

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
БАКАЛАВРСКАЯ**

**На тему: «Исследование сдвигов ветра в тропосфере»**

**Исполнитель Ломакин Денис Романович**

**Руководитель Дьяченко Наталья Владимировна**

**«К защите допускаю»**

**Заведующий кафедрой Бобровский Анатолий Петрович**

---

(подпись)

---

(ученая степень, ученое звание)

---

(фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт–Петербург, 2022

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Сдвиги ветра в атмосфере</b> .....	5
1.1 Основные понятия, физика явления .....	5
1.2 Влияние СВ на полёты воздушных судов .....	7
1.2.1 Микропорывы и их опасность.....	9
1.2.2 Системы обнаружения СВ в районе аэропорта.....	12
1.2.3 Бортовое оборудование, предупреждающее о СВ .....	17
1.3 Классификация СВ.....	19
1.4 Метеорологические условия и явления, приводящие к СВ.....	20
<b>Глава 2. Материалы и методы исследования</b> .....	24
2.1 Исходные данные .....	24
2.1.1 База данных аэрологических зондирований на станциях К, С, С.....	25
2.1.2 Аэрологические профили скорости и направления ветра.....	29
2.2 Статистический анализ скорости ветра .....	34
2.3 Получение данных о СВ .....	35
<b>Глава 3. Результаты исследования</b> .....	37
3.1 Распределение СВ по высоте и направлению.....	37
3.2 Повторяемость СВ.....	46
3.3 Статистический и корреляционный анализ вертикальных профилей СВ .....	52
3.5 Оценка турбулентности по СВ .....	53
<b>Заключение</b> .....	58
<b>Список используемой литературы</b> .....	59

## Введение

С точки зрения метеорологии, ветер — это явление, в основе которого лежит взаимодействие воздушных потоков, перемещающихся в зависимости от ситуации, либо от области низкого атмосферного давления к высокому, либо наоборот.

В условиях современного мира крайне важно располагать данными об изменениях в атмосфере, поскольку это имеет прямое отношение к авиации. Ведь малейшее изменение в параметрах ветра может привести к пагубным последствиям, если всё это не контролировать.

Пересечение приземного слоя атмосферы для самолета является самой опасной стадией полета, это связано с ограниченным запасом высоты, скорости и мощности двигателей, в связи с этим, если пилот не обладает данными об изменениях ветра, то своевременно отреагировать на резкие колебания параметров будет затруднительно, что может привести к происшествию, коих за всё время было достаточно.

Отчасти это и являлось в свое время причиной возникновения синоптической метеорологии, в рамках которой было введено понятие сдвига ветра – изменение скорости и направления восходящих и нисходящих воздушных потоков в пространстве. Это явление является самым опасным для авиации.

**Актуальность исследования** обусловлена опасностью явления, даже независимо от наличия информации об параметрах ветра, пилот может вовремя не среагировать, из-за чего будут возникать угрозы безопасности жизни людей, что приводит нас к необходимости дальнейшего исследования этой темы и технического усовершенствования методов, в целях снижения риска до минимального значения.

**Объект исследования:** ветер, а также метеорологические факторы, обуславливающие возникновение ветра.

**Предмет исследования:** вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра, их влияние на полеты самолетов.

**Цель работы:** изучение особенностей метеорологических образований сдвига ветра на основе базы данных аэрологического зондирования для Каргополя, Саратова, Смоленска за апрель 2022 года

В соответствии с целью работы, в работе поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть основные понятия и взаимосвязь различных параметров при возникновении сдвига ветров в атмосфере
2. Проанализировать на каких высотах возникает наиболее опасный сдвиг ветров.
3. На основе корреляционного анализа вертикальных профилей сравнить три станции.
4. Оценить турбулентность по сдвигу ветра.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава: теоретическая база о физико-географических условиях формирования ветра, системах обнаружения СВ в районе аэропортов, оборудовании, предупреждающем об сдвигах.

Вторая глава: содержит материалы и методику исследования, включающую в себя статистический анализ аэрологических профилей.

В третьей главе будут представлены результаты исследования.

# Глава 1. Сдвиги ветра в атмосфере

## 1.1 Основные понятия, физика явления

Ключевое понятие, вокруг которого построена работа, это сдвиг ветра, который мы будем рассматривать на малых высотах, а именно в пределах нижнего слоя атмосферы – тропосферы. Это нижняя часть атмосферы Земли, где температура падает с высотой в среднем на 6 градусов Цельсия на 1 километр (Не учитывая инверсию температуры), сверху слой ограничен тропопаузой. 70% массы атмосферы как раз-таки и сосредоточено в этом слое, из-за чего он является наиболее простым и интересным для исследований. Все частицы в этом слое находятся в движении, что и определяет климат и погоду на Земле.

Затрагивая понятие сдвига ветра, наиболее общим определением является “изменение скорости и направления нисходящих и восходящих потоков ветра в пространстве”. То есть любое явление в атмосфере, или банально физическое препятствие на пути у воздушных потоков может являться причиной сдвига.

Как бы то ни было, сдвиг ветра хоть и является негативным явлением для авиации, изменение параметров которого нужно отслеживать во избежание аварий, но в атмосфере он присутствует всегда, например, слои облачности, которые движутся в разные направления, шлейфы дыма, взвешенные вращающиеся частицы или те же капельки воды в пылевых вихрях и водяных штормах, торнадо, смерчах. Все эти видимые человеческому глазу эффекты свидетельствуют о присутствии сдвига ветра в атмосфере.

Не стоит забывать о трёхмерной направленности движения ветра, то есть обладая скоростью и направлением мы рассматриваем его как вектор, относительно земли это означает следующее: север – юг, восток – запад. На практике обычно вектор берут относительно траектории полета самолета, что

меняет составляющие направления, например, ветер может быть попутным/встречным, боковым, нисходящих/восходящим.

Как и говорилось ранее, самый важный для исследований приземный слой доходит до высоты 500 метров, он связан с приземлениями и взлетами воздушных судов. Происходит это у самолетов, как правило, против ветра. И в этом случае, встречный поток преобладает над боковым, этим и объясняется важность исследования именно этого потока, за исключением случаев, когда преобладает вертикальный сдвиг.

Когда мы рассуждаем о сдвиге, то всегда идет речь об изменении среднего ветра в траектории от одной точки пространства к другой. Эти кратковременные изменения принято называть отклонением от преобладающего ветра. Это своего рода завихрения, то есть имеют кратковременный характер и поскольку по масштабу они куда меньше самолетов, их влияние проявляется сугубо в виде болтанок, или турбулентностей. Исходя из этого, масштабы воздействия сдвига ветров относительно размеров самолета играют ключевую роль. Стоит уточнить что сдвиг ветра не обязательно должен включать турбулентность, даже если он является крупномасштабным. Критерии болтанки, посредством которых мы будем оценивать наличие турбулентности, будут рассмотрены в главе 3.

Оценивая величину СВ (Сдвига ветра), учитывают разность между векторами в двух конкретных точках, для вертикального сдвига они расположены на разных высотах, для горизонтальной составляющей, вдоль одной барической ступени. Расчёт может быть выполнен графически через треугольник скоростей, либо путем вычитания составляющих векторов вручную, при помощи тригонометрических методов. Нельзя рассчитать СВ в виде обычного скалярного вычитания, за исключением редких случаев, когда некоторые направления идентичны по направлению, либо противоположены. Еще одна из причин, это занижение фактической величины сдвига ветра, которое априори происходит если не учитывать вектор направления.

## 1.2 Влияние СВ на полёты воздушных судов

Чтобы более четко понимать, какое влияние оказывает сдвиг ветра на полёт, рассмотрим силы, действующие на судно в атмосфере без учёта сдвига ветра. Также под каждым графиком запишем формулы, с помощью которых находят эти силы.

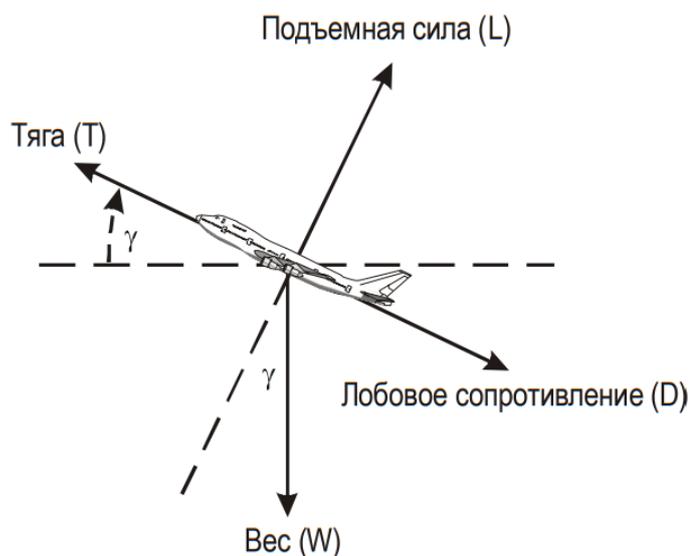


Рис. 1.1. Силы, действующие на судно в воздухе, при наборе высоты

$$T = D + W \sin \gamma , \quad (1)$$

$$L = W \cos \gamma , \quad (2)$$

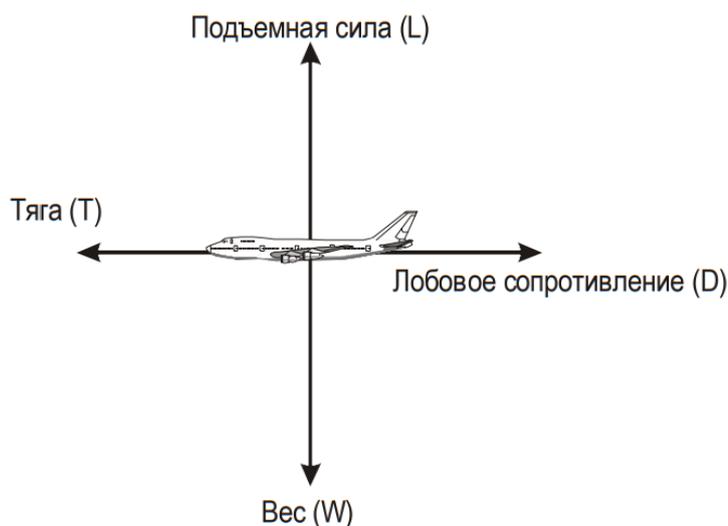


Рис. 1.2. Силы, действующие на судно в воздухе, при горизонтальном полёте.

$$T = D , \quad (3)$$

$$L = W , \quad (4)$$

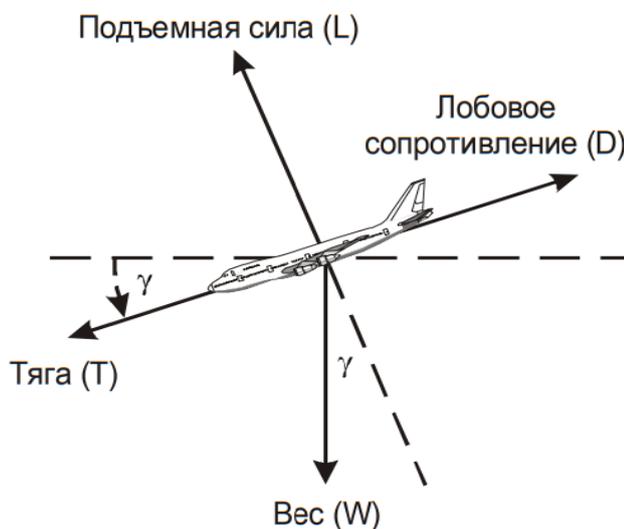


Рис. 1.3. Силы, действующие на судно в воздухе, при снижении.

$$T + W \sin \gamma = D , \quad (5)$$

$$L = W \cos \gamma , \quad (6)$$

Среди которых: тяга ( $T$ ), которая обеспечивается двигателями, вес самолета ( $W$ ), подъемная сила ( $L$ ), обеспечиваемая в основном крыльями и его плоскостями, и также лобовое сопротивление ( $D$ ). Как правило, предполагается сонаправленность тяги с направлением полёта, это является упрощением, оно не сильно влияет на результаты. Если все силы взаимно уравновешены, то по 2 закону Ньютона, воздушное судно будет сохранять свое состояние, пока равновесие не будет нарушено.

Согласно этим формулам, мы получаем следующие выводы: при горизонтальном полёте сопротивление уравновешивается тягой, а вес самолета – его подъемными силами. При вертикальном взлете требуется больше тяги на величину прямо пропорциональную углу набора высоты.

Если равновесие будет нарушено, то в соответствии с ситуацией, будет задана некая результирующая сила, из-за которой судно начнет движение с ускорением в сторону действия этой силы, до тех пор, пока не будет

достигнуто равновесие сил. То есть, сдвиг провоцирует изменение траектории полета, и чтобы вернуться на изначальный маршрут, необходимо вмешательство пилота. Охарактеризуем эти кратковременные изменения в траектории полёта ниже.

1) В случае кратковременного уменьшения скорости встречного воздушного потока, результирующий вектор траектории самолета будет направлен ниже. К примеру, это сильно заметно при приземлении, когда при постоянной тяги самолета, резкий сдвиг ветра сильно меняет результирующий вектор, и в случае если запас высоты недостаточно высок, может произойти авария.

2) Если происходит СВ в сторону усиления встречного ветра (или ослабления попутного, такой вариант идентичен), то результирующий вектор будет направлен выше траектории движения.

Вкратце упомянем и влияние СВ на угол атаки. Угол атаки – это угол между хордой крыла (продольной осью) и направлением скорости встречного потока ветра. Рассматривая влияние СВ на изменение направления, можно провести параллель при рассуждении об нисходящем потоке, который оказывает на судно влияние схожее с ослабленным встречным ветром. Однако различие состоит в том, что воздействие нисходящего/восходящих потоков связано с временным изменением угла атаки, в то время как воздействие встречного/попутного ветра связано с изменением скорости.

### **1.2.1 Микропорывы и их опасность**

В природе существует такое явление как микропорыв, внутри него рождаются опасные формы сдвига ветра. Он представляет из себя небольшой столб исключительно интенсивного и локализовано опускающегося к земле воздуха (так называемый «нисходящий поток») и при соприкосновении с земной поверхностью расходится наружу во всех направлениях, образуя

кольцевой вихрь. Он способен производить мощные ветра вблизи уровня земли.

Микропорывы бывают либо сухими (т. е. дождевые капли достигают земли в небольшом количестве или совсем не доходят до земли), либо влажными (во время ливня). Обычно они образуются под грозами и, в частности, кучево-дождевыми облаками или рядом с ними.

Радиальная форма означает что ветра имеют различные направления в пределах небольшой площади и, следовательно, наблюдается значительный сдвиг ветра в приземном слое атмосферы.

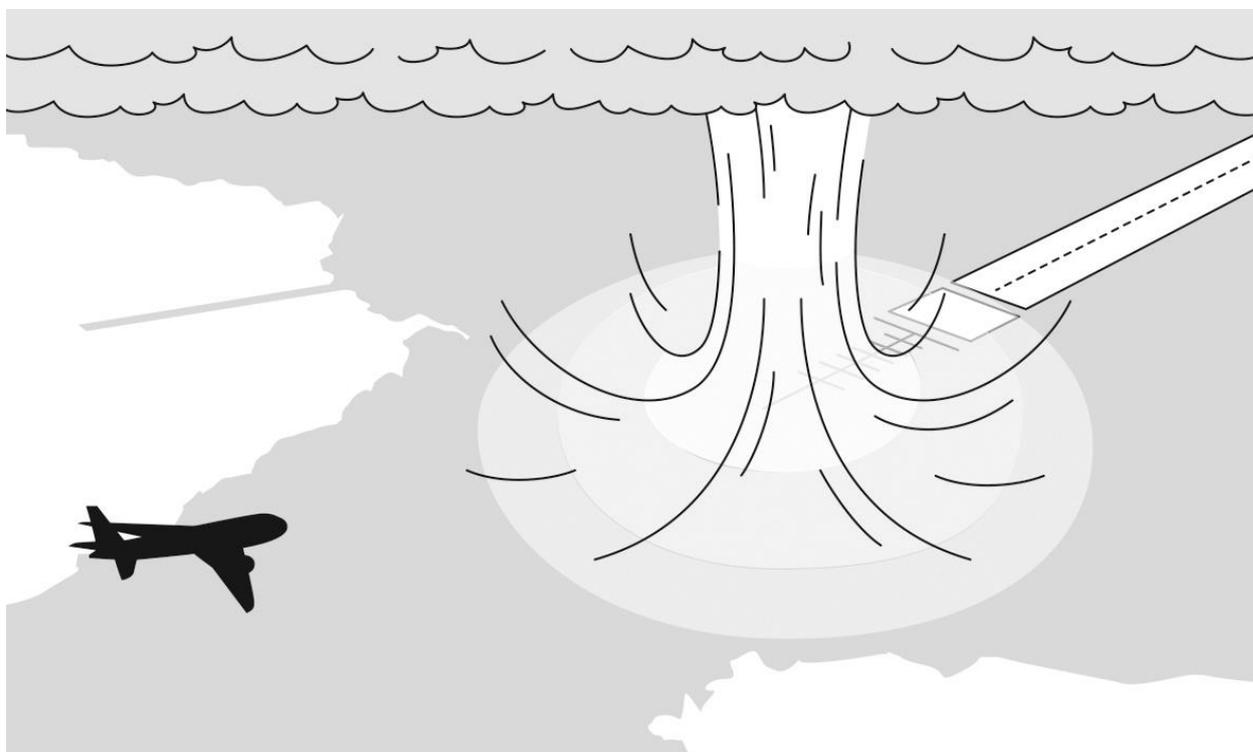


Рис. 1.4 Микропорыв, вызванный кучево-дождевым облаком, иллюстрация.

Характеристики микропорывов:

- 1) Размер: Занимает площадь менее 2,5 морских миль в диаметре.
- 2) Интенсивность: скорость нисходящего потока составляет около 40 узлов (20 метров в секунду), скорость горизонтального ветра от 45 до 100 узлов.
- 3) Продолжительность: примерно 15 минут.

4) Визуальные признаки: часто ассоциируются с сильными грозами, сопровождающимися проливным дождем.

С точки зрения безопасности микропорывы представляют угрозу для воздушных судов из-за масштаба и внезапности этого явления. Микропорывы сочетают в себе две различные угрозы безопасности:

- Нисходящий поток, который быстро толкает самолет вниз. Мощность нисходящего порыва фактически может превышать возможность набора высоты самолета.

- Поток, приводящий к большому горизонтальному сдвигу ветра. Эта внезапная смена встречного ветра на попутный уменьшает подъемную силу самолета, что может привести к снижению самолета, как правило, во время взлета или посадки.

Самолет, фактически столкнувшийся с микропорывом вблизи аэродрома, при попытке приземлиться или взлететь, может столкнуться с 3 различными и сложными фазами ветровых условий на малой высоте. Например, воздушное судно, пролетающее через микропорыв при посадке, пройдет следующие фазы полета:

#### Фаза 1. Встречный ветер

При первом входе в микропорыв пилот замечает порыв встречного ветра, улучшающий характеристики, т.е. мгновенно увеличивающий воздушную скорость самолета, вызывая тем самым подъемную силу, и самолет поднимается выше заданной траектории и/или ускоряется. Чтобы вернуть самолет обратно на траекторию и снизить скорость, пилот, естественно, затормозит двигатели и снизит высоту самолёта.

#### Фаза 2. Нисходящий поток

По мере того, как самолет продолжает свое движение в микропорыве, он сталкивается с внезапным всплеском уже другого, нисходящего потока, влияющим как на траекторию полета самолета, так и на угол атаки: самолет будет терять высоту. Пилот, который теперь движется с более низкой

скоростью и по траектории направленной вниз, попытается восстановить исходную траекторию, начав набор высоты.

### Фаза 3. Попутный ветер

Когда пилот пытается набрать высоту, чтобы восстановить свою высоту, самолет теперь испытывает изменение направления ветра и сталкивается с попутным ветром. Порыв попутного ветра мгновенно уменьшает подъемную силу и скорость полета самолета и, таким образом, заставляет самолет лететь ниже намеченной траектории и замедляет его.

Микропорыв представляет собой серьезную угрозу для полета из-за его прямого и агрессивного воздействия на воздушную скорость самолета, высоту, угол атаки и, следовательно, на грузоподъемность.

## **1.2.2 Системы обнаружения СВ в районе аэропорта**

Как мы выяснили, сдвиг ветра отрицательно влияет на летно-технические характеристики самолета и поэтому представляет собой реальную угрозу безопасному проведению полета. Лучшая линия защиты от таких опасностей: обнаружение и предотвращение столкновения.

После открытия влияния сдвига ветра на летно-технические характеристики самолета были разработаны различные инструменты, помогающие пилотам распознавать эти события и предпринимать соответствующие действия. На практике осведомленность и бдительность летного экипажа являются ключевыми факторами успешного применения методов предотвращения сдвига ветра.

Лучший способ предотвратить столкновение со сдвигом ветра для пилота — это знать, что сдвиг ветра присутствует вдоль маршрута, и по возможности избегать его. Однако, если столкновение неизбежно, важно знать вероятную величину сдвига и быть готовым к немедленной реакции. Хотя и не существует абсолютно надежного способа прогнозирования явления, можно использовать различные инструменты и

информацию для обнаружения областей потенциального или наблюдаемого сдвига ветра и, таким образом, иметь возможность разрабатывать эффективные стратегии предотвращения.

#### 1) Сводки погоды и прогноз явления по системе LLWAS

Многие аэропорты, особенно подверженные микропорывам и сдвигу ветра, в настоящее время оснащены системой оповещения о сдвиге ветра на малых высотах (LLWAS). Эта система устройств способна обнаруживать сдвиги ветра и предупреждать воздушные суда об их возникновении, отправляя предупреждение в УВД. В этом отношении важное значение имеет хорошая связь между летными экипажами и УВД.

LLWAS состоит из центрального анемометра (определяющего скорость и направление ветра) и периферийных анемометров, расположенных примерно в двух морских милях от центра, их как правило в количестве 4-5 штук, между которыми есть связь: данные центрального датчика ветра усредняются за скользящий двухминутный период и каждые 10 секунд сравниваются с данными периферийных датчиков ветра.

Система была разработана по ряду причин, связанных с множеством аварий и происшествий. Она успешно реализовалась в более чем 120 точках по всему миру. Первоначальная задача состояла в обнаружении фронтов порывов, если таковые попадают в диапазон аэродрома. Но в дальнейшем стало понятно, что куда важнее отслеживать предшествующий фронту порыв, чем сам фронт. В свое время данная система имела недостаток, связанный с возможным наличием сдвига между датчиками, из-за чего этот порыв может быть не обнаружен, но в дальнейшем, с учетом усовершенствования системы путем алгоритма дивергенции в треугольниках, удалось ее решить. Принцип действия такого алгоритма лаконичен: берутся три датчика, которые составляют между собой треугольник, рассчитываются всевозможные данные по ветру, и посредством дивергенции удавалось обнаруживать СВ, поскольку пилоту не особо интересна дивергенция, он

получает по своему бортовому интерфейсу только расчетные данные об встречном ветре (Ослабление или усиление).

К примеру, если траектория полёта составляет от 3 до 5 км, то существует два режима оповещения LLWAS: оповещение о сдвиге и оповещение о микропорывах. Предупреждение о сдвиге ветра генерируется всякий раз, когда скорость ветра снижается на 15–29 узлов или увеличивается более чем на 7,5 узлов, в случае ослабления ветра это принято называть “СВ с ослаблением”, а в случае увеличения “СВ с усилением”. Условием предупреждения о микропорыве является снижение скорости ветра более чем на 30 узлов. Данная система позволяет авиадиспетчерам предупреждать пилотов о существующих или надвигающихся условиях сдвига ветра.

В целом, каждая станция может самостоятельно регулировать пороговый показатель сдвига, и также калибровать датчики, это важно, поскольку от этого будет зависеть качество данных на выходе, но не стоит забывать и про ложные сигналы, частота появления которых будет высокой, при достаточно низком пороговом показателе. Также ложные сигналы могут происходить из-за неправильного расположения датчиков, неисправностей в системе, или даже по причине порывистого ветра. Решается эта проблема путем установки дополнительных анемометров, чтобы в системе было больше данных для сравнения, и была возможность отмечать флажком неправильно откалиброванные.

## 2) Отчёты пилотов (PIREPS)

PIREPS определяет величину сдвига ветра со скоростью более 20 узлов или нисходящего/восходящего потока со скоростью 500 футов в минуту ниже 1000 футов над уровнем земли — все это признаки суровых условий, и их следует избегать в любое время. Учитывая, что эти условия быстро изменяются, сообщения следует интерпретировать с большой осторожностью и рассудительностью. Пилот должен учитывать количество времени, прошедшее с момента подачи отчета. И действительно, зная, что

микрорывы усиливаются в течение нескольких минут после того, как они только достигли земли, серьезность может быть выше, чем первоначально сообщалось системой. И наоборот, зарегистрированный микрорыв вполне может рассеяться к тому времени, когда воздушное судно планирует пересечь инкриминируемую зону. Поэтому очень важно помнить, что летящий впереди самолет может оказаться в совершенно иных условиях, чем следующий за ним в том же воздушном пространстве

### 3) Система звукометрического обнаружения и измерения дальности (СОДАР)

В ней используются волны, с частотой 1400 Гц, что позволяет обнаружить инверсию температуры в приземном слое. Такая доплеровская методика позволяет быстро и эффективно получить данные об направлении/скорости ветра при времени интеграции данных в систему в 5 минут. Зондирование атмосферы оборудованием СОДАР происходит как над аэродромом, так и под углом, что позволяет непрерывный мониторинг за всем профилем ветра.

### 4) Система TDWR

Алгоритм, который используется в этой системе, аналогичен LLWAS, но данные сосредоточены на изучении радиальной скорости, т.е. на проекции вдоль радиолокационного луча, благодаря чему можно легко описать и спрогнозировать микрорыв в исследуемой области над землей. Проблема такого метода заключается в помехах отражаемого от земли сигнала, в настоящее время эта проблема активно исследуется для снижения уровня помех (На данный момент это около 3-4%). Ложные сигналы относятся к категории СВ от 7 до 13 м/с. Программное обеспечение, создающее наилучшую связь между TDWR и УВД называется TWIP. Разработано оно была в 1996 году и используется в двух режимах: вопрос/ответ и направление/отмена. Ответы поступают ежеминутно при неблагоприятных условиях либо каждые 8 минут при обычной погоде. В последнем режиме пилот получает все сообщения, связанные с изменениями, нежели в первом

режиме, где если не происходит запроса о данных, висит самое последнее сообщение без обновления. Недостатком такого варианта получения данных является отвлекающий и раздражающий фактор возникновения уведомлений и панели, и также нельзя исключать фактор ложных донесений.

Продолжая говорить об данных, которые получают посредством TDWR, стоит и упомянуть о возможности исследования осадков, что позволяет узнать об наличии мороси/снега в атмосфере. В заключение приведем таблицу со сравнением выходных данных между двумя системами.

Таблица 1.1 Сравнение выходных характеристик

<i>Категория</i>	<i>TDWR</i>	<i>LLWAS</i>
Пространственная разрешающая способность	Высокая	Низкая
Разрешение по времени	Низкая	Высокая
Измерение данных о скорости	Радиальная, 3-D	2-D
Информация об отражающей способности цели	Да	Нет
Информация о воздушном пространстве над поверхностью	Да	Нет
Зона действия	Большая	Малая
Возможность прогнозирования микропорывов	Да	Нет

Наличие TDWR и LLWAS значительно увеличивают безопасность проведения полётов. Это крайне важно для аэропортов где поток людей очень высокий. И теперь становится очевиден ответ на вопрос, почему же так много задержек/откладываний рейсов, всё это напрямую вытекает из ситуации, происходящей в атмосфере, за состоянием которой помогают следить самые совершенные методы.

### 1.2.3 Бортовое оборудование, предупреждающее о СВ

На борту каждого воздушного судна всегда предусмотрена установка таких основных приборов как вариометр, высотомер, указатели скорости воздуха. Также используются приемники давления (воздушная скорость), гиро вертикаль и датчики критического потока воздуха (позволяющая узнать угол атаки). Вычислительная машина обрабатывает данные, поступающие с этих приборов, и затем пилот на своем интерфейсе видит отображаемые численные значения СВ. Как и упоминалось ранее, у каждой величины существует некоторый порог, к примеру, при усилении попутного ветра это 3 узла в секунду, а для изменения угла атаки это 0.16 радиан (8.8 градусов).

Из наиболее старых вариантов существуют ретроактивные приборы, позволяющие отследить СВ лишь при непосредственном вхождении в область атмосферы, которая подвержена изменению ветра. Информация таких систем поступает от специализированных акселераторов, которые являются неотъемлемым разделом вычислителя оптимизации всех характеристик воздушного судна (Как говорилось до этого, среди них угол тангажа, воздушная скорость, ускорения, и угол атаки). Как бы то ни было, кажущийся со стороны серьезный недостаток этой системы не критичен, поскольку пилот получает соответствующий сигнал об изменении в ветре в течении важных нескольких секунд для реакции.

Чтобы обеспечить раннее предупреждение о потенциальном сдвиге ветра, некоторые бортовые метеорологические радары имеют возможность обнаруживать области сдвига ветра впереди самолета на основе измерения скорости ветра как по вертикали, так и по горизонтали.

Это оборудование называется системой прогнозирования сдвига ветра (PWS). Эта система активна и обеспечивает надежную индикацию на высоте от 50 до примерно 1000 футов над поверхностью земли.

Обычно PWS выдает предварительное предупреждение за одну минуту, сначала отображая на PFD (Primary flight display/дисплей полёта) сообщение желтого цвета «W/S AHEAD».

Если условия ухудшаются и место сдвига ветра приближается к воздушному судну, предупреждение желтого цвета «W/S AHEAD» превращается в предупреждение красного цвета и сопровождается со звуковым синтетическим голосом. Это возможный признак того, что самолет приближается к микропорыву.

Изобилие инструментов, перечисленных ранее, должно позволить экипажу собрать достаточно информации о погодных условиях вдоль маршрута полёта воздушного судна и, таким образом, планировать свои действия надлежащим образом. Приведём некоторые практические рекомендации, согласно (5):

- 1) Необходимо рассмотреть возможность отложения взлёта до улучшения условий полёта, а также необходимо помнить, что нисходящий порыв явление непродолжительное и вполне может сойти на нет в течении нескольких минут.

- 2) Стоит выбрать наиболее благоприятную взлетно-посадочную полосу и откорректировать в соответствии с выбором новую траекторию набора высоты (Учитывая при этом положение вероятных сдвигов ветра).

- 3) Нужно использовать метеорологический радар перед началом взлёта, чтобы убедиться, что траектория полета свободна от описанных выше опасных зон.

- 4) Всегда внимательно отслеживать изменение скорости во время взлёта, чтобы обнаружить малейшие признаки СВ.

К самым современным методам бортового реагирования на изменение показателей лётных характеристик и СВ, относят бортовую реактивную систему сдвига ветра. Эта система способна обнаруживать столкновение со сдвигом ветра на основе измерения скорости ветра как по вертикали, так и по горизонтали. Система предупреждения о сдвиге ветра, связанная с режимом

системы определения скорости (SRS) управления полетом, представляет собой реактивную систему сдвига ветра (RWS), поскольку оба компонента мгновенно реагируют на текущие изменения параметров воздушного судна.

### 1.3 Классификация СВ

По традиции, классификация СВ в случае разности между двумя точками (в виде векторов) принято рассчитывать на каждые 30 метров. Такому подходу положили начало на пятой аэронавигационной конференции в 1967 году, классификация показана в таблице 2.

Таблица 1.2 Общепринятые критерии интенсивности сдвига ветра

Слабый	— от 0 до 2 м/с (от 0 до 4 уз) включительно на 30 м (100 фут)
Умеренный	— от 2,5 до 4 м/с (от 5 до 8 уз) включительно на 30 м (100 фут)
Сильный	— от 4,5 до 6 м/с (от 9 до 12 уз) включительно на 30 м (100 фут)
Очень сильный	— свыше 6 м/с (12 уз) на 30 м (100 фут)

В то время бытовало мнение, что угроза СВ напрямую связана с фронтами порывов при сильных грозовых явлениях, и с профилями сильных ветров, которые выражают численно в виде градиента скорости. Но по ряду причин оказалось, что такая классификация не совсем удовлетворительна, к таким причинам относят:

1) Разный ветер в рамках одного и того же класса интенсивности имеет разную силу влияния на самолёты, это справедливо для воздушных судов разных масс.

2) Те значения интенсивности СВ, которые выраженные в единицах скорости, для пилота не имеют практического смысла, поскольку он мыслит в других категориях, а именно воздушной скоростью, где изменение скорости связано с ускорением или торможением в узлах в секунду либо в единицах силы тяжести.

3) Как правило в настоящее время самолеты, столкнувшиеся с классификацией ветра как “очень сильный” не сталкиваются со сложными проблемами при выполнении посадки.

4) Воздействие СВ на самолёт также зависит и от времени воздействия факторов из вне, и от своей собственной скорости прохождения через сдвиг.

#### **1.4 Метеорологические условия и явления, приводящие к СВ**

В нижних слоях атмосферы (особенно заметно это до высоты 600 метров), играет роль трение воздуха, что вызывает изменение направления/скорости ветра по мере увеличения высоты. Такой слой называют поверхностным пограничным слоем. До высоты 100 метров движение воздуха преимущественно создается посредством трения об земную поверхность. От 100 до 600 метров уже располагается слой Экмана, где трение все еще играя важную роль, постепенно уменьшается, уступая место другим факторам, таким как барический градиент и сила Кориолиса.

В этом приземном пограничном слое трения скорость ветра как правило увеличивается вдоль всего слоя, а самые сильные изменения происходят непосредственно на наиболее низкой высоте, прямо над землей (до 100 метров), где направление ветра практически постоянно по высоте. Установить явную взаимосвязь между высотой и СВ в этом слое крайне затруднительно, однако в случае нейтральной устойчивости, где вертикальный градиент принимают за сухую адиабату в ненасыщенном воздухе, либо за насыщенную адиабату в насыщенном воздухе, задача становится уже проще. В поверхностном слое такие условия присутствуют, если значения ветра достаточно высокие, что способствует турбулентности. Если ветер слабый (штиль), и имеется инверсия температуры, слой не может быть описан как нейтральный и теория не реализуема.

Если устойчивость охватывает весь слой трения, бывает такое, что турбулентное перемешивание выше инверсии прекращается. Т.е. ветер

приземного слоя ослабляется/наступает штиль. Выше инверсии поток воздуха находится вне замедляющего действия трения и образуется максимум скорости ветра. Например, если поток отклоняется горными структурами вдоль равнины, максимум начинает напоминать струйное течение, сосредотачиваясь вдоль узкой полосы. Максимум скорости может быть в этом случае выше 60 узлов в секунду (31 м/с).

Горные массивы, холмы, здания или даже деревья также могут являться причиной возникновения СВ, и как правило это происходит вместе с турбулентностью. Такие горизонтальные сдвиги, происходящие на локальной территории (и являющиеся пологими), создают проблему для самолётов легкой массы. Особенно заметно явление усиления ветра в случаях прохождения между нескольких горных хребтов, которые представляют собой своего рода сужающуюся ложе, из-за чего скорость потока увеличится (Это можно заметить и в городских условиях, между домами). Если препятствий не наблюдается на территории аэродрома, но присутствуют сильные ветра, это также приводит к возникновению СВ, это происходит из-за механического нарастания величины турбулентного перемешивания, по причине которого сдвиг у поверхности земли меньше, чем на высоте.

Если говорить об термодинамическом влиянии атмосферы на возникновение сдвигов, здесь распространенным условием является кататический ветер, который дует на наклонной поверхности при низкой облачности либо при слабом градиенте давления (В явном виде заметно при антициклонах). Под влиянием силы гравитации поток плотного холодного воздуха сходит вниз, образуя инверсию и вызывая образование ветров. Если значение этой инверсии будет достаточно высоким, то это поспособствует скольжению над этой границей ветров, что приводит к СВ вдоль верхней границы инверсии.

Такое разграничение слоев по температуре затрагивает и их плотность. Для удобства переход от одного слоя к другому происходит через зону,

называемую фронтальной поверхностью. Равновесие достигается опусканием плотного холодного воздуха относительно теплого воздуха, который располагается прямо над холодным (Который имеет форму клина). Различие скорости ветра поперек такой поверхности как раз-таки и связано с фронтальной поверхностью.

Если рядом с аэродромом располагается крупный водоем, море или озеро, то наблюдается изменение приземных ветров, в связи с температурным градиентом от нагретой суши и холодного воздуха над водой. Днем ветер дует с воды на сушу в виде бриза, что является причиной резкого изменения направления ветра, повышением влажности, и как следствие изменением температуры. Бризы носят локальный характер, при их максимальной силе могут возникать мощные конвекционные потоки, которые способствуют началу дождя или грозы.

В случаях неустойчивой атмосферы происходят различные конвективные процессы, например, нагретый воздух и его восходящий поток. Такая конвекция благоприятствует возникновению кучево-дождевых облаков и гроз, среди которых выделяют тепловые и фронтальные. Они возникают на малых высотах вдоль морского бриза над сушей, либо вдоль берегового бриза над морем. Явление грозы тесно связано с массивными, циркулирующими по всему очагу восходящими и нисходящими потоками, которые взаимодействуя между собой, эффективно используют энергию которая привносится влажностью и избытком тепла. Массивность этого явления прямо пропорциональна степени силы ветра и его изменению по высоте. С возрастанием СВ гроза может переходить от одиночных очагов к множественным, иногда объединенным в единое целое, очагам. Но в противовес этому, в природе существует пороговое значение вертикального сдвига, при достижении которого происходит разрушение структуры грозового очага.

В отдельных грозах также могут возникать сильные нисходящие порывы, внутри которых образуются еще более мелкие нисходящие порывы,

которые и представляют собой микропорывы, о которых уже шла речь. Хотя они и создают сильные ветры разных направлений, наиболее опасные приземные ветры порождаются торнадо, которое образуется от концентрированной системы низкого давления (т.е. является вихрем), в то время как микропорыв это локализованная система высокого давления, от центра которой расходятся ветры.

Торнадо является результатом устойчиво сильных восходящих потоков при грозах, которые обычно также являются причиной рождения и микропорывов. Различие микропорывов от торнадо состоит в том, что первое порождается в нисходящих потоках, а последнее в восходящих. Торнадо — это вихрь, у основания которого воздух закручивается в спираль, линия которой движется вверх. В ядре давление может быть ниже атмосферного на величину от 10 до 20% (К примеру, такая разница сравнительна с высотой 1 км над уровнем моря). Опасность невероятно экстремальных сдвигов ветров от торнадо видна невооруженным глазом на большом расстоянии, что позволяет обходить их при помощи маневров. Случаются ситуации, когда видимость ставится под вопрос из-за нахождения в облаке, либо при сильном дожде.

В процессе своего полёта воздушные суда также оставляют позади себя след из спутных вихрей, которые представляют собой сдвиг ветра в форме двух цилиндрических вихревых труб. В случае реактивных широкофюзеляжных самолетов эти вихри очень сильны и могут представлять опасность для самолётов которые летят слишком близко позади.

## Глава 2. Материалы и методы исследования

### 2.1 Исходные данные

В качестве источника исходных данных были выбраны станции, расположенные в трех, удалённых друг от друга на расстоянии 1000, 1100, 1400 км, городах, а именно:

- 1) Каргополь (Широта:  $61.5035900^\circ$ , Долгота:  $38.9486000$ , высота над уровнем моря: 121 м)
- 2) Смоленск (Широта:  $54.7818000^\circ$ , Долгота:  $32.0401000^\circ$ , высота над уровнем моря: 220 м)
- 3) Саратов (Широта:  $51.5405600^\circ$ , Долгота:  $46.0086100^\circ$ , высота над уровнем моря: 72 м)

Они визуально составляют собой треугольник, в вершинах которого расположены (Рис 2.1). Выбор этих населённых пунктов обусловлен их нахождением вокруг главного города России – Москвы, откуда во все стороны расходятся воздушные коридоры перемещения самолётов.

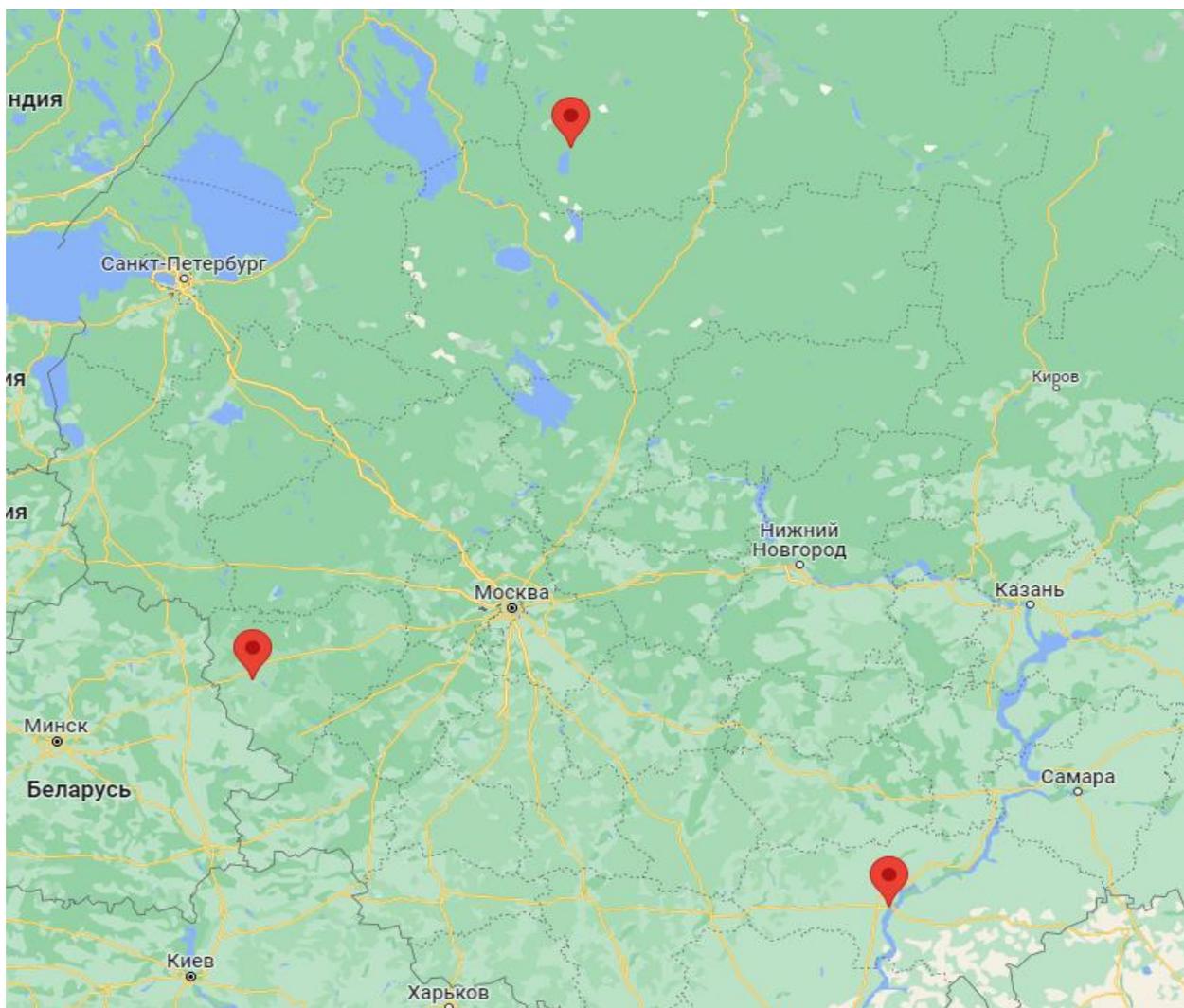


Рис. 2.1 География местоположения городов и их аэрологических станций.

### **2.1.1 База данных аэрологических зондирований на станциях К, С, С**

Исходные данные брались с сайта университета Вайоминга [6] за апрель 2022 года (К – Каргополь, С – Смоленск/Саратов). Поскольку данные очень громоздкие, для примера рассмотрим только 30 апреля в таблицах 2.1, 2.2, 2.3 ниже.

Таблица 2.1 Исходные данные для Смоленска за 30 апреля

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1000	218									
997	239	3	-5	56	2.66	0	4	276.4	283.9	276.8
982	362	2.7	-6.9	49	2.33	0	10	277.3	284	277.7
960	547	2.2	-9.8	41	1.9	4	10	278.6	284.1	278.9
957	572	1.9	-10.1	41	1.87	5	10	278.6	284	278.9
935	760	0	-12	40	1.64	356	11	278.4	283.3	278.7
932	786	-0.2	-11.9	41	1.66	355	12	278.5	283.4	278.8
925	847	-0.7	-11.7	43	1.7	345	12	278.6	283.6	278.9
883	1215	-3.9	-12.7	50	1.64	315	10	279	283.9	279.3
850	1516	-6.5	-13.5	58	1.6	310	14	279.3	284.1	279.6
761	2367	-13.7	-16.1	82	1.44	293	19	280.5	284.8	280.8
755	2427	-13.5	-15.7	83	1.5	292	20	281.4	285.9	281.6
732	2662	-13.1	-21.1	51	0.98	287	21	284.3	287.3	284.5
718	2808	-13.9	-25.9	36	0.65	284	22	285	287.1	285.1
700	3000	-14.9	-28.9	29	0.5	280	23	286	287.6	286
654	3509	-17.4	-33.6	23	0.35	275	25	288.7	289.9	288.8
618	3933	-19.5	-37.5	19	0.25	290	29	291	291.9	291.1
548	4814	-24.4	-32.2	48	0.47	285	35	295.4	297	295.5
523	5156	-26.3	-30.2	70	0.6	282	36	297.1	299.1	297.2
503	5437	-27.9	-31.9	69	0.53	280	37	298.5	300.3	298.6
500	5480	-28.1	-32.1	69	0.52	280	37	298.7	300.5	298.8
479	5787	-29.7	-33.9	67	0.46	282	37	300.4	302	300.5
400	7050	-38.1	-44.1	53	0.19	290	39	305.4	306.1	305.4
300	8970	-51.9	-58.9	43	0.05	315	37	312.1	312.3	312.1
284	9325	-54.7	-61.7	42	0.03	315	37	313	313.1	313
282	9370	-54.9	-61.9	42	0.03	315	37	313.4	313.5	313.4
264	9792	-56.7	-63.7	41	0.03	300	37	316.7	316.8	316.7
250	10140	-56.1	-63.1	41	0.03	295	39	322.5	322.7	322.5

Таблица 2.2 Исходные данные для Каргополя за 30 апреля

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1003	126	-2.5	-3.9	90	2.87	0	0	270.4	278.3	270.9
1000	149	-2.3	-3.5	91	2.96	330	2	270.9	279	271.3
995	189	-2.3	-3.4	92	3	330	6	271.3	279.5	271.8
972	375	-2.1	-3	94	3.17	340	8	273.3	282	273.8
925	766	-5.3	-11.3	63	1.75	0	12	273.9	278.9	274.2
896	1015	-7.1	-18.1	41	1.03	7	13	274.5	277.6	274.7

Продолжение таблицы 2.2

885	1111	-7.9	-18.5	43	1.01	10	14	274.6	277.6	274.8
850	1423	-10.7	-19.7	48	0.95	5	14	274.9	277.8	275.1
746	2410	-19.5	-22.3	78	0.86	324	14	275.8	278.4	275.9
736	2510	-19.7	-22.9	76	0.83	320	14	276.6	279.1	276.7
706	2819	-20.5	-24.6	70	0.74	295	14	279.1	281.4	279.2
700	2882	-20.7	-25.5	65	0.69	290	14	279.5	281.7	279.6
691	2977	-21.3	-26.6	62	0.63	280	14	279.9	281.9	280
644	3494	-24.5	-32.5	47	0.39	269	17	282	283.2	282
605	3937	-27.6	-35.6	46	0.31	260	19	283.4	284.5	283.5
500	5290	-37.1	-45.1	43	0.14	270	17	287.8	288.2	287.8
481	5556	-39	-47	42	0.12	275	16	288.6	289	288.6
469	5729	-40.3	-48.3	42	0.1	270	15	289.1	289.5	289.1
421	6457	-44.4	-52.4	40	0.07	250	14	292.9	293.1	292.9
418	6506	-44.7	-52.7	40	0.07	251	14	293.1	293.4	293.1
405	6717	-44.5	-52.5	40	0.07	258	14	296	296.3	296
400	6800	-44.9	-52.9	40	0.07	260	14	296.6	296.8	296.6
388	7000	-46.5	-54.5	40	0.06	265	16	297.1	297.3	297.1
358	7530	-50.6	-58.6	38	0.04	260	17	298.5	298.6	298.5
345	7773	-52.5	-60.5	37	0.03	268	19	299.1	299.2	299.1
342	7830	-52.7	-60.7	37	0.03	270	19	299.5	299.7	299.5
300	8680	-50.9	-58.9	38	0.05	285	23	313.5	313.7	313.5
272	9319	-48.9	-56.9	39	0.06	288	26	325.3	325.6	325.3
250	9870	-49.5	-58.5	34	0.06	290	29	332.3	332.6	332.4
242	10084	-49.2	-58.5	33	0.06	295	27	335.9	336.1	335.9

Таблица 2.3 Исходные данные для Саратова за 30 апреля

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1002	166	9.6	-0.4	50	3.72	175	17	282.6	293.3	283.2
1000	182	8.8	-1.2	49	3.52	175	17	281.9	292	282.6
980	349	7.6	-2.4	49	3.28	182	19	282.4	291.9	282.9
942	674	7.3	-2	52	3.52	195	23	285.3	295.6	285.9
925	824	7.2	-1.8	53	3.64	210	17	286.7	297.3	287.3
904	1013	6.8	-4.2	45	3.11	229	17	288.1	297.4	288.7
891	1132	5.6	-4.4	49	3.11	241	17	288.1	297.3	288.6
870	1326	3.9	-5.1	52	3.02	260	17	288.3	297.2	288.8
850	1515	2.2	-5.8	55	2.93	265	17	288.4	297.2	288.9
770	2301	-5.3	-7.7	83	2.79	262	18	288.6	297	289.1
713	2902	-7.1	-8.1	93	2.93	260	19	293.1	301.9	293.6
709	2946	-8.3	-9.2	93	2.7	260	19	292.2	300.4	292.7
700	3045	-8.9	-9.9	92	2.59	260	19	292.6	300.5	293.1
652	3591	-12.5	-13.8	90	2.03	253	25	294.5	300.9	294.9

Продолжение таблицы 2.3

633	3816	-13.1	-16.3	77	1.7	250	27	296.4	301.7	296.6
605	4159	-15.1	-22.1	55	1.08	245	31	297.9	301.4	298.1
549	4878	-20.3	-26.1	60	0.83	235	39	300.1	302.9	300.3
503	5526	-25	-29.8	64	0.65	250	41	302	304.2	302.1
500	5570	-25.3	-30	65	0.64	250	41	302.1	304.3	302.2
458	6200	-29.3	-35.3	56	0.42	243	45	304.8	306.3	304.9
417	6858	-34.6	-41.3	51	0.25	235	49	306.3	307.2	306.4
400	7150	-36.9	-43.9	48	0.2	240	52	306.9	307.7	307
308	8903	-50.7	-56.8	48	0.06	230	80	311.4	311.6	311.4
300	9080	-52.1	-58.1	48	0.05	230	80	311.8	312	311.8
269	9778	-57.3	-63.3	46	0.03	233	76	314.1	314.2	314.1
256	10090	-58.1	-64.1	46	0.03	235	74	317.4	317.5	317.4

Во-первых, стоит отметить, что не все столбцы изначальных данных необходимы в случае исследования сдвига ветра в приземном слое. Для этого потребуются лишь данные об высоте (HGHT), скорости ветра (SKNT), направлении ветра (DRCT), а также значения температуры (TEMP) для более детальной классификации болтанок. Во-вторых, станции располагаются на разных высотах, и поэтому возникает необходимость в сплайн-интерполяции данных. Для удобства был использован макрос, написанный специально от лица кафедры экспериментальной физики атмосферы института РГГМУ.

После проведения сплайн-интерполяции полученные данные заносились в отдельную таблицу и структурировались, согласно таблице 2.4.

Таблица 2.4 Данные после интерполяции

H (м)	Скорость ветра (м/с)			Направление ветра (Градусы)			Температура (°C)		
	Каргополь	Смоленск	Саратов	Каргополь	Смоленск	Саратов	Каргополь	Смоленск	Саратов
126	0	0	7	0	41	175	-16	0	2
300	2	4	13	204	47	229	-12	-1	7
500	3	8	28	332	56	243	-9	-3	12
900	8	5	27	296	67	250	-11	-6	11
1700	8	3	23	307	266	251	-16	-7	2
2100	8	9	23	310	264	253	-18	-7	-1
2500	9	10	22	305	263	255	-21	-8	-3
2900	10	10	22	299	242	252	-24	-12	-6

3300	9	11	21	293	265	251	-27	-15	-8
3700	9	14	21	291	253	251	-28	-17	-12
4100	9	16	21	301	257	251	-30	-17	-16
4500	9	19	22	309	261	252	-33	-19	-19
4900	9	21	22	309	260	254	-36	-22	-19
5300	10	24	22	304	256	254	-39	-25	-21
5700	11	27	22	299	252	256	-42	-28	-23
6100	11	30	23	294	249	257	-45	-31	-27
6500	12	34	25	288	246	258	-48	-33	-30
6900	12	37	25	282	245	259	-51	-36	-33
7300	12	39	25	278	245	262	-54	-39	-36
7700	12	40	24	278	246	265	-56	-42	-41
8100	13	40	24	276	248	269	-58	-45	-45
8500	13	41	26	275	249	273	-60	-49	-48
8900	15	42	30	278	250	275	-61	-53	-51
9300	18	43	31	279	250	275	-61	-58	-56
9700	19	44	32	275	250	275	-62	-62	-60
10100	21	45	33	271	250	275	-62	-66	-63
10500	23	43	34	269	250	275	-62	-70	-66

Здесь содержатся данные для 1 дня, таким же образом это было выполнено и для остальных.

## 2.1.2 Аэрологические профили скорости и направления ветра

Имея в табличном виде данные о скорости и направлении ветра на разных высотах, построим аэрологические профили для трех станций: рис 2.2-2.3 для Каргополя, рис 2.4-2.5 Смоленск, рис 2.6-2.7 Саратов.

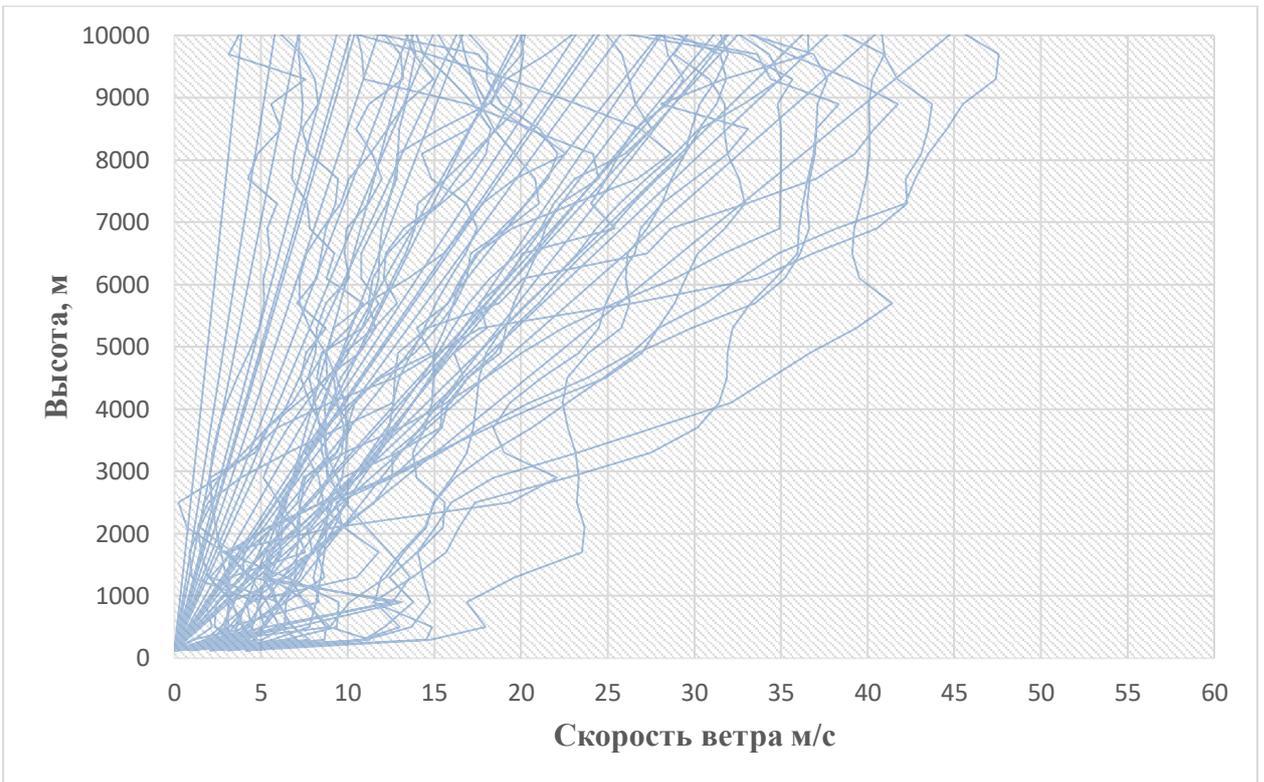


Рис. 2.2 Профиль скорости ветра для Каргополя за апрель 2022 года.



Рис. 2.3 Профиль направления ветра для Каргополя за апрель 2022 года.

Для Каргополя можно заметить, что до 2 км преобладают ветра со скоростью до 8-10 м/с. По мере увеличения высоты диапазон скоростей увеличивается и на высоте 10 км составляет от 5 до 47 м/с. Также на территории станции практически отсутствуют восточные и юго-восточные ветра (90-150 градусов), а также северо-северо-западные (335 – 360 градусов) и основное направление юго-западное и западное.

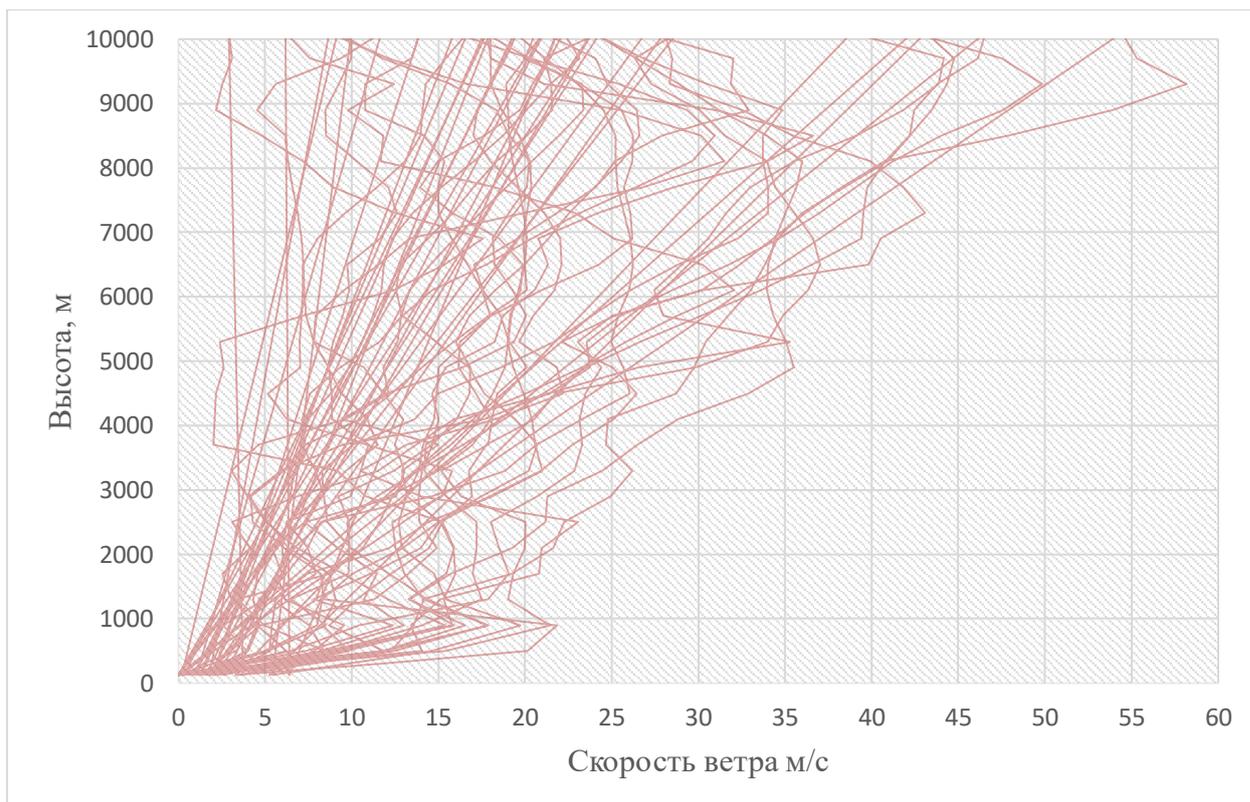


Рис. 2.4 Профиль скорости ветра для Смоленска за апрель 2022 года.

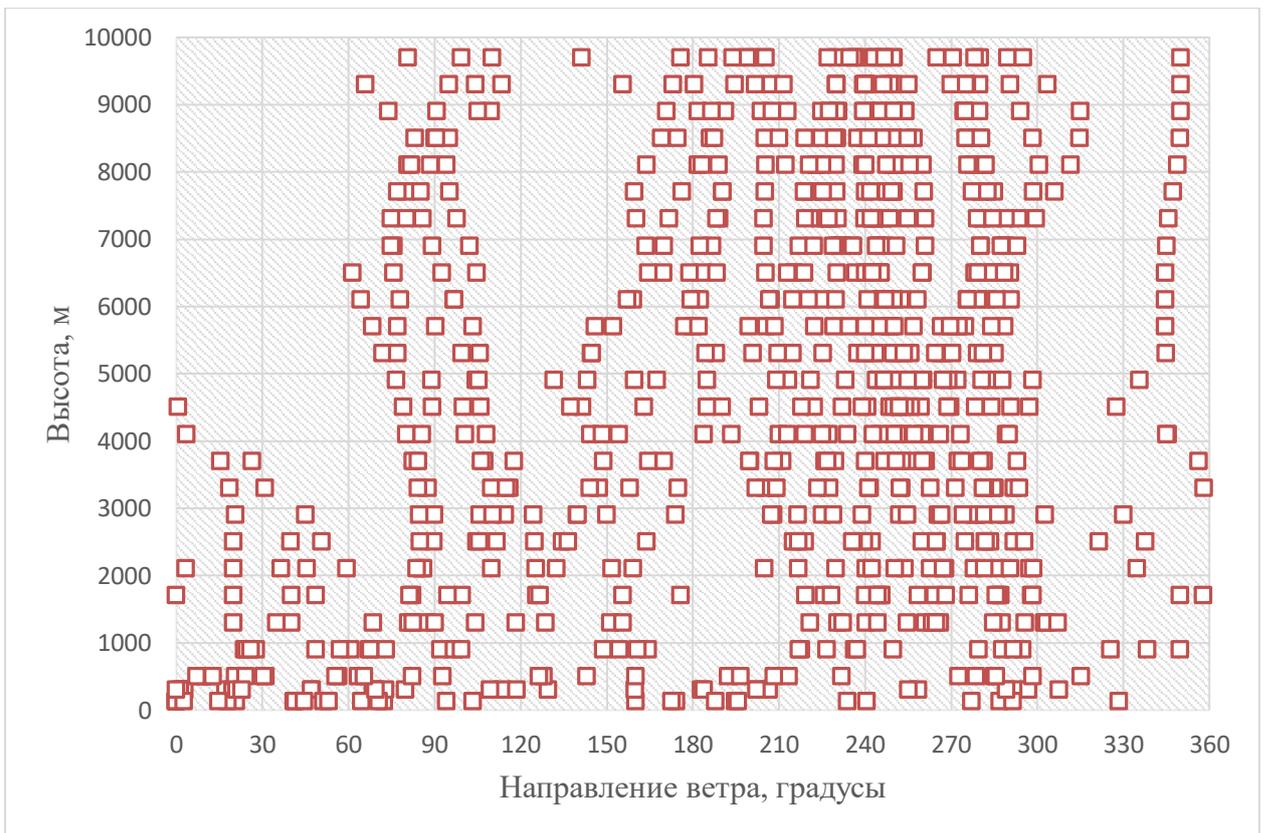


Рис. 2.5 Профиль направления ветра для Смоленска за апрель 2022 года.

У Смоленска приземные ветра имеют более высокое значение, чем у Каргополя, и в целом скорость ветра там выше. На уровне полёта воздушных судов (10 км) характерно наличие скоростей ветра от 55 до 60 м/с, чего нет в Каргополе. Направления можно встретить практически всех сортов, за исключением северо-восточных (0-60 градусов), начиная от высоты 5 км.

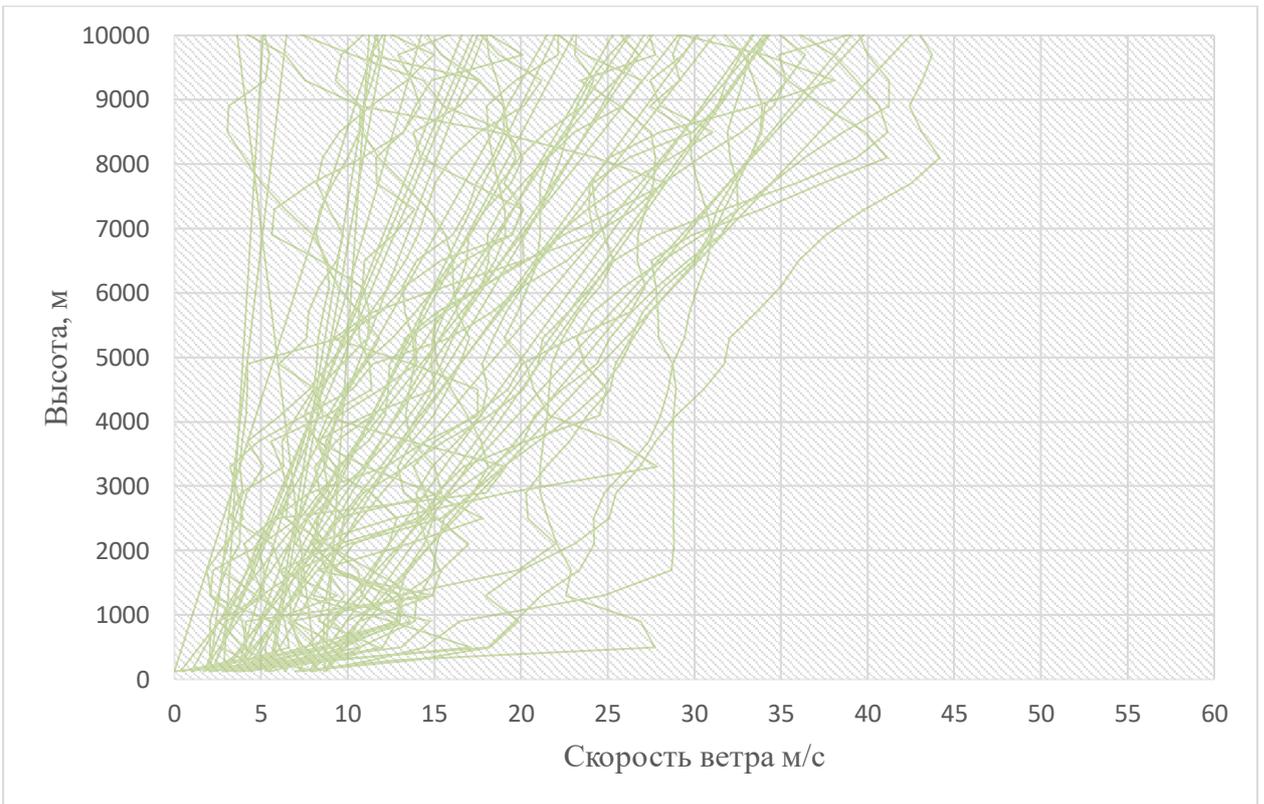


Рис. 2.6 Профиль скорости ветра для Саратова за апрель 2022 года.



Рис. 2.7 Профиль направления ветра для Саратова за апрель 2022 года.

У Саратова приземные ветра в основном имеют скорость от 2 до 8 м/с, и в целом выглядит также как Каргополь и Смоленск.

## 2.2 Статистический анализ скорости ветра

Используя пакет данных со статистическим анализом, выполним его для всех станций в таблице 2.5, а также определим коэффициенты корреляции скорости ветра (таблица 2.5.1).

Таблица 2.5 Статистический анализ скорости ветра

Каргополь		Смоленск		Саратов	
Среднее (м/с)	15.65	Среднее (м/с)	17.16	Среднее (м/с)	16.71
Стандартная ошибка (м/с)	0.38	Стандартная ошибка (м/с)	0.37	Стандартная ошибка (м/с)	0.34
Медиана (м/с)	13.00	Медиана (м/с)	15.79	Медиана (м/с)	14.95
Мода	0.00	Мода	0.00	Мода	0.00
Стандартное отклонение	10.86	Стандартное отклонение	10.54	Стандартное отклонение	9.64
Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	117.99	Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	111.19	Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	92.91
Эксцесс	-0.17	Эксцесс	0.58	Эксцесс	-0.39
Асимметричность	0.80	Асимметричность	0.84	Асимметричность	0.59
Интервал	47.57	Интервал	58.18	Интервал	44.16
Минимум (м/с)	0.00	Минимум (м/с)	0.00	Минимум (м/с)	0.00
Максимум (м/с)	47.57	Максимум (м/с)	58.18	Максимум (м/с)	44.16
Сумма	12674. 91	Сумма	13897. 19	Сумма	13537. 76
Счет	810.00	Счет	810.00	Счет	810.00

Таблица 2.5.1 Корреляция скорости ветра между станциями

	Каргополь	Смоленск	Саратов
Каргополь	1		
Смоленск	0.445137078	1	
Саратов	0.369794811	0.271193588	1

Из корреляции видно, что между собой лучше всего коррелируют Каргополь и Смоленск, а меньше всего Смоленск и Саратов. на этом анализ

данных по скорости и направлению ветра закончен, в главе 3 будут рассмотрены непосредственно вертикальные и горизонтальные СВ, а также их статистический и корреляционный анализ.

### 2.3 Получение данных о СВ

Согласно [4], вертикальный СВ рассчитывался по формуле 7, аналогичным образом рассчитывается и горизонтальный СВ, только в знаменателе будет расстояние между станциями:

$$W_{S_v} = \left( \frac{\sqrt{U_2^2 - U_1^2 - 2U_1U_2 \cos \alpha}}{\Delta Z} \right) * 30\text{м} \quad (7)$$

Где  $U_1$  – скорость ветра в нижней точке;  $U_2$  – скорость ветра в верхней точке;  $\alpha$  – угол между направлениями ветра на двух высотах;  $\Delta Z$  – расстояние между одной точкой измерения ветра и другой.

Посредством этой формулы были получены данные согласно таблице 2.6 (для удобства укажем только за один день) для вертикального СВ, и согласно таблице 2.7 для горизонтального СВ:

Таблица 2.6 Значения вертикального сдвига ветра за 1 апреля.

Вертикальный сдвиг ветра (м/с)			Высота (м)
Каргополь	Смоленск	Саратов	
0.35	0.68	3.23	300
0.63	1.85	3.67	500
0.66	0.82	1.87	900
0.40	0.26	1.09	1700
1.22	0.77	2.64	2100
0.85	0.98	2.41	2500
0.08	0.99	3.11	2900
0.21	1.39	1.33	3300
1.10	0.21	0.98	3700
1.24	2.12	0.48	4100
0.92	2.45	1.82	4500

0.03	1.48	2.40	4900
0.69	3.25	0.78	5300
0.87	3.48	2.24	5700
1.04	4.25	2.22	6100
0.70	4.46	0.87	6500
0.11	2.99	1.71	6900
1.77	0.25	3.75	7300
0.31	3.33	3.60	7700
1.32	4.16	3.16	8100
1.26	3.78	3.62	8500
2.10	2.65	3.19	8900
1.34	0.77	0.57	9300
1.81	0.43	0.15	9700
2.79	0.37	0.10	10100
2.22	0.12	0.16	10500

Таблица 2.7 Значения горизонтального сдвига ветра за 1 апреля.

Горизонтальный сдвиг ветра (м/с)			Высота
Каргополь - Смоленск	Смоленск - Саратов	Саратов - Каргополь	
0.00	0.64	0.50	300
0.20	0.83	0.79	500
0.70	3.06	1.94	900
1.26	2.08	2.21	1700
1.14	2.31	1.25	2100
1.23	1.92	1.12	2500
1.43	2.48	0.95	2900
0.13	2.83	2.22	3300
1.90	2.28	2.02	3700
0.77	2.84	2.09	4100
0.93	0.99	0.90	4500
2.33	3.26	0.95	4900
1.68	0.99	1.57	5300
3.24	3.07	1.23	5700
3.61	4.27	1.49	6100
2.49	4.30	1.61	6500
4.11	3.12	1.40	6900
3.23	2.68	2.28	7300
4.49	5.33	2.32	7700
2.84	1.41	0.92	8100
5.17	5.68	1.30	8500
3.28	3.62	2.39	8900
5.75	1.62	3.15	9300
5.57	1.62	2.84	9700
3.10	1.51	1.08	10100

## Глава 3. Результаты исследования

### 3.1 Распределение СВ по высоте и направлению

В предыдущей главе были показаны, по результатам вычислений, данные о вертикальном и горизонтальном СВ в таблицах 2.6, 2.7. Теперь чтобы понять, как часто происходят сдвиги ветра и на какой высоте, построим графики зависимости СВ от высоты (рис 3.1.1-3.1.6)

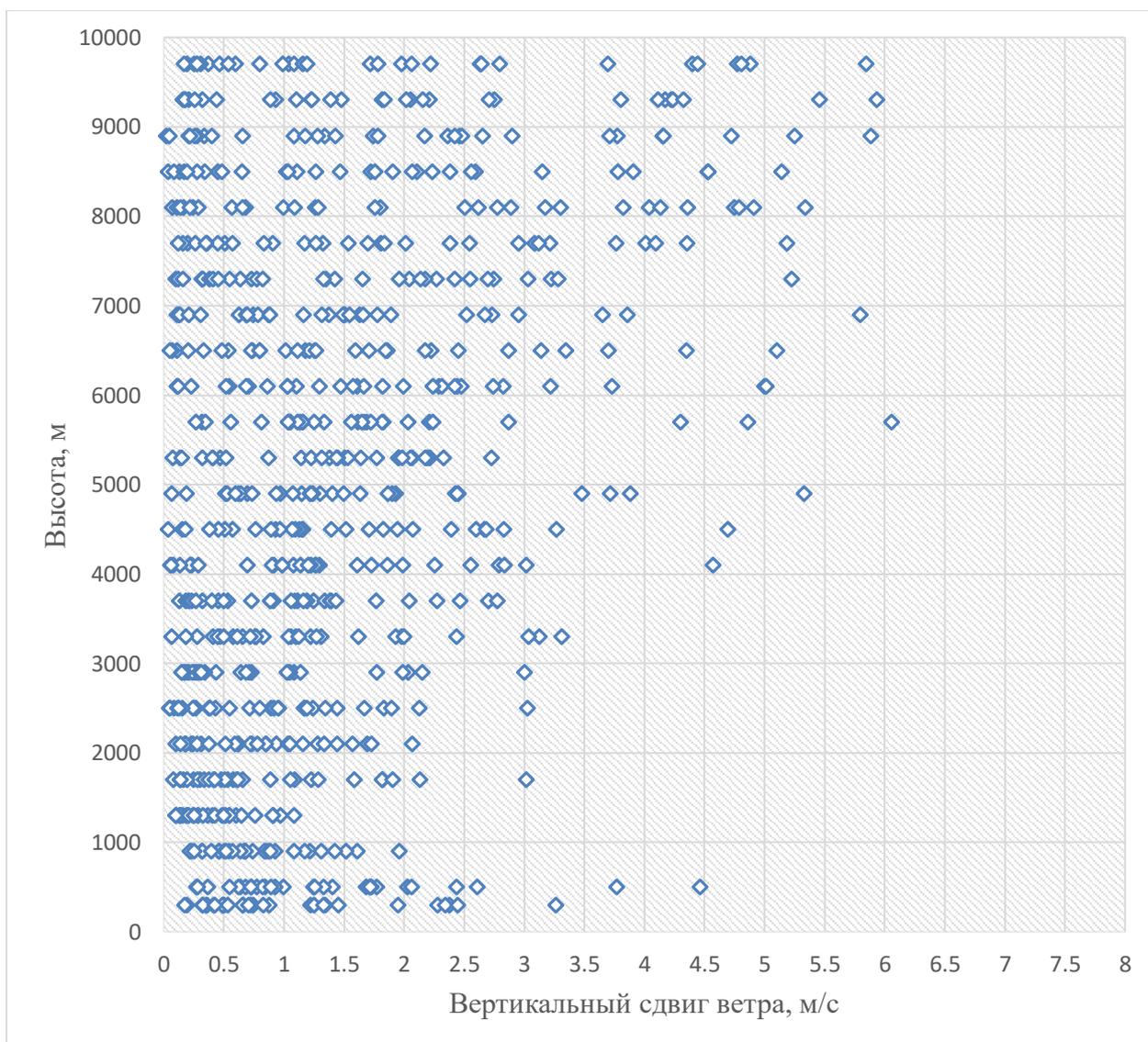


Рис. 3.1.1 Распределение значений вертикального СВ по высоте для Каргополя за апрель 2022 года.

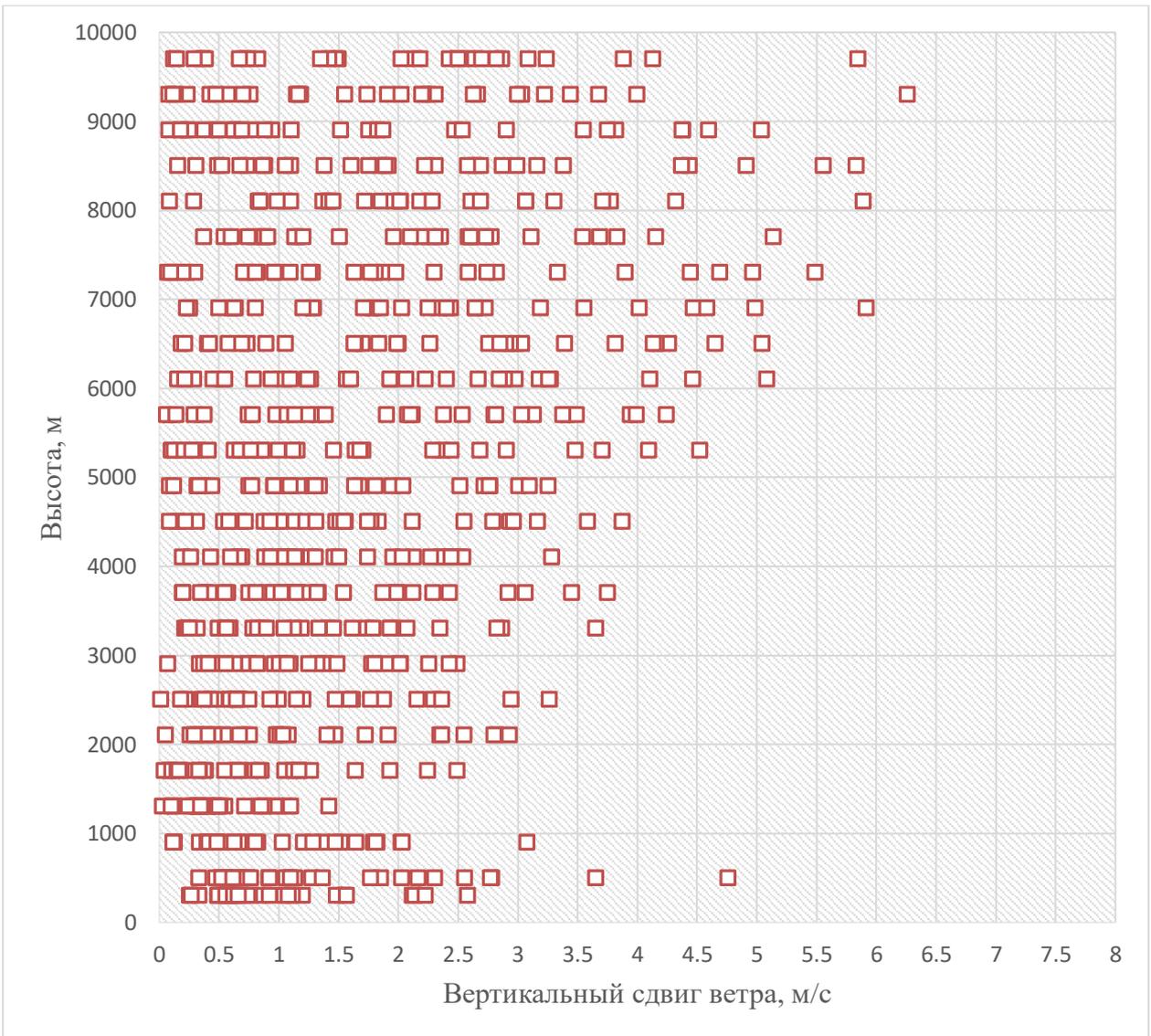


Рис. 3.1.2 Распределение значений вертикального СВ по высоте для Смоленска за апрель 2022 года.

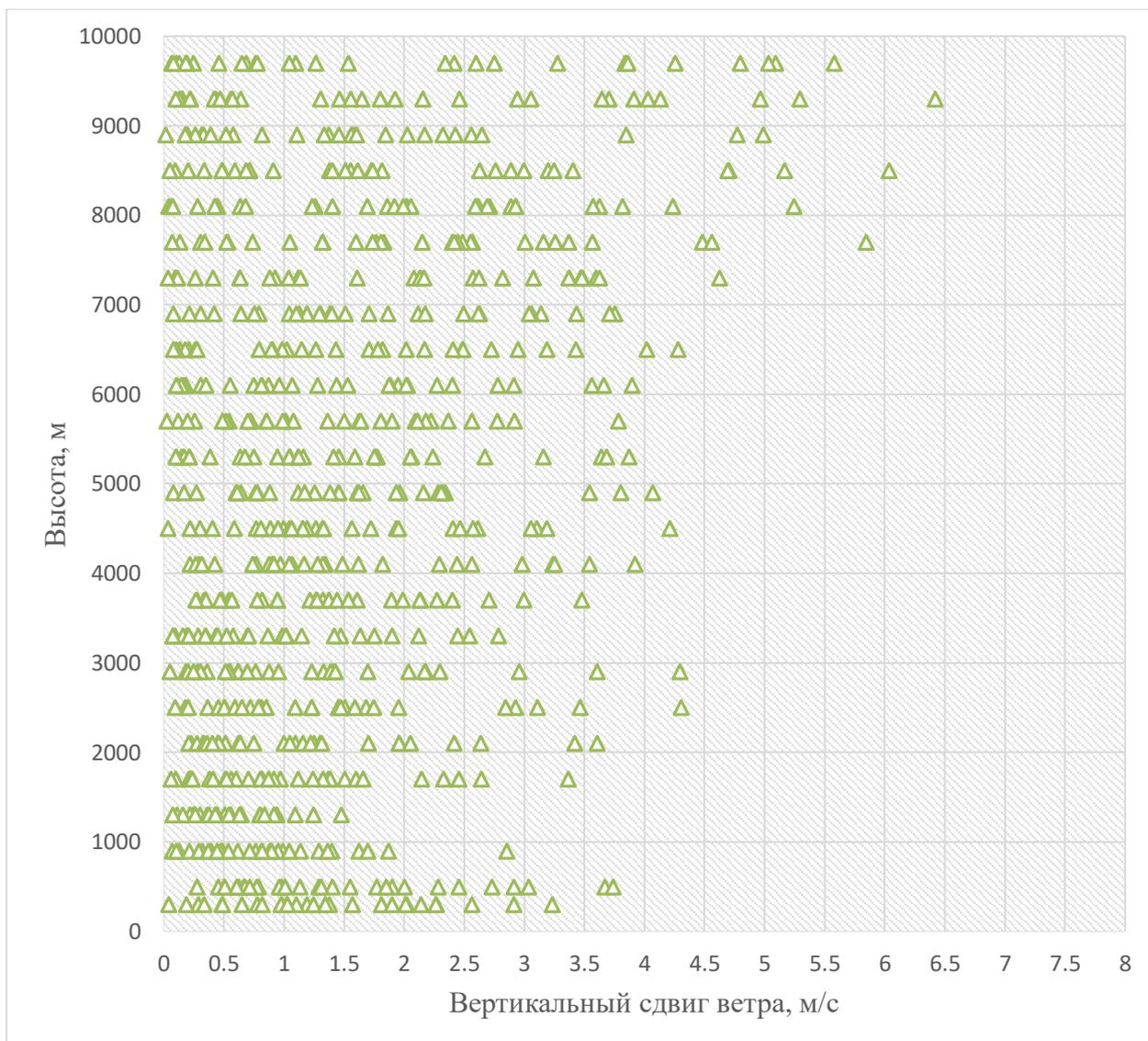


Рис. 3.1.3 Распределение значений вертикального СВ по высоте для Саратова за апрель 2022 года.

По графикам видно, что сдвиг ветра происходит всегда и на любой высоте, ключевым моментом является его значение. Согласно рекомендациям ИКАО, очень сильный сдвиг ветра имеет числовое значение более 6 м/с. За апрель таковых значений было зарегистрировано незначительно, и все они приходятся на большую высоту (от 5 до 10 км).

Для всех трех станций на высоте от 1000 до 1500 метров характерно наличие слабого сдвига ветра (менее 2 м/с). На высоте до 3 км также характерна густота в области слабого сдвига ветра, которая при увеличении

высоты уменьшается и значений СВ до 6.5 м/с становится все больше и больше. Теперь рассмотрим горизонтальный сдвиг.

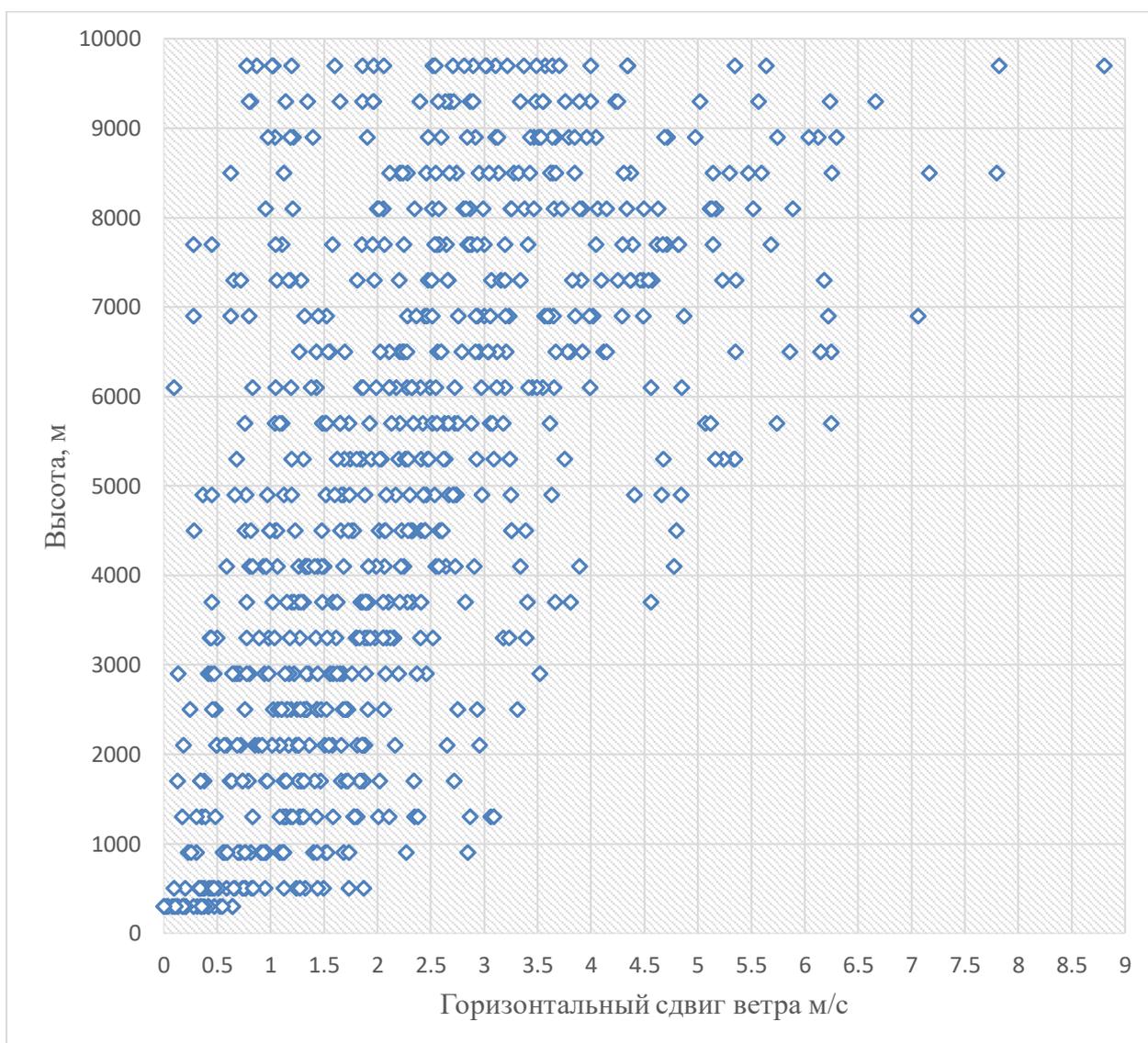


Рис. 3.1.4 Распределение значений горизонтального СВ по высоте, Каргополь – Смоленск за апрель 2022 года.

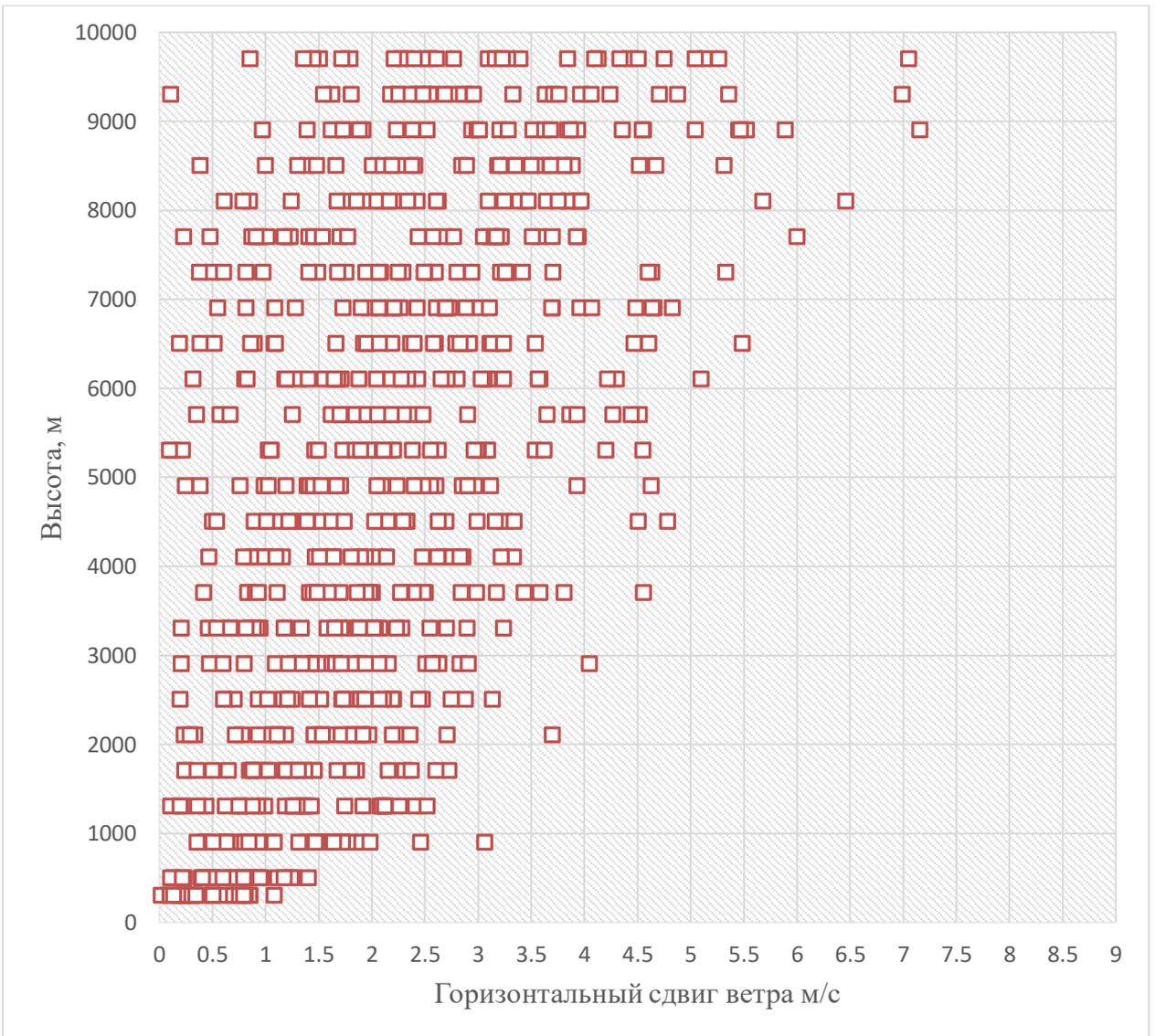


Рис. 3.1.5 Распределение значений горизонтального СВ по высоте, Смоленск – Саратов за апрель 2022 года.

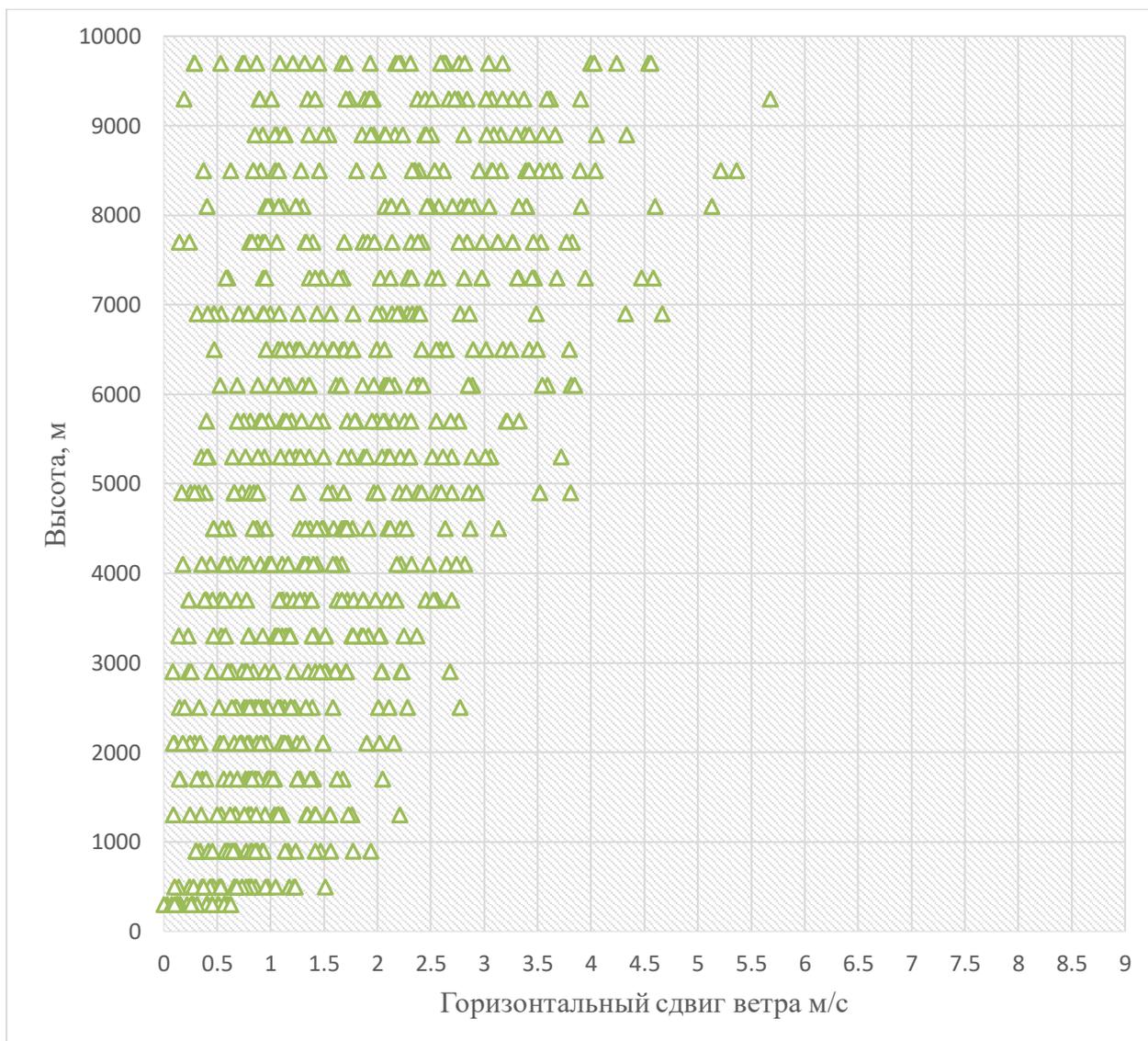


Рис. 3.1.6 Распределение значений горизонтального СВ по высоте, Саратов – Каргополь за апрель 2022 года.

В дальнейшем горизонтальный сдвиг ветра потребуется лишь для оценки турбулентности в области нахождения станций аэрологического зондирования, поэтому строить распределение горизонтального сдвига ветра по направлению не является чем-то необходимым в работе. Значения горизонтального СВ превышающие 5 м/с на 100 км будут фиксироваться и учитываться как критерий в классификации болтанок.

Теперь построим график распределения вертикального СВ по направлению ветра (рис. 3.1.7-3.1.9), а также на общем графике построим розу ветров (рис 3.2).

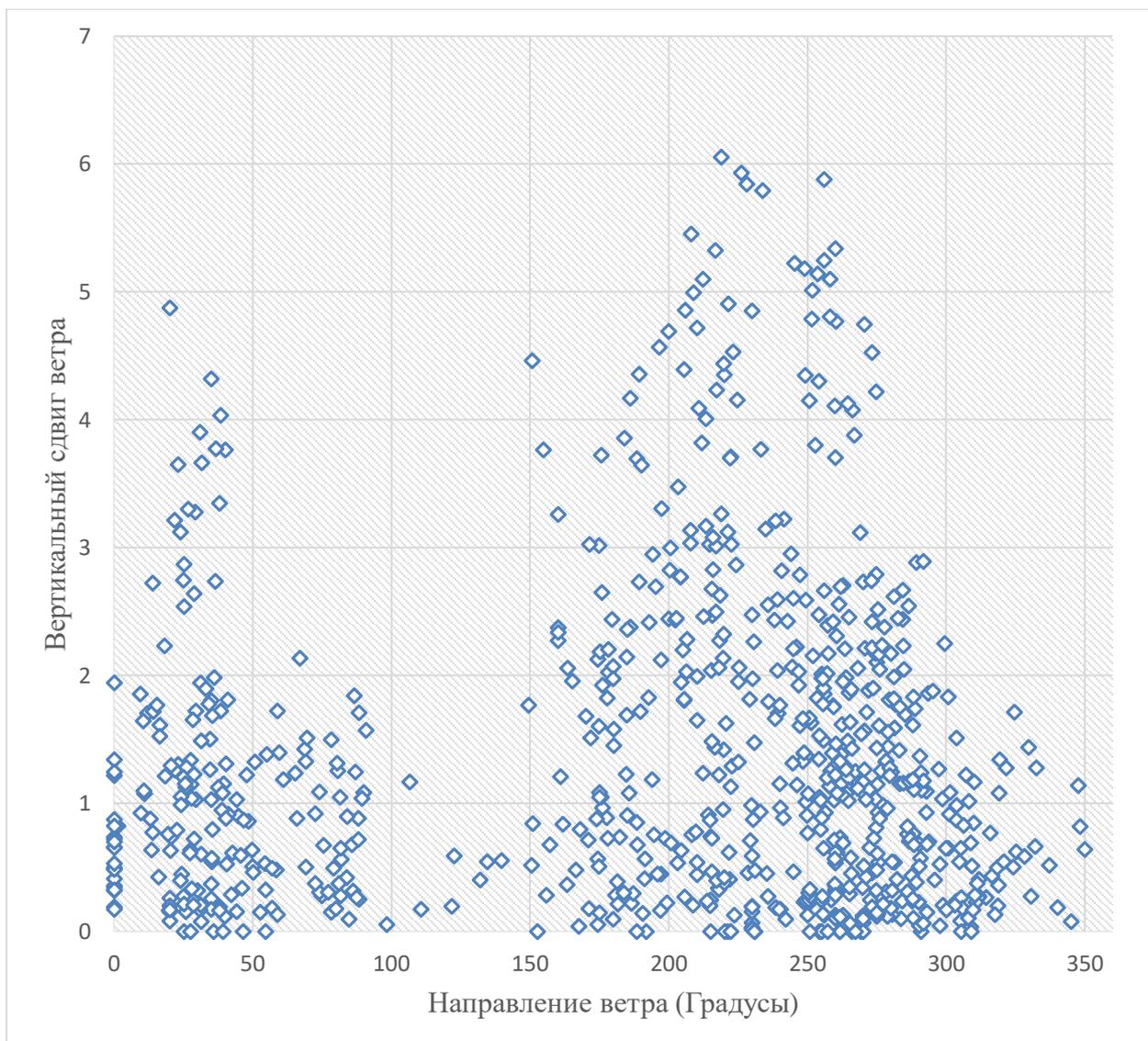


Рис. 3.1.7 Распределение вертикального СВ по направлению ветра для Каргополя за апрель 2022 года.

В главе 2 мы получили аэрологические профили каждой станции, и для Каргополя мы заключили, что у него отсутствуют восточные и юго-восточные ветра (90-150 градусов), а также северо-северо-западные (335 – 360 градусов). Из рисунка 3.7 видно, что вдоль этих направлений отсутствуют сдвиги ветра выше 2 м/с, а подавляющее большинство сдвигов сосредоточено вдоль юго-западного и западного направлений.

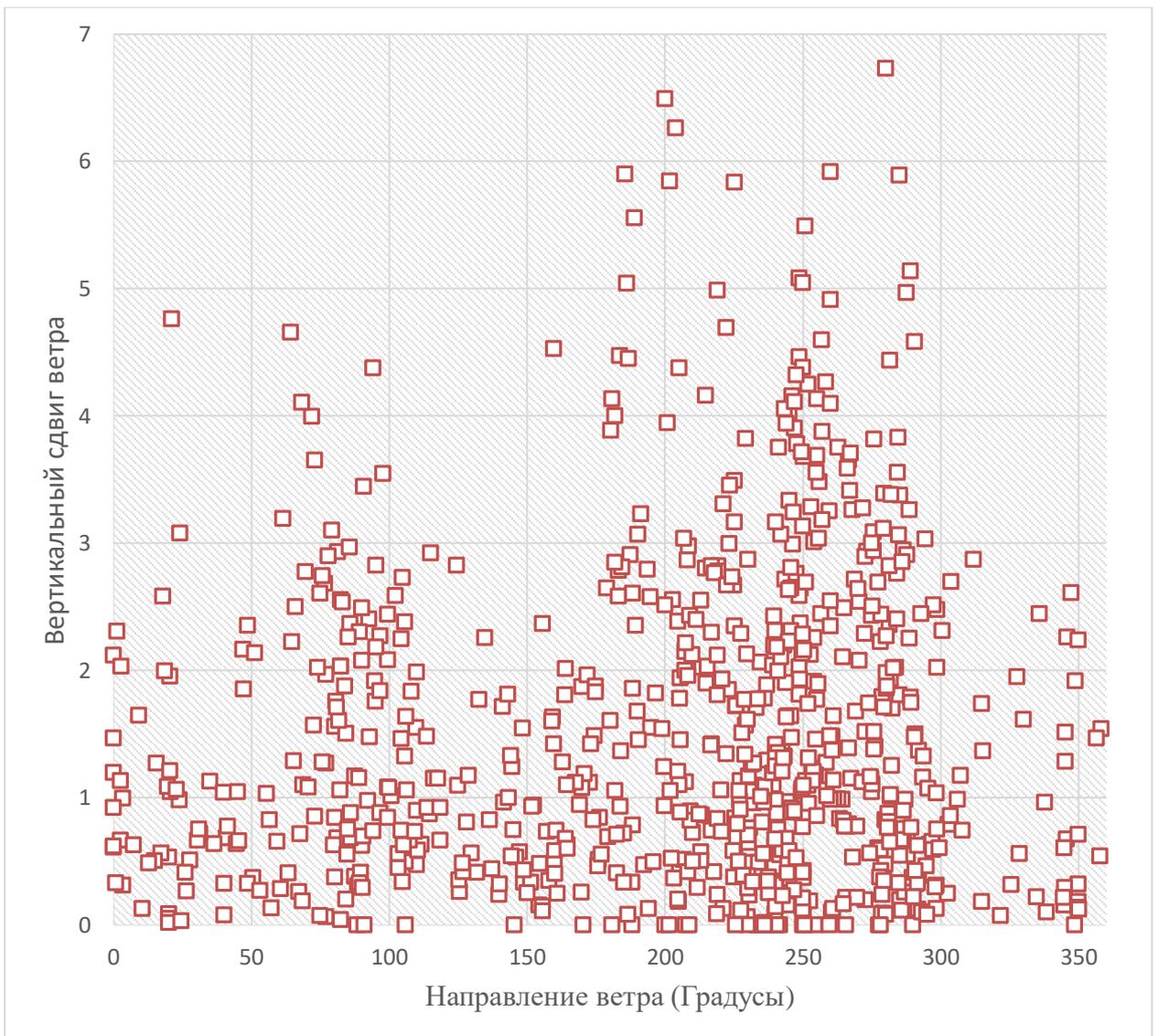


Рис. 3.1.8 Распределение вертикального СВ по направлению ветра для Смоленска за апрель 2022 года.

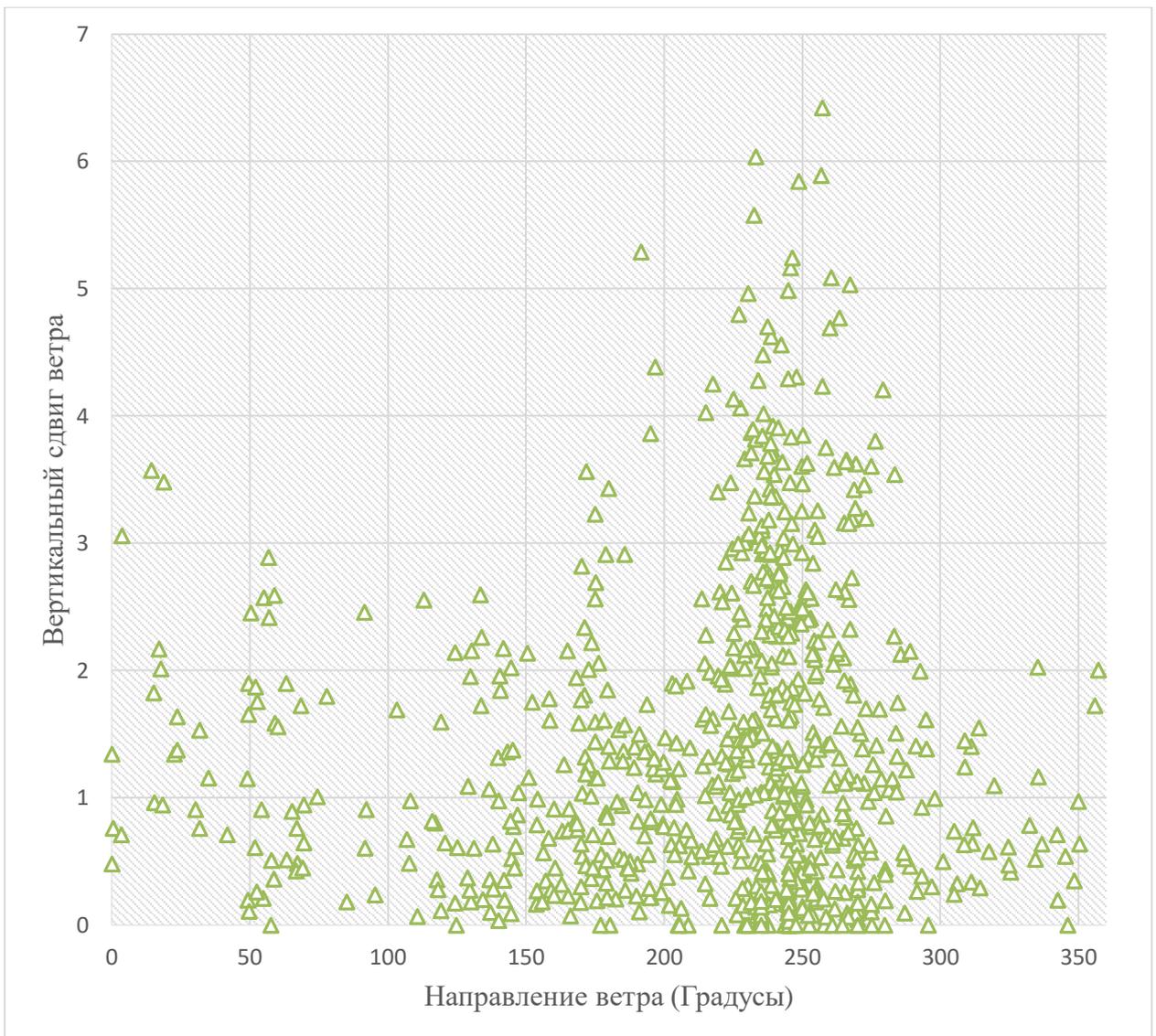


Рис. 3.1.9 Распределение вертикального СВ по направлению ветра для Смоленска за апрель 2022 года.

Для Смоленска, также, как и для Саратова, характерно наибольшее число СВ по направлению 200 до 260 градусов.

Исходя из графиков можно заключить, что самые опасные сдвиги ветра для этих трех станций, приводящие к авариям, приходятся на юго-западное направление и находятся на высотах от 6 км.

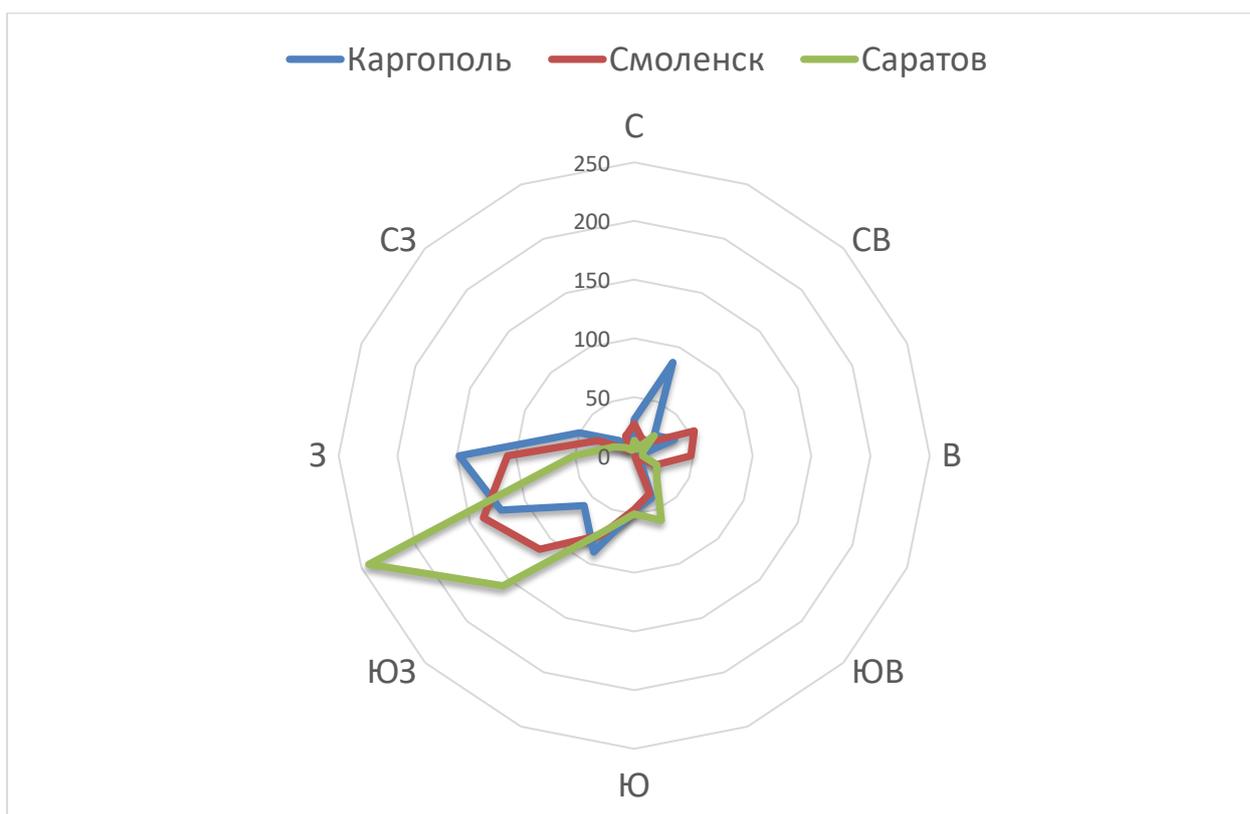


Рис. 3.2 Соотношение повторяемости явления вертикального СВ при различных направлениях ветра.

### 3.2 Повторяемость СВ

Уже по графикам, полученным в предыдущем разделе можно судить о том, что наибольшее число сдвигов принадлежит диапазону от 0 до 1 м/с. Чтобы на качественном уровне оценить, какие сдвиги ветра происходят чаще, нам необходимо разбить все сдвиги на “карманы” чтобы узнать число попаданий в тот или иной диапазон. Построим эти графики (Рис 3.2.1-3.2.3) на основе табличных данных (Таблица 3.1-3.3):

Таблица 3.1 Распределение сдвига ветра в Каргополе по интервалам

Карман (м/с)	Число попаданий
0.03	1
0.27	115
0.51	93
0.75	83

0.99	60
1.23	80
1.47	56
1.71	41
1.95	46
2.19	39
2.43	27
2.67	27
2.91	21
3.15	15
3.39	10
3.63	1
3.87	15
4.11	6
4.35	10
4.59	8
4.83	6
5.07	6
5.31	6
5.55	3
5.79	0
6.03	1
6.27	0

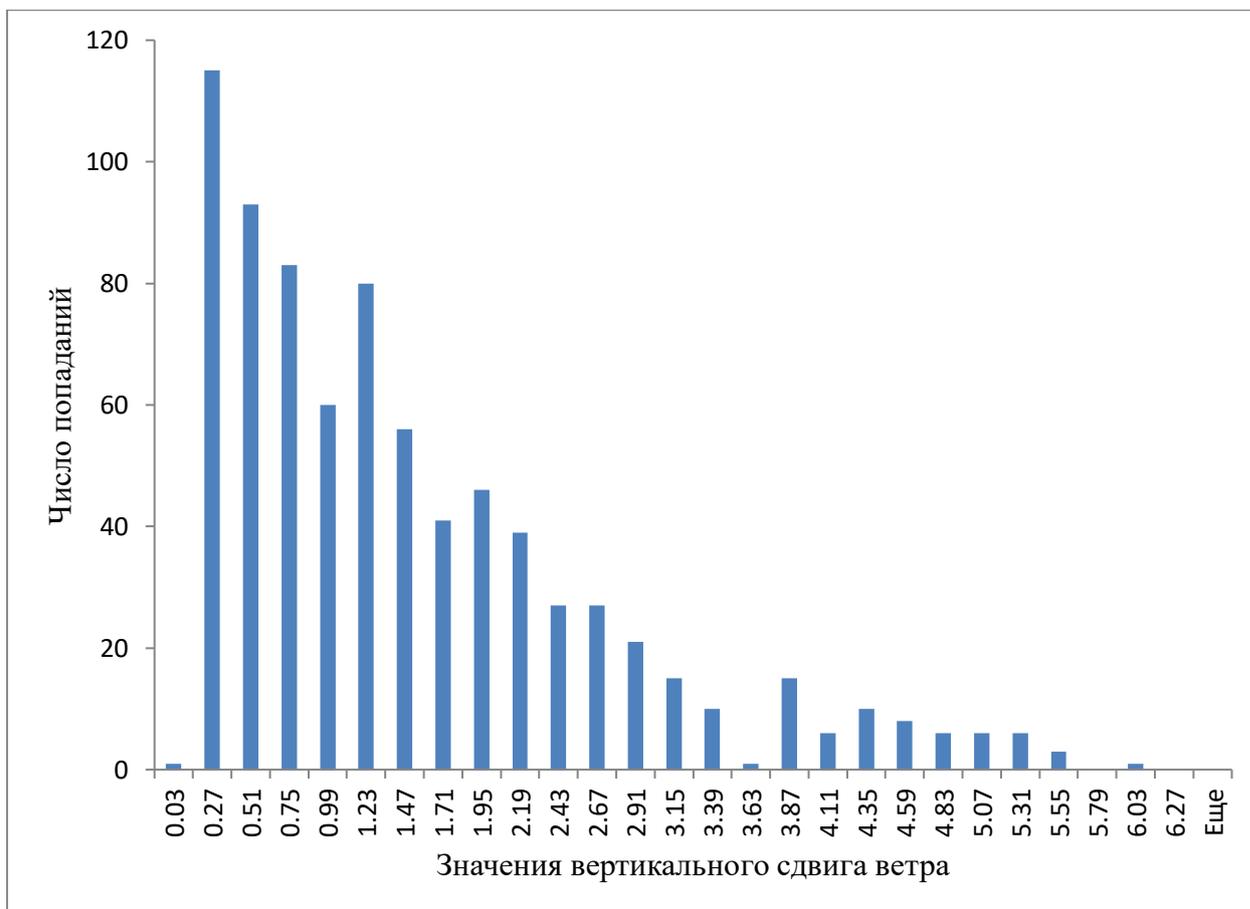


Рис. 3.2.1 График распределения СВ по интервалам Каргополь.

То есть преимущественно, значения СВ в районе станции Каргополь приходятся на диапазон от 0.27 до 0.75 м/с. Большая часть таких ветров располагается до высоты 3 км.

Таблица 3.2 Распределение сдвига ветра в Смоленске по интервалам

Карман (м/с)	Число попаданий
0.03	3
0.27	71
0.51	88
0.75	88
0.99	78
1.23	70
1.47	44
1.71	38
1.95	47
2.19	39
2.43	38
2.67	35

2.91	33
3.15	22
3.39	15
3.63	10
3.87	12
4.11	12
4.35	7
4.59	9
4.83	4
5.07	5
5.31	2
5.55	1
5.79	1
6.03	2
6.27	0

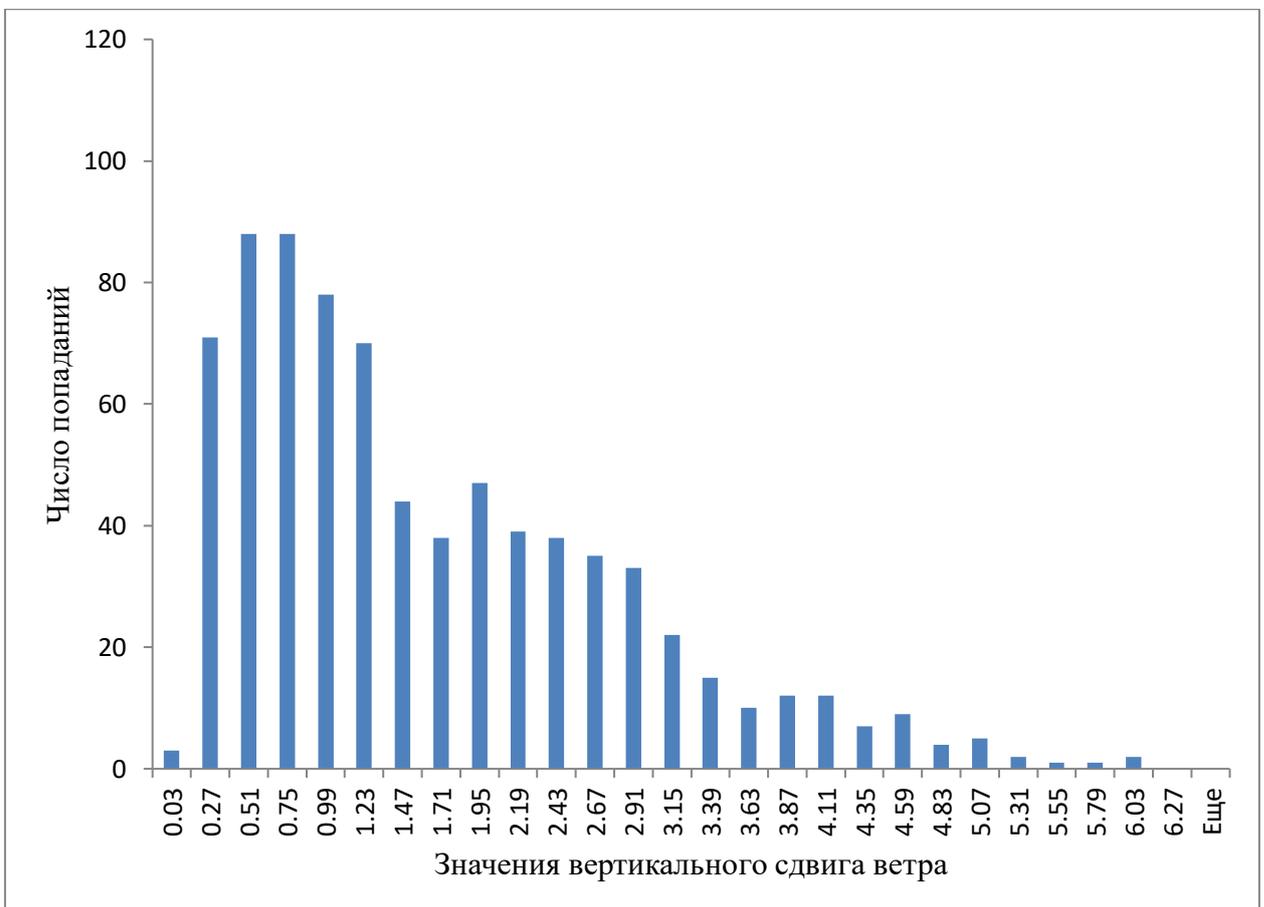


Рис. 3.2.2 График распределения СВ по интервалам Смоленск.

Для Смоленска характерно отсутствие максимума при значении 0.27, но распределение в целом выглядит таким же, как и у Каргополя.

Таблица 3.3 Распределение сдвига ветра в Саратове по интервалам

Карман (м/с)	Число попаданий
0.03	3
0.27	102
0.51	83
0.75	80
0.99	74
1.23	59
1.47	68
1.71	46
1.95	39
2.19	43
2.43	27
2.67	33
2.91	15
3.15	23
3.39	16
3.63	19
3.87	17
4.11	6
4.35	7
4.59	3
4.83	5
5.07	3
5.31	4
5.55	0
5.79	1
6.03	1
6.27	0

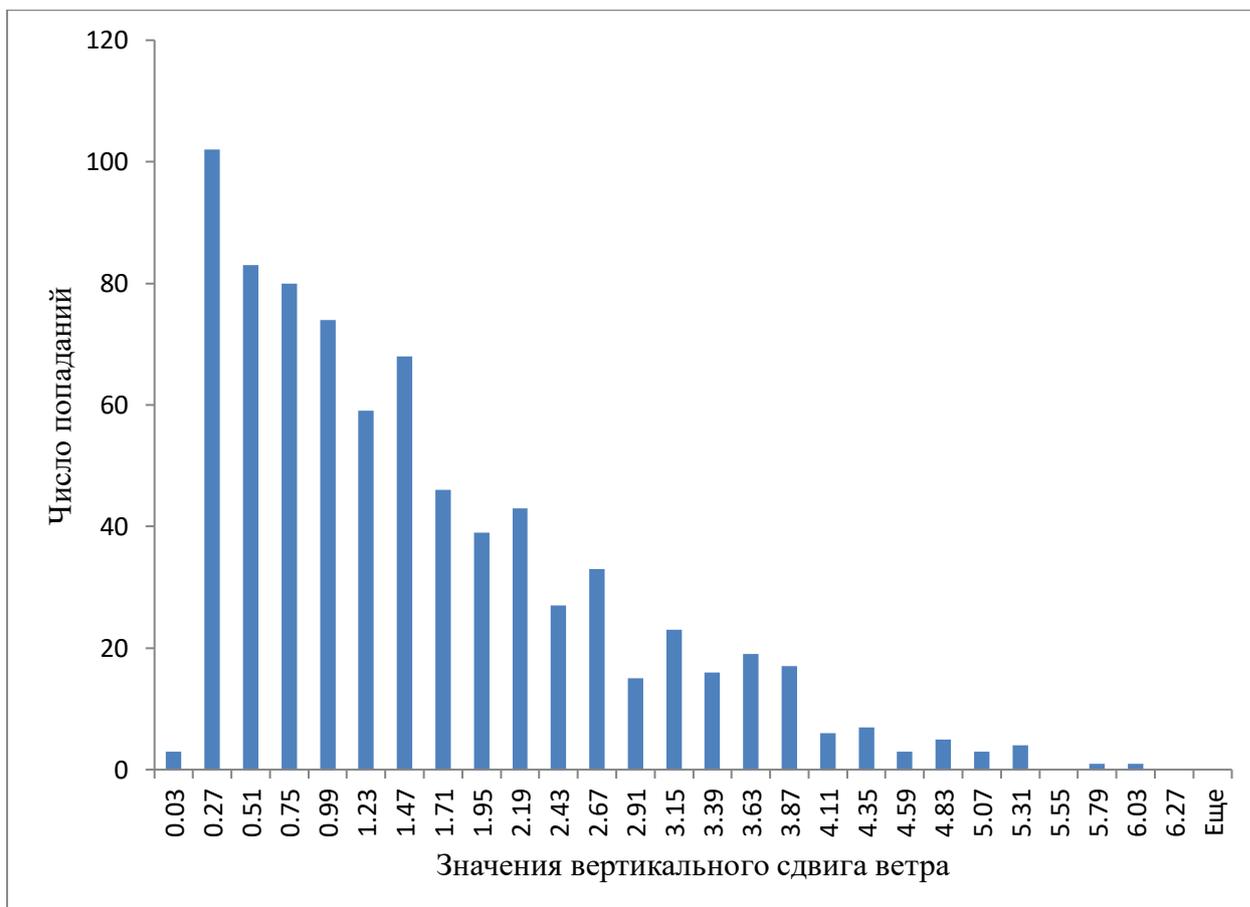


Рис. 3.2.3 График распределения СВ по интервалам Саратов.

Согласно полученным графикам можно судить о закономерности распределения, которое отдаленно напоминает экспоненциальную зависимость, то есть сдвиг ветра в атмосфере в основном является слабым со значениями от 0 до 1 и никакой опасности не представляет. Более детальное распределение СВ, согласно классификации ИКАО рассмотрим в таблице 3:

Таблица 3 Классификация СВ и распределение за апрель 2022 года.

	Слабые (0-2 м/с)	Умеренные (2-4 м/с)	Сильные (4-6 м/с)	Очень сильные (более 6 м/с)
Каргополь	615	146	48	1
Смоленск	546	222	39	1
Саратов	592	188	28	2

Большое число слабых сдвигов характерно для каждого города, умеренные сдвиги больше характерны для Смоленска, а сильные для Каргополя. Очень сильные сдвиги явление редкое, и за апрель 2022 года эти случаи были единичны и наблюдается они лишь на высотах от 5 км.

### 3.3 Статистический и корреляционный анализ вертикальных профилей СВ

Приведем ниже статистический анализ СВ (Также как это было в случае скорости ветра) в таблице 3.4:

Таблица 3.4 Статистический анализ СВ

Каргополь		Смоленск		Саратов	
Среднее (м/с)	1.38	Среднее (м/с)	1.52	Среднее (м/с)	1.42
Стандартная ошибка (м/с)	0.04	Стандартная ошибка (м/с)	0.04	Стандартная ошибка (м/с)	0.04
Медиана (м/с)	1.08	Медиана (м/с)	1.13	Медиана (м/с)	1.11
Мода	0.00	Мода	0.00	Мода	0.00
Стандартное отклонение (м/с)	1.25	Стандартное отклонение (м/с)	1.26	Стандартное отклонение (м/с)	1.21
Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	1.56	Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	1.59	Дисперсия выборки (м/с) <sup>2</sup>	1.46
Эксцесс	1.53	Эксцесс	1.22	Эксцесс	1.01
Асимметричность	1.34	Асимметричность	1.16	Асимметричность	1.13
Интервал	6.06	Интервал	6.26	Интервал	6.42
Минимум (м/с)	0.00	Минимум (м/с)	0.00	Минимум (м/с)	0.00
Максимум (м/с)	6.06	Максимум (м/с)	6.26	Максимум (м/с)	6.42
Сумма	1114.50	Сумма	1226.86	Сумма	1148.21
Счет	810.00	Счет	810.00	Счет	810.00

И также приведем таблицу, содержащую информацию о том, как коррелируют данные станций между собой (Таблица 3.5).

Таблица 3.5 Корреляционный анализ СВ

	<i>Каргополь</i>	<i>Смоленск</i>	<i>Саратов</i>
Каргополь	1		
Смоленск	0.2	1	
Саратов	0.02	0.01	1

### 3.5 Оценка турбулентности по СВ

Турбулентность в работе оценивалась согласно [3] по методу комплекса критериев, среди которых:

- 1) Скорость ветра 25 м/с и более
- 2) ВСВ 10 м/с и более
- 3) ГСВ 5 м/с и более
- 4) Вертикальный сдвиг направления 15° на 1 км
- 5) Вертикальный градиент температуры 7°С на 1 км
- 6) Горизонтальный градиент температуры 2°С на 100 км

Если на высоте полёта выполняются одновременно не менее трех любых критериев, то указывается болтанка. Проанализировав все высоты и оценив все показатели, получаем следующие данные в таблице 3.6:

Таблица 3.6 Количество болтанок для станций К, С, С

Высота (м)	Болтанка		
	Каргополь	Смоленск	Саратов
126	10	6	6
300	3	6	0
500	0	11	1
900	0	2	1
1700	0	1	1

2100	0	1	0
2500	0	1	0
2900	0	2	0
3300	0	1	0
3700	0	1	0
4100	0	2	0
4500	0	2	0
4900	0	6	0
5300	0	5	0
5700	4	5	0
6100	0	9	0
6500	2	8	0
6900	2	10	1
7300	3	8	0
7700	2	12	0
8100	3	8	2
8500	7	8	2
8900	4	10	1
9300	5	7	1
9700	5	8	1
10100	5	4	1
10500	0	0	0
Всего	810	810	810
Число болтанок	57	144	18
Частота	0.0703	0.1777	0.0222
В процентах	7%	18%	2%

Также графически изобразим распределение этих болтанок по высоте на рисунках 3.2.4 – 3.2.6.

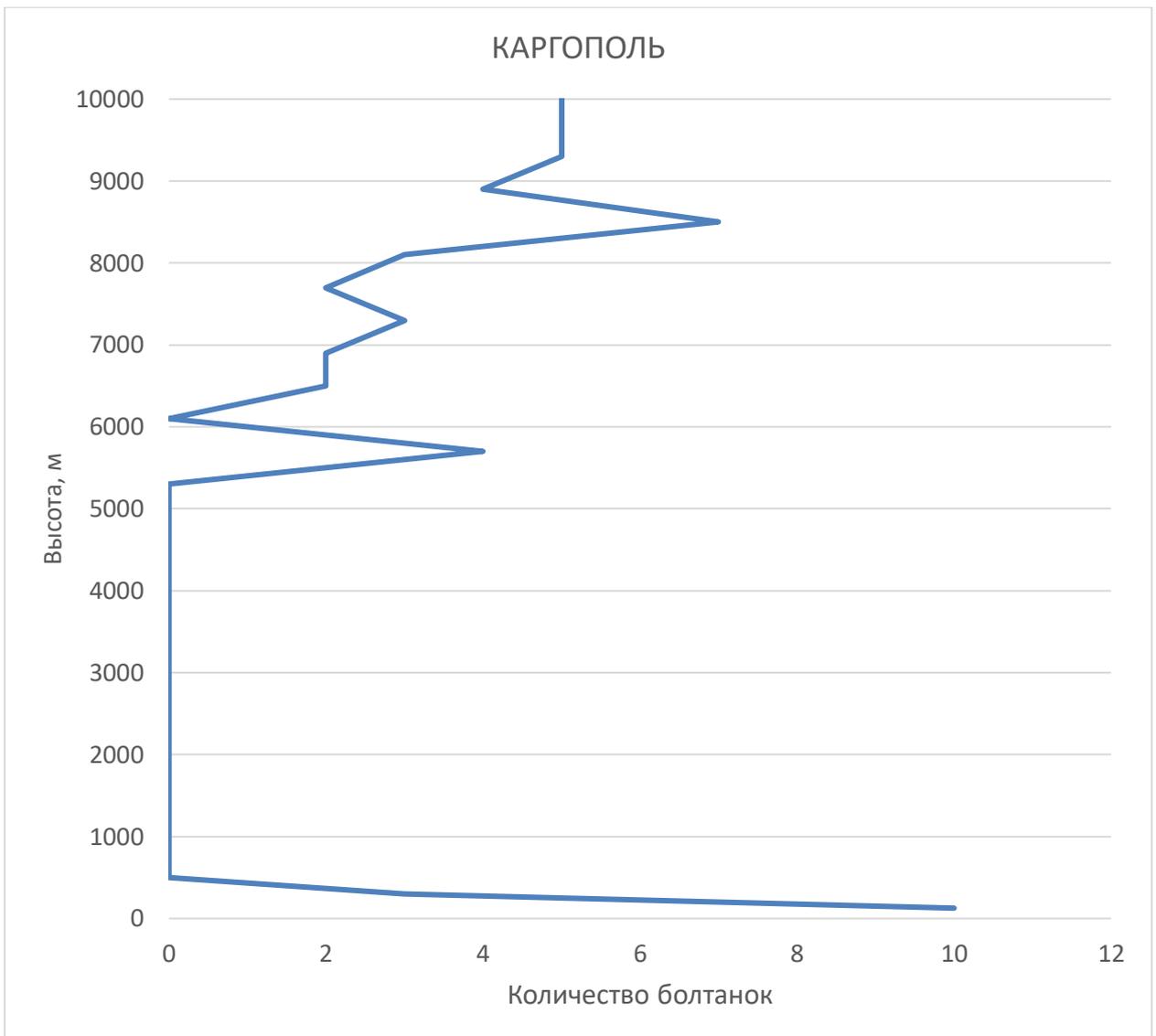


Рис. 3.2.4 Распределение болтанок по высоте для Каргополя

В Каргополе больше болтанок происходит на высоте до 126 метров, на этой высоте происходят посадки/взлёты воздушных судов, и действительно, если на этой высоте значение СВ будет высоким (более 5 м/с) то это может закончиться катастрофой, но на самом деле даже низкое значение СВ бывает причиной аварий.

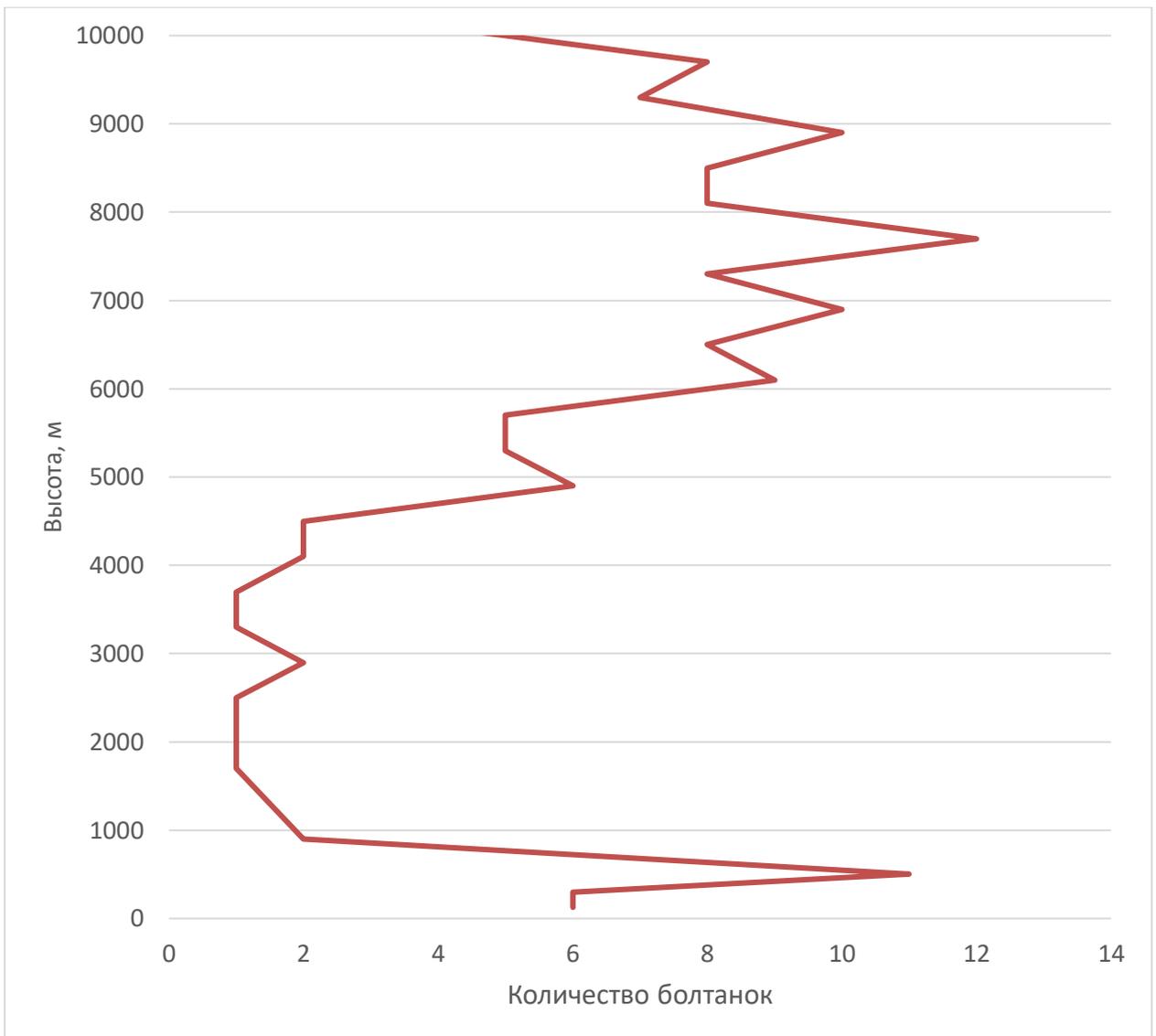


Рис. 3.2.5 Распределение болтанок по высоте для Смоленска

Смоленск с точки зрения турбулентности себя демонстрирует наиболее ярко, от 810 число болтанок составило 18% и их было 144 лишь за один апрель, это больше чем остальные.

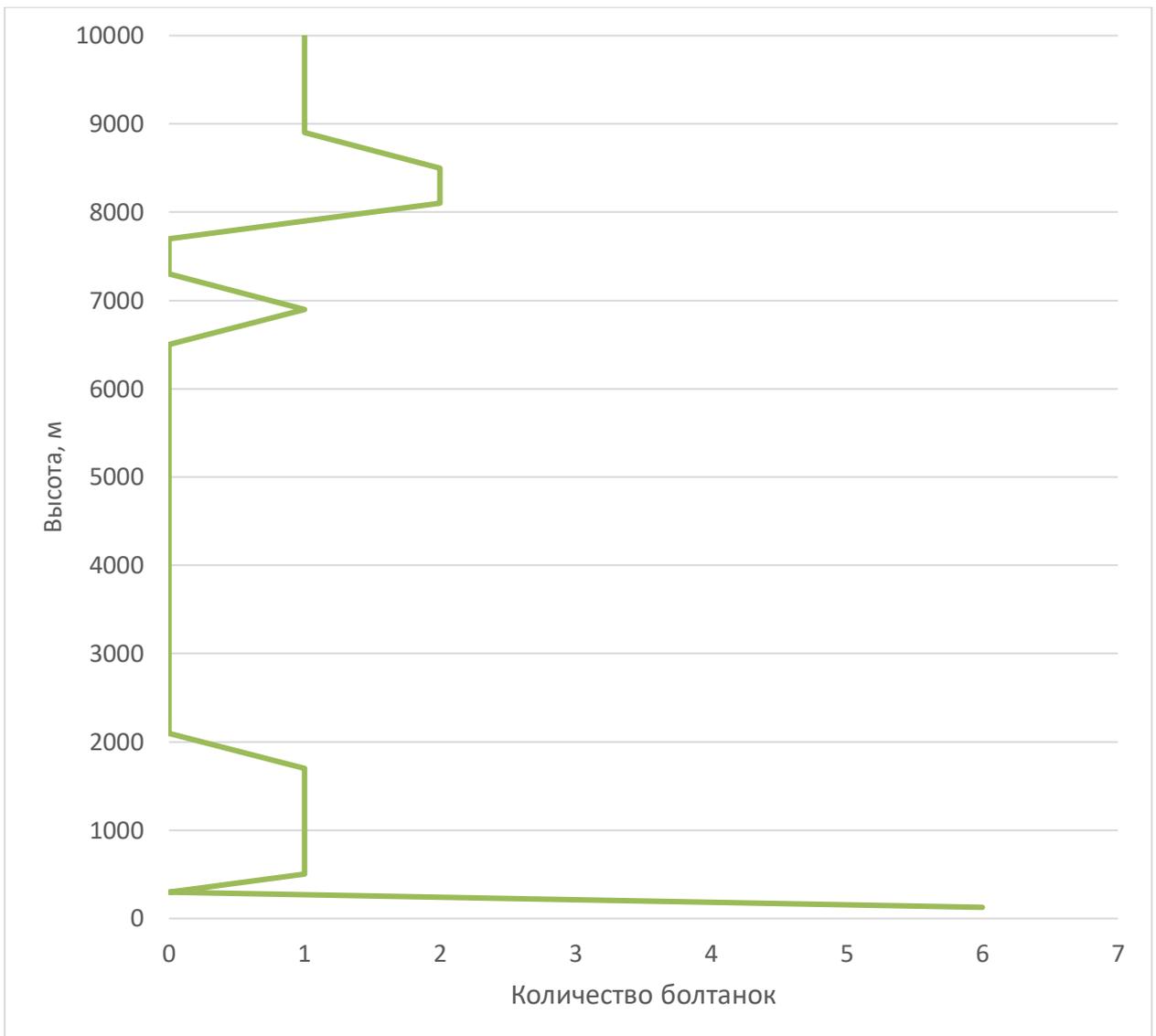


Рис. 3.2.6 Распределение болтанок по высоте для Саратова

Саратов же оказался наиболее спокойным, демонстрируя большое количество болтанок только в приземном слое, и небольшое количество на высоте от 8 до 9 км.

## Заключение

Самые сильные ветра за апрель были в Смоленске. Исходя из классификации СВ, слабый сдвиг примерно одинаков для всех трех станций и для них он преобладает в атмосфере (Около 80% случаев это слабый сдвиг), умеренный сдвиг в меньшей степени проявлялся в Каргополе, для которого сильнее всех характерен сильный сдвиг, а очень сильный сдвиг имел единичные случаи во всех трех городах. Также для всех трех станций мы заключили что самые опасные сдвиги приходятся на юго-западное направление и находятся на высотах от 6 км. Больше всего болтанок в Смоленске (В основном за счет вертикального сдвига направления и за счет градиента температуры), больше всего их было на высоте 7.8 км – 12 за месяц. Для всех трех станций характерно наличие большого числа болтанок на высоте взлёта/посадок самолётов. Из-за чего и возникает вопрос безопасности, для поддержания которой и существуют описанные в работе системы обнаружения СВ и различное бортовое оборудование.

## Список используемой литературы

1. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология – СПб.: Издание РГГМУ, 2006 – 320 с.
2. Баранов О.Г. Авиационная метеорология и физика явлений. СПб.: Гидрометеиздат, 1981 год – 300 с.
3. Воробьев В.И., Синоптическая метеорология – Гидрометеиздат, 1991 – 580 с.
4. Качурин Л.Г. Методы метеорологический измерений – СПб.: Гидрометиоздат, 1985. – 480 с.
5. Наставление по полётам воздушных судов (НПП ГА) – М.: Воздушный транспорт, 1987 г. – 126 с.
6. Пчелко И.Г. Аэросиноптический условия болтанки самолётов в тропосфере. – СПб.: Гидрометиоздат, 1966 – 90 с.
7. Анапольская Л.Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. – СПб.: Гидрометеиздат, 1961. 303 с.