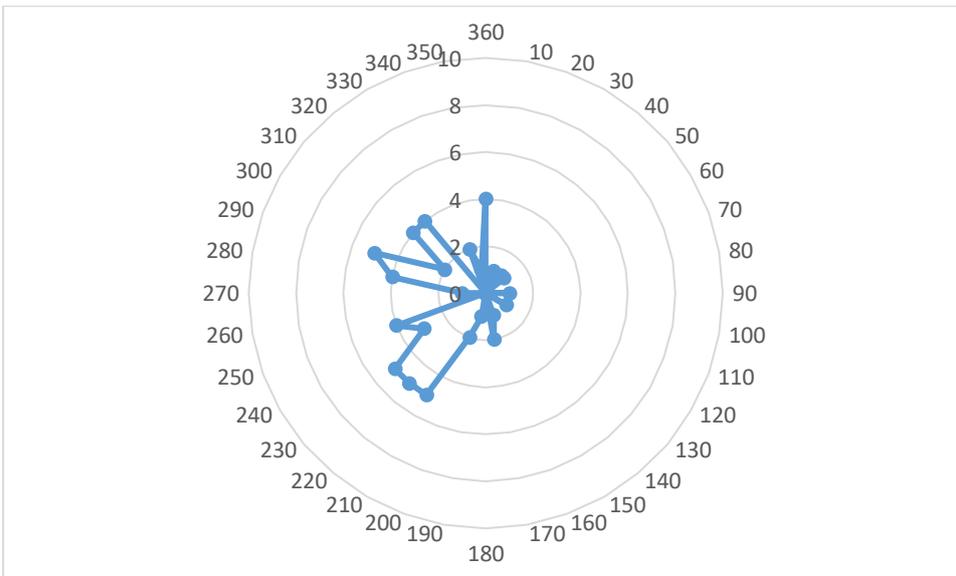


Рисунок 3.2.14. Роза ветров на высоте 500 метров для Петрозаводска.

На высоте в 500 метров над уровнем моря чаще всего встречается юго-западное направление ветра. Слабее выражены направления западное и северо-западное. Реже зафиксировано северное направление ветра.

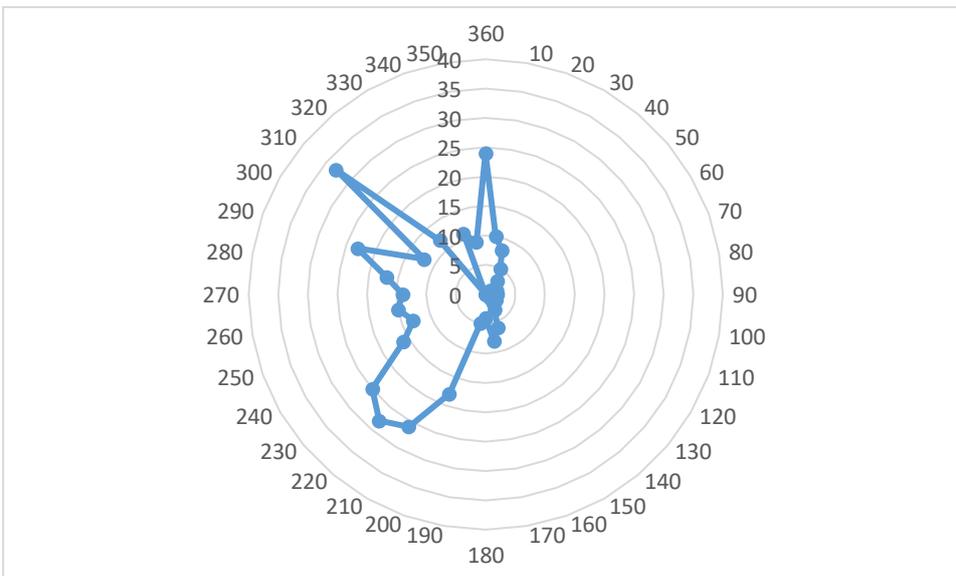


Рисунок 3.2.15. Роза ветров в слое 500-1000 метров для Петрозаводска.

Для слоя от 500 до 1000 метров ярко выражено юго-западное направление ветра. Слабее выражено для северо-западного направления. Редко встречается северное и западное направления. Также слабо выражен южный ветер.

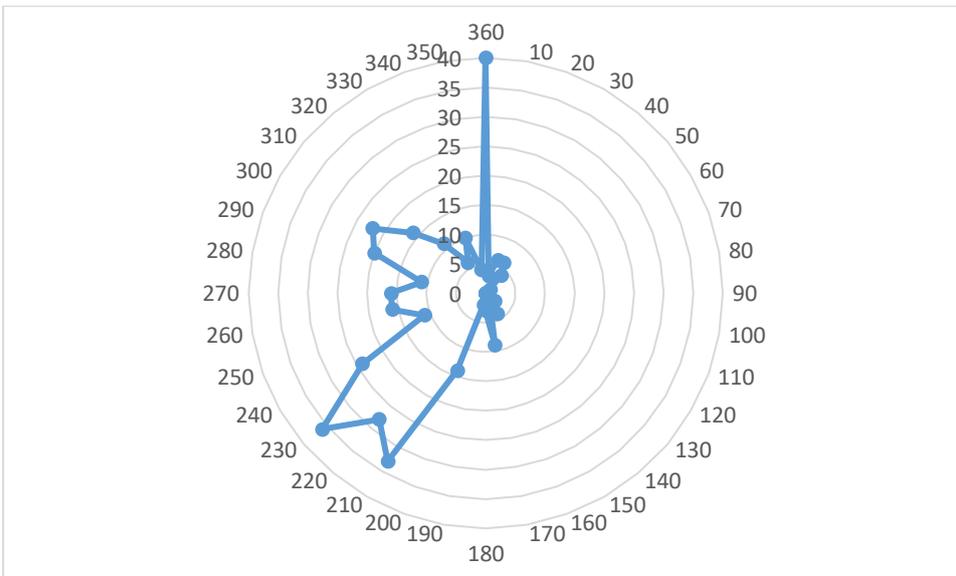


Рисунок 3.2.16. Роза ветров в слое 1000-1500 метров для Петрозаводска.

Для слоя 1000-1500 метров часто зафиксирован юго-западный ветер. Слабее выражены северное и западное направления ветра. Гораздо реже встречаются южное и северо-западное направление ветра зафиксированное в этом слое.

С ростом высоты ветер меняет свое направление с западного ближе и к юго-западному, а также увеличивается количество северо-западного направления ветра по сравнению с западным. С высотой пропадает восточное направление ветра, которое на нижних высотах слабо, но было выражено. И увеличивается с высотой северное направление ветра, по сравнению с нижними высотами.

3.3 Профили значений направления ветра в нижнем слое тропосферы

Построим по интерполированным значениям направления ветра вертикальные профили в слое до 1500 метров над уровнем моря включительно. Строительство графика задействует все 60 сроков измерений для каждого города. Для удобства чтения графиков объединим значения профиля направления ветра по 20 сроков, следовательно, разобьем наши значения по направлению ветра на 10 дней. Для каждого города построим три

графика распределения направления ветра с высотой: с 1 срока (01z00) по 20 срок (10z12), с 21 срока (11z00) по 40 срок (20z12), с 41 срока (21z00) по 60 срок (30z12). Где первое число перед «z» это дата зондирования атмосферы, а число после является временем, когда было выполнено зондирование.

Первоначально построим графики с данными по распределению направления ветра для Санкт-Петербурга. Для чисел с 1 по 10 график представлен на рис 3.3.1.

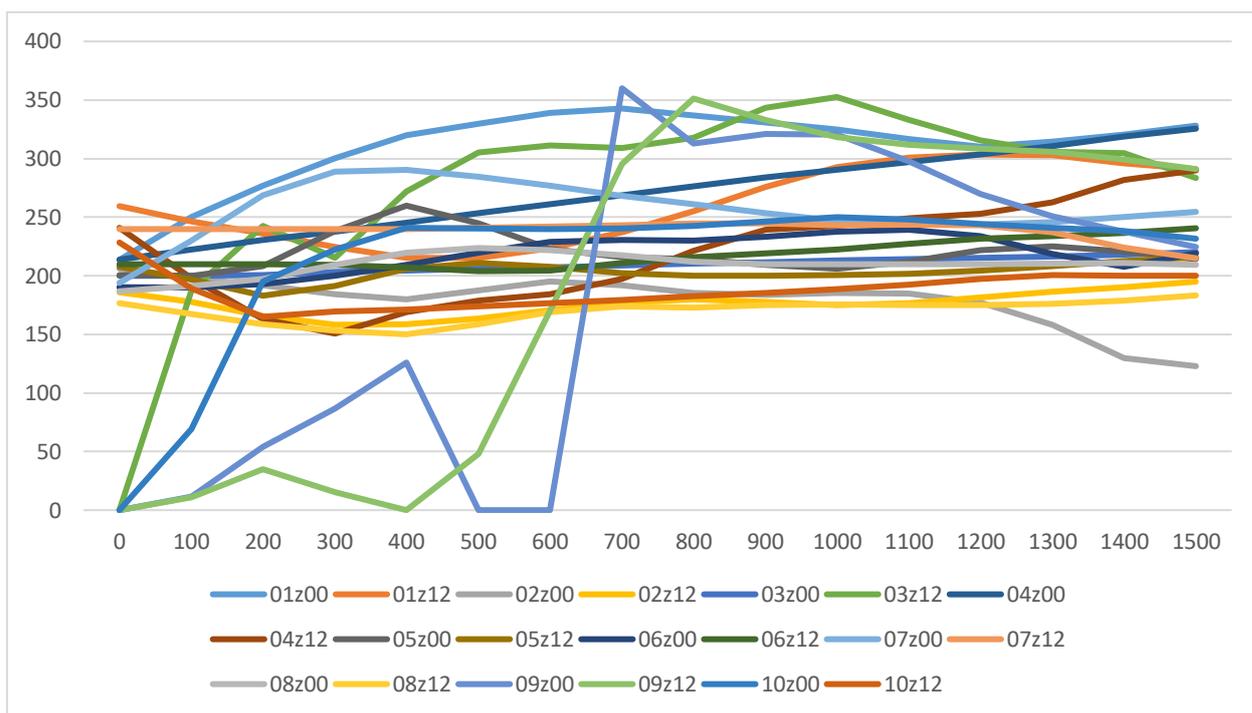


Рисунок 3.3.1. Профиль направления ветра с 1 по 10 число для Санкт-Петербурга.

На графике за первые 20 сроков месяца визуально наблюдается 4 срока, которые сильно отличаются от основного распределения. Значения за сроки 03z12, 09z00, 09z12, 10z00 отличны начиная с малых высот. Также выделяется распределение направления ветра с высотой за срок 01z00. Основное распределение лежит в интервале от 150° до 260° и мало заметно меняют свое направление в этом диапазоне.

Для данных с 11 по 20 число по городу Санкт-Петербург график представлен на рис. 3.3.2.

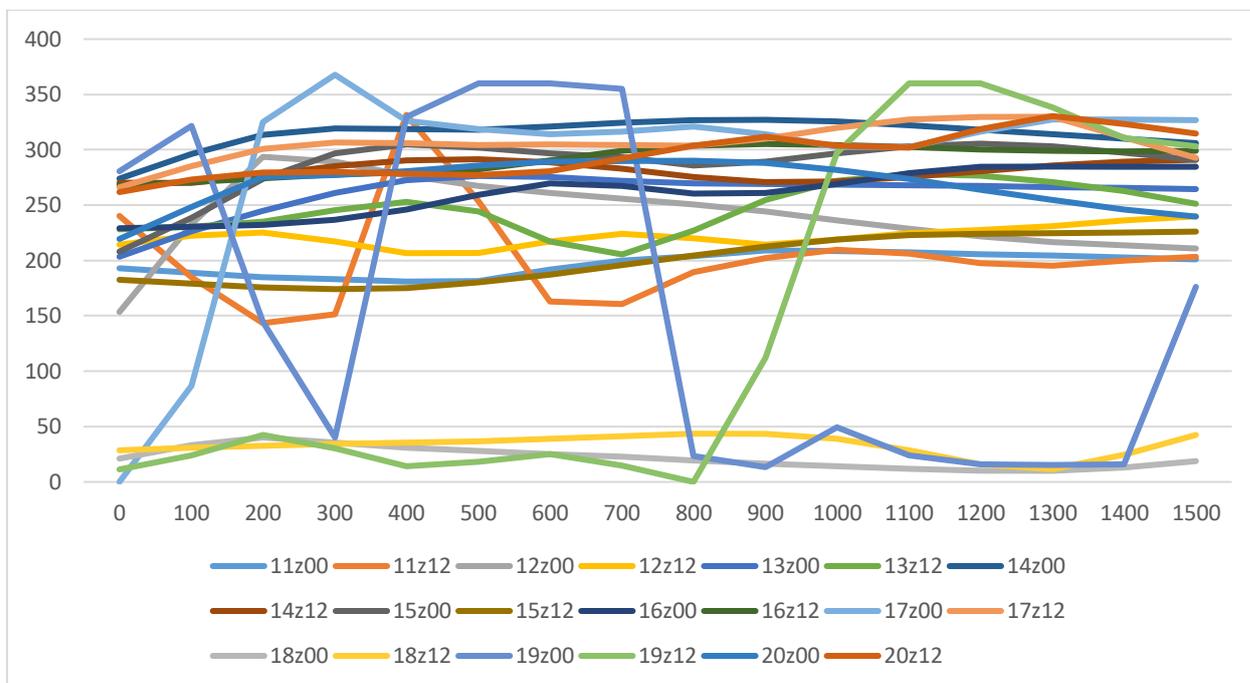


Рисунок 3.3.2. Профиль направления ветра с 11 по 20 число для Санкт-Петербурга.

Во второй части 20 сроков основное распределение графиков направления ветра с высотой располагается в диапазоне от 180° до 320°. Ярко отличные от основного сгущения являются сроки: 17z00, 19z00, 19z12. Также выделяется срок 11z12, расположен в зоне сгущения, но имеет резкий перепад на 170°. Сроки 18z00 и 18z12 имеют схожее распределение направления ветра с высотой, лежат эти два срока в интервале с 20° до 50° и свидетельствует о том, что в эти моменты времени (2 срока) направление ветра было северным и северо-западным под влиянием циклонической активности.

За сроки с 21 по 30 число график по Санкт-Петербургу представлен на рис 3.3.3.

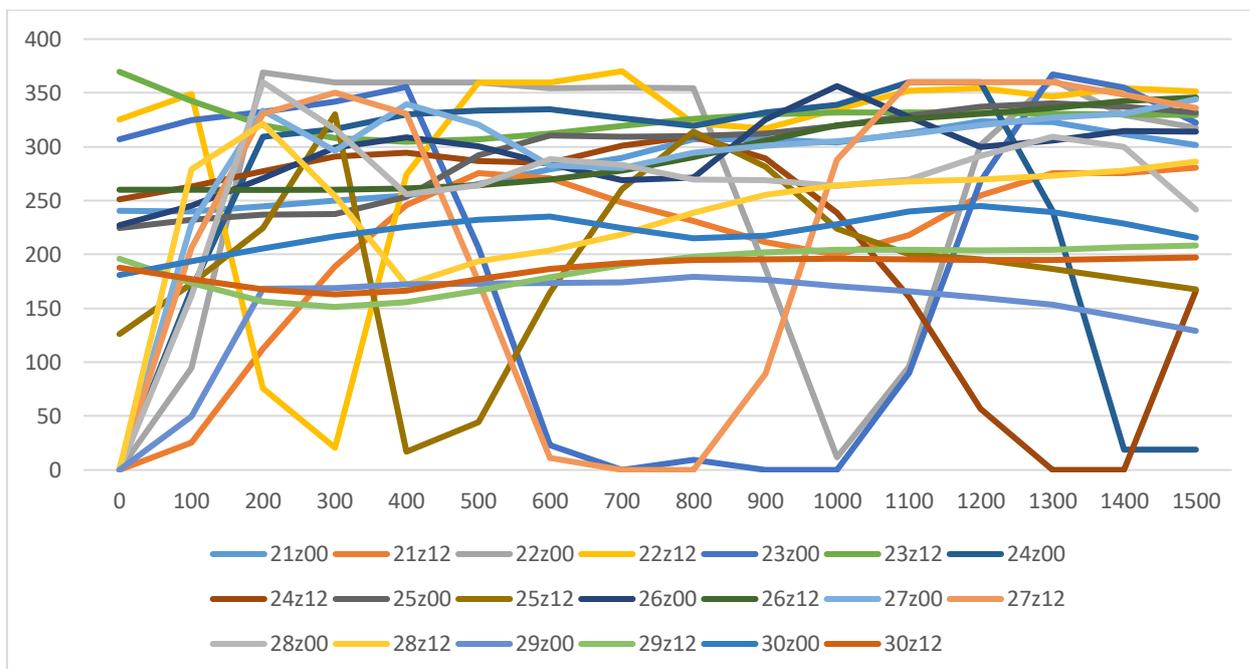


Рисунок 3.3.3. Профиль направления ветра с 21 по 30 число для Санкт-Петербурга.

В период времени с 21 по 30 число присутствовало большое количество распределения направления ветра отличного от сгущения основного распределения и преобладающими в эти сроки является хаотичное распределение. Основное сгущение у поверхности имеет диапазон от 220° до 260° , а ближе к высоте в 1500 метров от 300° до 350° . Ветер с высотой с юго-западного направления перешел к северо-западному. Второе сгущение направления ветра располагается в интервале от 150° до 200° и с высотой почти не меняется его направление. Сильно выраженное отличие имеют сроки: 21z12, 22z00, 22z12, 23z00, 24z00, 24z12, 25z12, 27z12,

Идентично строим для города Петрозаводск, как и для Санкт-Петербурга делим все 60 сроков на три равные части по 10 дней. На рис. 3.3.4. представлен график с 1 по 10 число.

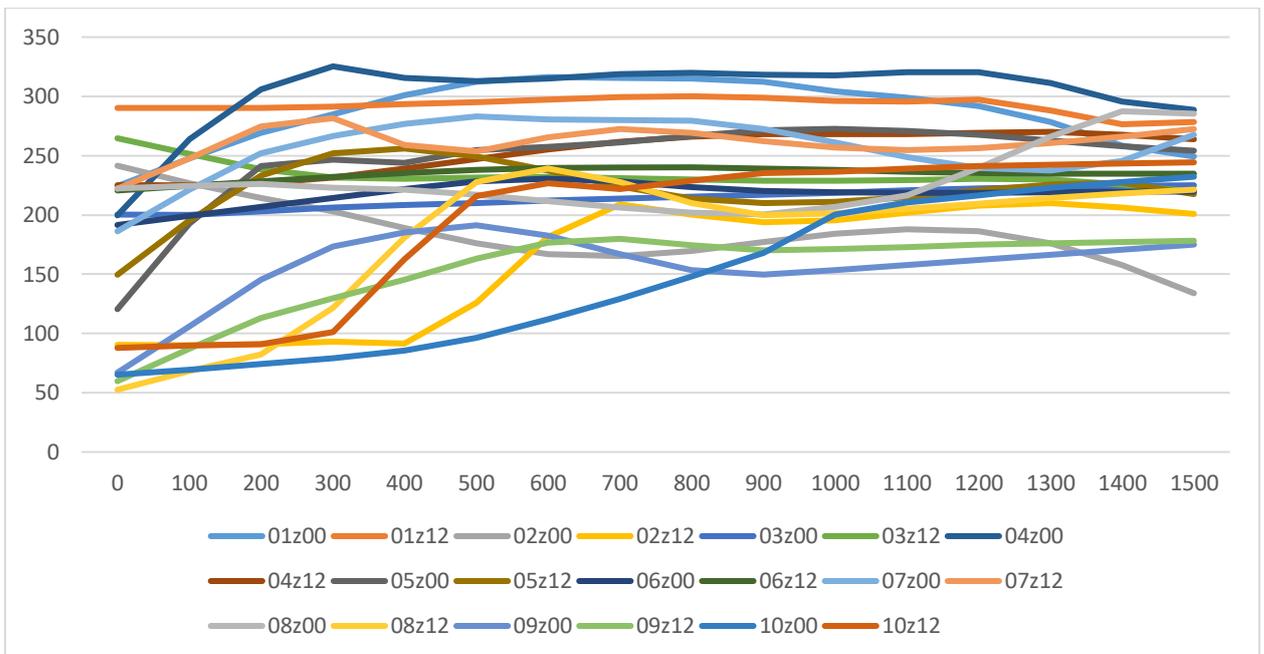


Рисунок 3.3.4. Профиль направления ветра с 1 по 10 число для Петрозаводска.

В сроки с 01z00 по 10z12 основное сгущения направления ветра с высотой располагается в диапазоне от 200° до 280°. Менее отличны от области сгущения являются сроки: 01z12, 04z00, 05z00, 05z12, 07z00 в основном в эти сроки ветер увеличивает свое градусное значение с высотой. Сильное отличие от области сгущения имеют сроки: 02z12, 08z12, 09z00, 09z12, 10z00, 10z12 на нижнем уровне эти сроки имеют восточное направление ветра, а приближаясь к отметке в 1500 метров достигают южного направления.

График за срок с 11 по 20 число представлен на рис 3.3.5.

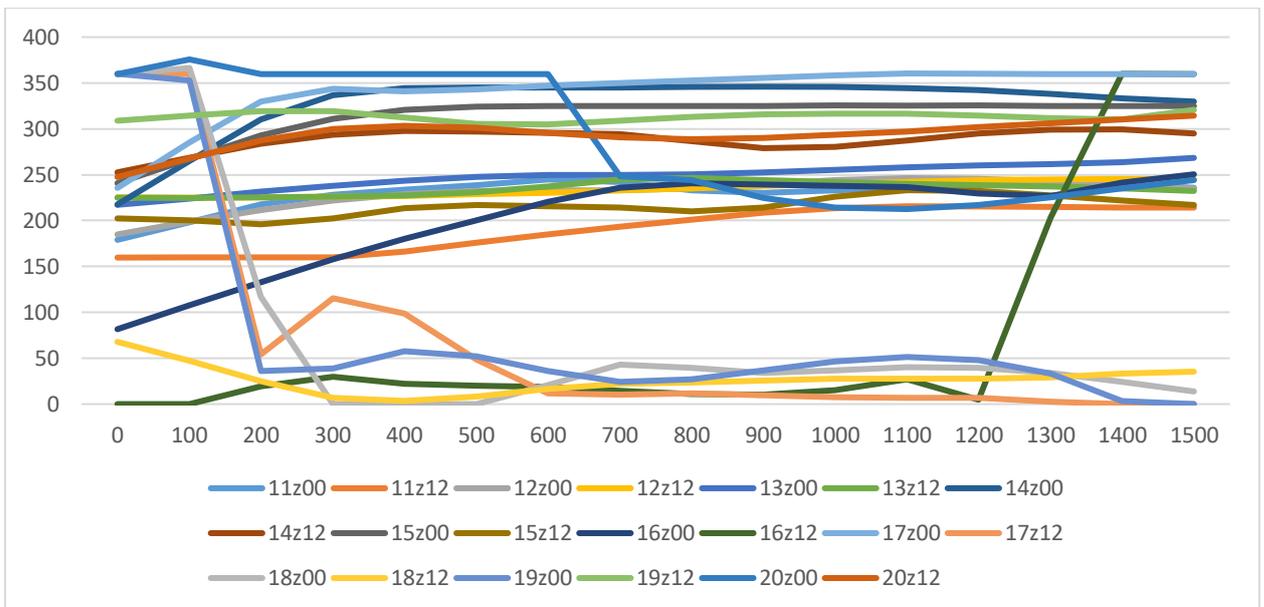


Рисунок 3.3.5. Профиль направления ветра с 11 по 20 число для Петрозаводска.

Во второй 20 сроков имеется две зоны сгущения распределения направления ветра с высотой. Основная зона находится у поверхности с 150° по 230° , а ближе к высоте 1500 метров область сгущения располагается от 210° до 260° . Вторая зона сгущения берет свое начало от 230° до 260° , а на высоте имеет значения от 310° до 360° . Выделяются графики за сроки: 16z12, 17z12, 18z00, 18z12, 19z00 с высотой их направление сгущается в диапазон от 0° до 50° .

На рис. 3.3.6. представлен график для города Петрозаводск с 21 по 30 числа.

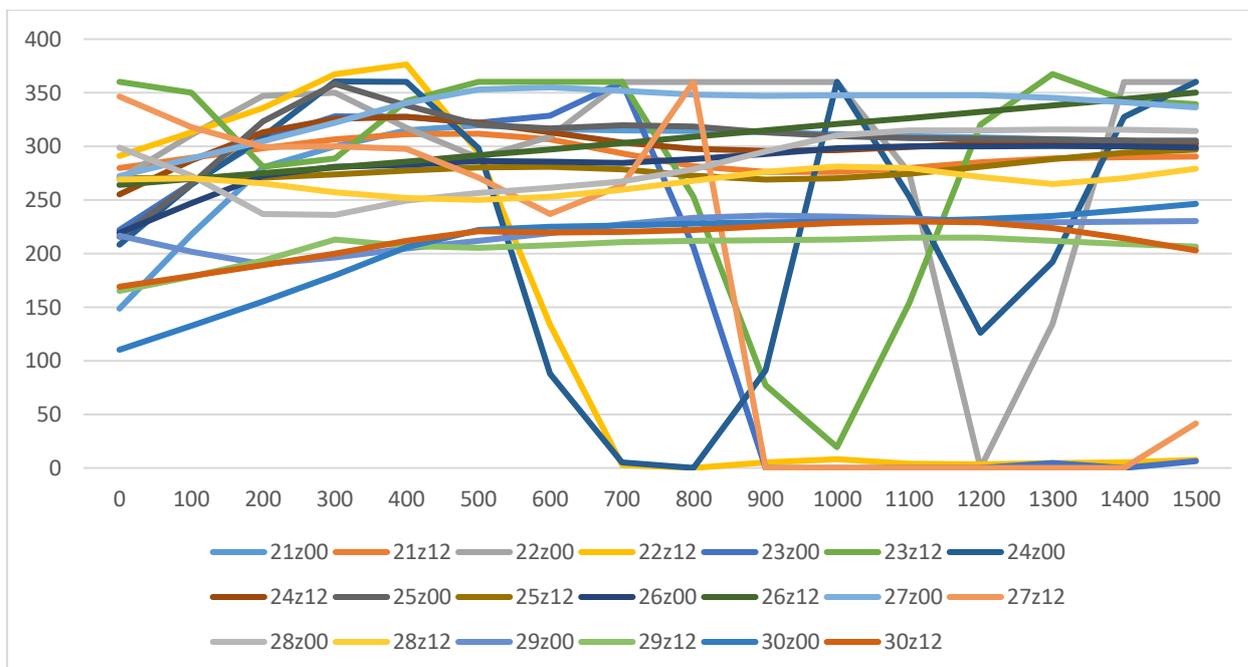


Рисунок 3.3.6. Профиль направления ветра с 21 по 30 число для Петрозаводска.

В последней трети сроков отличны от области сгущения являются сроки: 22z00, 22z12, 23z00, 23z12, 24z00, 27z12. Основная зона сгущения в последние десять дней располагается в диапазоне от 220° до 300° и с высотой от 280° до 360°, то есть происходит поворот с высотой с западного и северо-западного направления на северо-западный и северное направления ветра с ростом высоты.

3.4 Корреляционная матрица значений направления ветра

После построения вертикальных профилей значений направления ветра в слое тропосферы по данным измерений проводим корреляцию. Корреляция проводится для определения в какой срок график изменения направления ветра с высотой будет являться «типичным».

Для этого по имеющимся значениям по направлению ветра за каждый из 60 сроков выполняем в Excel корреляцию на новом листе в книге Excel. После выполнения получаем таблицу корреляции, для удобства меняем название шапки каждого столбца и строки с «Столбец 1» на первый срок 01z00, с

«Столбец 2» на второй срок 01z12 и так далее делаем со всеми последующими столбцами. Значения за один и тот же срок в таблице будут равны 1.

Затем находим и подсчитываем значения коэффициентов корреляции в таблице, которые больше и равны 0,9. Для удобства подсчета количества подходящих значений выделим эти значения красным цветом. Для этого воспользуемся «Условным форматированием» в Excel и зададим условие «Больше 0,9», а затем выделим красным цветом. Далее считаем наши значения, что превышают 0,9 по столбцам, но при этом исключаем 1, которая является значением по одному и тому же сроку. Так как считая по столбцам получаем только связь в последующими сроками, то нам надо посчитать и связь с предыдущими. Чтобы выполнить это мы считаем количество значений по строкам за точно такой же срок, как и значения по столбцам.

По посчитанным значениям, когда коэффициент корреляции больше 0,9, за каждый срок строим гистограмму повторяемости значений для каждого момента времени. Представлен график на рис 3.4.1.

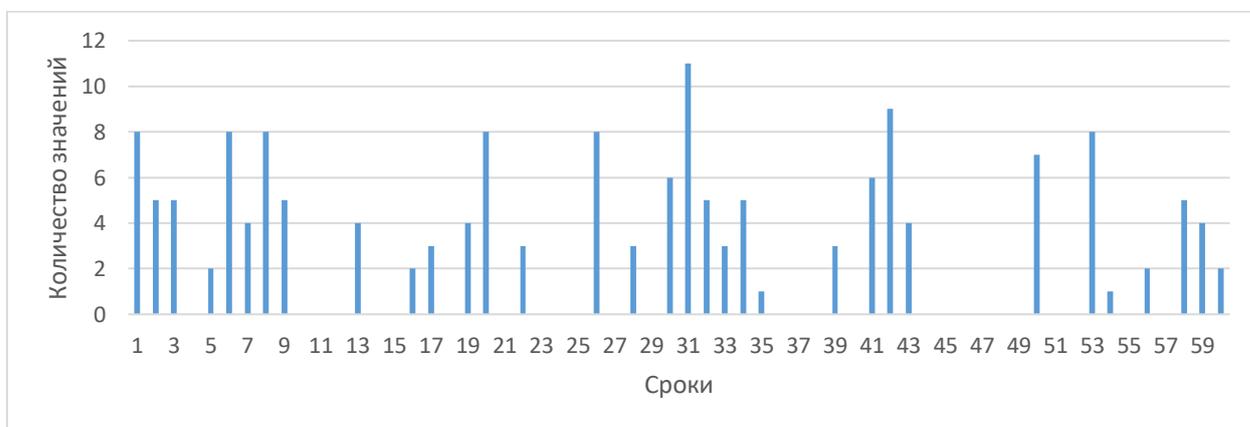


Рисунок 3.4.1. Гистограмма повторяемости значений больше 0,9 для города Санкт-Петербург.

Для Санкт-Петербурга максимально количество значений, что превышают значение 0,9 имеет 31 срок. В этот срок имеется 11 значений. Далее заменяем наш 31 срок, на срок зондирования атмосферы, которым является 16 число измерение в 00 часов (то есть 16z00).

Затем точно такую же работу проделываем для города Петрозаводск, по аналогии с Санкт-Петербургом и строим гистограмму повторяемости для каждого срока. Пример представлен на рис. 3.4.2.

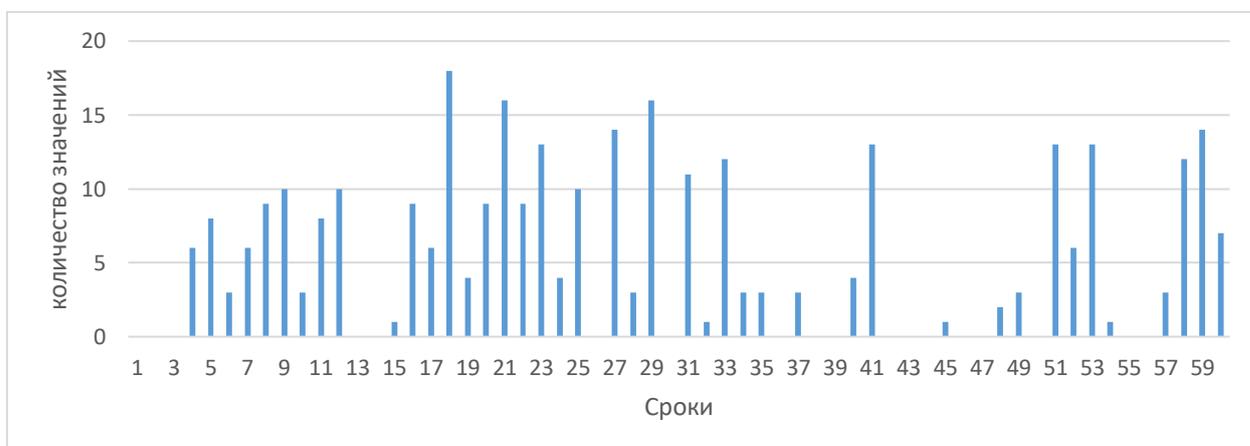


Рисунок 3.4.2. Гистограмма повторяемости значений больше 0,9 для города Петрозаводск.

Максимальное количество зафиксировано в 18 срок и посчитано 18 раз. Переводим наш 18 срок в дату и получаем, что такое количество зафиксировано 9 числа в 12 часов (09z12).

3.5 Определение и аппроксимация «типичного» профиля значений направления ветра

Выявив в какой срок было больше всего коэффициентов корреляции со значением более 0,9 строится график распределения направления ветра с высотой. Именно такое распределение считаем «типичным» профилем значений направлений ветра. Для каждого города строится свой «типичный» профиль. После это проводится аппроксимация каждого графика и строится линия тренда. Выбирается какой будет линия тренда на основе значения R^2 . При какой параметр линии тренда значение будет больше, то по нему и будет построена.

Для города Санкт-Петербург график распределения строится за срок 16z00. Основное распределение ветра с высотой является стандартным для Санкт-Петербурга. Пример профиля представлен на рис. 3.5.1.

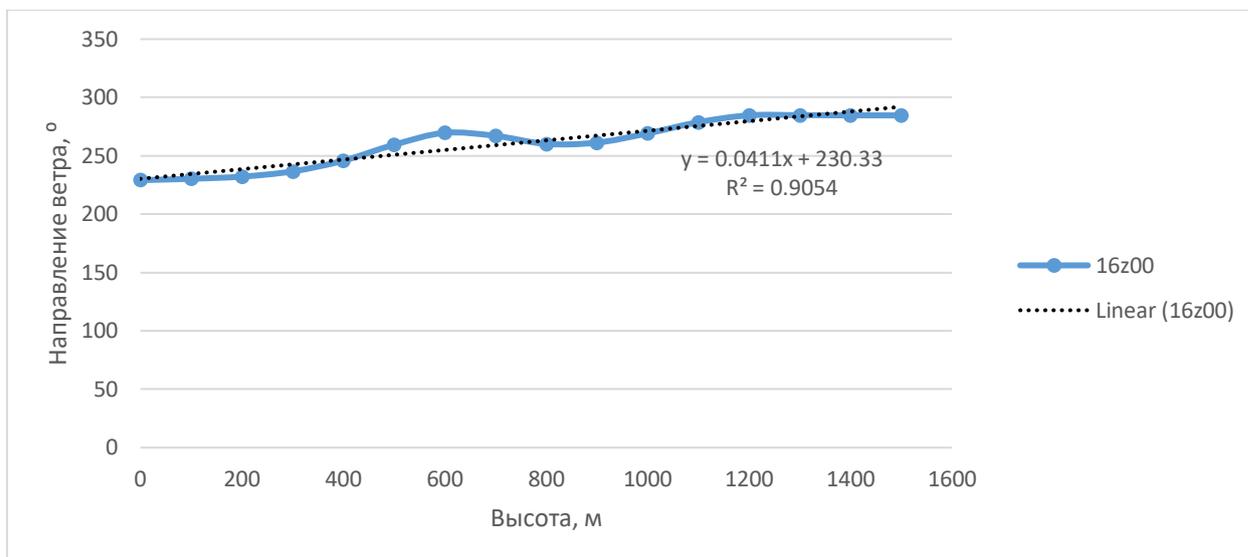


Рисунок 3.5.1. "Типичный" профиль направления ветра для Санкт-Петербурга.

«Типичный» профиль с высотой с юго-западного направления ветра поворачивается с высотой на западное направление. Линия тренда для этого распределения является полиномиальной со второй степенью, так как именно при таком параметре линии тренда значение R^2 является наибольшим и равняется 0,927. Для других параметров линии тренда значение R^2 будет меньше: для экспоненциальной 0,8986; для линейной 0,9054; для логарифмической 0,8652; для степенной 0,8748. Ближе всех к значению полиномиальной является значения линейного параметра линии тренда. Но также хорошо описывает и линейное уравнение, для пограничного слоя атмосферы. Линейное проще для расчета, именно им и будет рассчитываться направление ветра на высотах.

Точно также, как и для Санкт-Петербурга строим «типичный» профиль значения ветра с высотой для города Петрозаводск. График за срок 09z12 не располагается в гуще остальных распределениях графиков с высотой. В следствии чего выбран следующий срок по наибольшему числу связей коэффициентов корреляции. График распределения ветра с высотой является «типичным» для города в срок 11z00. Который будет являться стандартным

для распределения ветра для данного города. Пример такого распределения на рис. 3.5.2.

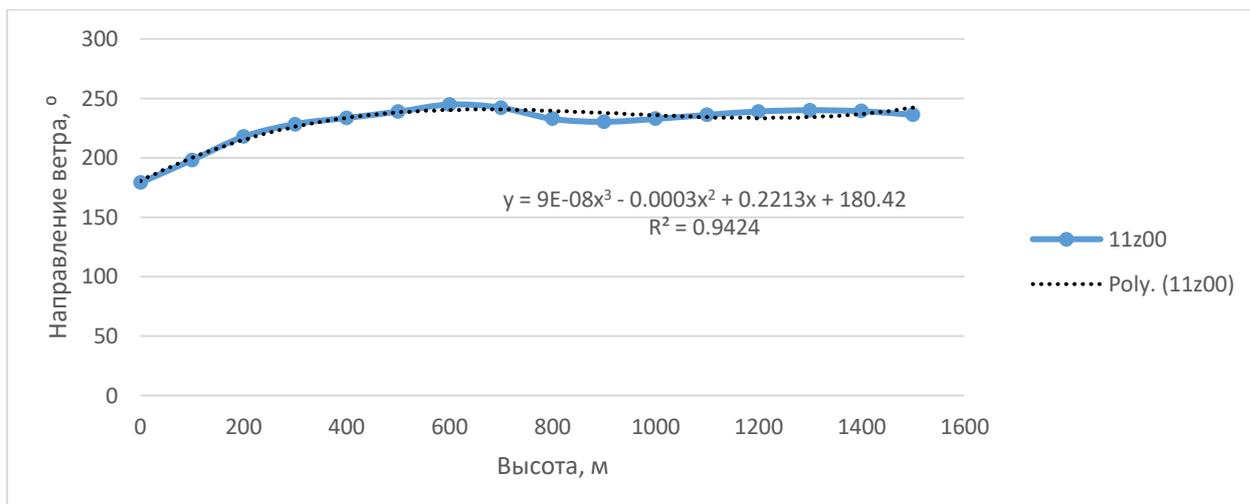


Рисунок 3.5.2. "Типичный" профиль направления ветра для Петрозаводска.

У поверхности земли ветер имеет восточное направление и с высотой его направление меняется на южное. Лучше всего данный график описывает параметр линии тренда полиномиальная с третьей степенью. Значение R^2 для этого параметра равняется 0,9424, третья степень была выбрана, так как вторая степень описывает этот параметр гораздо хуже, при котором значение равняется 0,7754. Хуже всего описывают значение R^2 параметры: экспоненциальный равный 0,4391 и линейный со значением 0,4467. Логарифмическая и степенная не описывают R^2 в следствии чего нельзя оценить не их значимость и построить уравнение.

3.6 Верификация полученных уравнений

Для наилучшего значения R^2 для каждого города описываемый параметр имеет свою функцию. Благодаря этому уравнению можно описать изменение направления ветра с высотой.

Для этих уравнений значение x – высота, на которой нужно получить направление ветра. А значение y – является направлением ветра на высоте x . Следовательно, благодаря этому уравнению можно найти значение

направления ветра на той или иной высоте, которое будет соответствовать «типичному» профилю.

Для Санкт-Петербурга оптимальным является параметр полиномиальной функции второй степени. Функция для «типичного» профиля выглядит следующим образом.

$$y = 0,0411x + 230,33$$

Значение среднее квадратичного отклонения (СКО) для Санкт-Петербурга имеет всего 6,3. Из чего следует, что для описания поворота ветра с высотой уравнение хорошо описывает значение направления ветра в пограничном слое атмосферы.

У Петрозаводска параметр полиномиальной функции третьей степени лучше всего описывает значение R^2 . Для «типичного» распределения направления ветра с высотой имеется уравнение.

$$y = 9 * 10^{-8}x^3 - 0,0003x^2 + 0,2213x + 180,42$$

Для Петрозаводска найденное среднее квадратичное отклонение равняется 33,5. Хорошо и более точно можно высчитать направление ветра до высот равным 500 метрам, далее ошибка будет сильно возрастать с высотой.

3.7 Оценка влияния рельефа на поворот направления ветра

Оценим на сколько рельеф подстилающей поверхности влияет на поворот направления ветра с высотой.

Направление для города Санкт-Петербург на метеостанции в Воейково с высотой уменьшается количество сроков, в которые был зафиксирован восточный и северо-восточный ветер. Ближе к высоте в 400 метров над уровнем моря разнообразие направлений ветра сокращается. Основное направление ветра на этой высоте – юго-западное, часто встречающиеся направления находятся в диапазоне от 150° до 330° через юго-западное направление ветра. На этой высоте и выше в таком диапазоне направление

ветра встречается свыше 80% случаев. На высотах ниже 400 метров северо-восточное и восточное направление ветра встречается чаще, чем на высотах выше. В северо-восточном направлении от метеорологической станции простирается Ладожское озеро. На высотах до 400 метров северное направление ветра фиксируется очень редко, именно в том направлении располагаются Лемболовские высоты. Восточнее южного направления ветра, которое встречается часто, от города Ленинградской области Тосно рельеф к Санкт-Петербургу находится ниже, чем основная высота Балтийско-Ладожского уступа. Основное направление юго-западное, которое приходит к метеорологической станции со склона Ижорской возвышенности к Финскому заливу. На высотах свыше 500 метров основное направление западное или юго-западное. Юго-западное приходит с Ижорской возвышенности, а с западное направление ветра идет с вод Финского залива. Реже встречается северо-западное направление ветра, которое приходит с северного побережья Финского залива, на котором находится юго-западный склон Лемболовской возвышенности. Еще реже фиксируется направление восточнее северного направления ветра. Ветер с которого приходит с западного побережья Ладожского озера.

Проведем теперь оценку для города Петрозаводск. На малых высотах направление ветра южнее западного почти не встречается. На пути этого направления ветра встречается Олонецкая возвышенность, которая в таком направлении имеет точку возвышенности равной 300 метров над уровнем моря. Влияние этой возвышенности и вершины будет иметь влияние на больших высотах. Южное направление встречается очень редко, объясняется это тем, что в этом направлении на возвышенности вершины имеют высоты по удалению от города на юг 154, 189, 210 метров над уровнем моря. Восточное направление на малых высотах приходит из Петрозаводской губы Онежского озера. Приходит этот ветер с воды, так как город растягивается по побережью Петрозаводской губы с северо-запада на юго-восток. Северное

направления ветра фиксируется с высоты в 300 метров над уровнем моря. В это направлении расположен населенный пункт Шуя, который на востоке граничит с озером Логмозеро, а на северо-западе с озерами Укшозеро, Сургубское и Урозеро. Отсутствует северо-восточный ветер, в этом направлении на противоположном берегу Петрозаводской губы находятся вершины с высотой 122, 154, 185 метром над уровнем моря по удалению от города соответственно. На высотах свыше 500 метров преобладает юго-западное направление ветра, именно в этом направлении располагается Олонецкая возвышенность. Следом по частоте является северо-западное направление ветра, которой идет с северного склона Олонецкой возвышенности и параллельно побережью города Петрозаводск. Третьим по частоте встречается северное направление ветра.

Заключение

Результаты влияния рельефа на направление ветра можно получить при зондировании атмосферы. На основе данных уже можно предположить имеется влияние ветра или нет. Из-за силы трения направление ветра может отклоняться в среднем на 30% от основного потока. Также при трении скорость ветра будет гораздо меньше, чем у основного потока, на который поверхность оказывает меньшее влияние.

В исследовании задействованы два населенных пункта: Санкт-Петербург и Петрозаводск. Города находятся на отдалении 300 км, что дает понимание, что города находятся в одной синоптической ситуации. Изучено расположение метеорологических станций, формы рельефа, растительность, наличие близ простирающихся водоемов, основной поток воздушных масс и рельеф городской застройки.

В ходе работы выпалена обработка данных зондирования атмосферы. Проведено интерполирование на высоты кратные 100 метрам для значений направления и скорости ветра. Сделано для удобства и возможности провести исследования влияния рельефа и сравнения значений между населенными пунктами. Построены графики направления ветра на высотах для каждого срока зондирования в двух населенных пунктов.

Посчитана повторяемость направлений ветра кратным 10° для высот 100, 200, 300, 400, 500 метров и в слоях от 500 до 1000 и от 1000 до 1500 метров. По данным повторяемости для каждого населенного пункта построены розы ветров и проведен анализ. Основными потоками для Санкт-Петербурга южные, юго-западные и западные ветра, а также преобладают северо-западное направление ветра. Для города Петрозаводск основное направление ветра юго-западное и западное.

Проведена корреляция для определения количества хорошей (выше 0,9) связи коэффициентов корреляции между сроками. Наибольшее количество

таких связей зафиксировано в Петрозаводске превышает почти в два раза, чем для Санкт-Петербурга. Затем выбраны сроки, в которые количество связей было наибольшим. Следовательно, этот срок является «типичным» распределением направления ветра с высотой. Сделана аппроксимация «типичного» профиля, построена линия тренда для наибольшего коэффициента детерминации и получено уравнение, по которому можно высчитать направление ветра на высоте, затем найдено среднее квадратичное отклонение.

Проведен анализ изменения направления ветра и скорости на малых высотах. По которым можно понять, что влияние рельефа происходило около трети сроков. Когда с резким изменением направлением ветра и дальнейшей нормализацией изменения направления ветра с высотой скорость ветра резко увеличивалась, а затем постепенно и не сильно с набором высоты поднималась.

Список литературы

1. Экологический портал Санкт-Петербурга // infoeco URL: <https://www.infoeco.ru>
2. ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» // meteo.nw URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles> 2.1.1
3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ГОРОДОВ ПО ВСЕМУ МИРУ // climate-data URL: <https://ru.climate-data.org> 2.1.1
4. <https://meteolabs.org> 2.1.1
5. Климат и средняя погода круглый год в Санкт-Петербург // weatherspark URL: <https://ru.weatherspark.com> 2.1.1
6. Погода в Петрозаводске // weatherarchive URL: <https://www.weatherarchive.ru/Pogoda/Petrozavodsk> 2.1.1
7. Архив погоды в Санкт-Петербурге // rp5 URL: <https://rp5.ru> 3.2
8. Воробьев, В.И. Синоптическая метеорология / В. И. Воробьев. — Л.: Гидрометеиздат, 1994. — 716 с.
9. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Л.: Гидрометиздат, 1986. Ч. I. 704 с.
10. Тверской П.Н. Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: Гидрометиздат, 1962. 700 с.
11. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1965. 876 с.
12. Бютнер Э. К- «Динамика приповерхностного слоя воздуха». Л. Гидрометеиздат. 1978 г 144 с.
13. Сарапулова Т.В.- «МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ учебное пособие»
14. Зондирование атмосферы: учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология / М.Ю. Червяков. – Саратов: ИЦ «Наука», 2019. – 62 с.