



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)

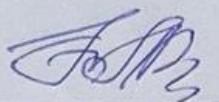
На тему: «Исследование изменчивости параметров ветра по данным аэродромной
станции»

Исполнитель **Скачкова Анна Романовна**
(фамилия, имя, отчество)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой



(подпись)

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

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«» июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение	7
1. Физико-метеорологические условия образования ветра, его классификация и влияние на полет ВС	9
1.1. Факторы формирования ветра	9
1.2. Основные характеристики ветра	18
1.3. Классификация ветра	19
1.4. Влияние ветра на полет ВС	22
2. Методы прогнозирования скорости и направления ветра	26
2.1. Прогноз направления ветра	26
2.2. Прогноз скорости ветра у земли	27
3. Методы измерения скорости и направления ветра на аэродроме	36
3.1. Методы измерения скорости и направления ветра станцией КРАМС-4	32
3.2. Выходные данные канала параметров ветра	31
4. Анализ параметров ветра на аэродроме «Пулково» г. Санкт-Петербург	38
4.1. Характеристика местности	38
4.2. Анализ скорости ветра	39
4.3. Анализ направления ветра	50
Заключение	53

Введение

Безопасность полётов остаётся приоритетной задачей авиации, на которую влияют многочисленные факторы, включая погодные условия, направление и силу ветра. Для обеспечения безопасности специалисты гражданской авиации и метеорологических служб обязаны принимать все необходимые меры предосторожности. Ошибки или недочёты в процессе планирования, сопровождения и выполнения рейсов могут создать значительные угрозы для пассажиров и экипажа.

Как показывает опыт, резкие изменения ветровых характеристик нередко становятся причиной сбоев в расписании рейсов и могут привести к возникновению аварийных ситуаций. Особенно опасен сдвиг ветра на этапах взлёта и посадки, так как он существенно повышает вероятность потери управления самолётом. Подобные метеоявления способны дезориентировать пилотов и усложнить управление, создавая риски для безопасности полётов.

Для минимизации этих рисков необходимо учитывать все возможные угрозы, связанные с погодными условиями, и разрабатывать соответствующие меры предотвращения. Современные самолёты и системы управления воздушным движением оснащены передовыми навигационными и электронными приборами, которые позволяют выполнять рейсы даже в сложных метеоусловиях. Однако взлёт и посадка по-прежнему остаются наиболее ответственными и уязвимыми этапами полёта.

Ветер оказывает значительное влияние на все типы воздушных судов, так как его параметры напрямую воздействуют на безопасность взлёта и посадки. Он также влияет на такие аспекты, как длина разбега и пробега, а боковой ветер может привести к отклонению самолёта от траектории. Кроме того, ветер способен вызывать опасные погодные

явления, такие как штормы, ураганы, пыльные бури или метели, которые существенно затрудняют выполнение полётов.

При выборе взлётно-посадочной полосы на аэродроме основное внимание уделяется доминирующему направлению ветра. Анализ климатической информации позволяет сотрудникам аэропортов и метеослужб составлять точные прогнозы, необходимые для создания безопасных условий полётов. Использование метеоданных помогает оперативно корректировать планы взлётов и посадок, а также снижать риски, связанные с ветровыми условиями. Это обеспечивает безопасность всех воздушных судов в различных погодных условиях. Учёт климатических факторов играет ключевую роль в повышении безопасности, регулярности и экономичности полётов, а также в эффективном планировании и метеорологическом сопровождении рейсов.

1. Физико-метеорологические условия образования ветра, его классификация и влияние на полет ВС

1.1. Факторы формирования ветра

Рассмотрим ключевые механизмы, влияющие на возникновение ветра, с акцентом на их особенности.

1. Механизм образования ветра у поверхности Земли

В атмосфере каждая частица воздуха, представляющая собой определённую массу, испытывает воздействие различных сил, которые условно делятся на две категории: внешние и внутренние. К внешним относятся сила тяжести, сила Кориолиса и центробежная сила, которые действуют на частицу независимо от её окружения. Внутренние силы, такие как сила барического градиента и сила трения, проявляются через взаимодействие с соседними воздушными массами.

Сила тяжести, создающая ускорение свободного падения, не оказывает прямого влияния на формирование ветровых потоков, так как уравнивается силой барического градиента. Ветер представляет собой горизонтальное перемещение воздуха относительно земной поверхности, вызванное преимущественно действием силы горизонтального барического градиента (G). Эта сила возникает из-за неравномерного распределения атмосферного давления: воздушные массы движутся из областей высокого давления в зоны с пониженным. Рассчитать её можно по формуле:

$$G = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха;

где:

ρ – плотность воздуха;

$\Delta P/\Delta S$ – горизонтальный барический градиент, отражающий изменение давления на единицу расстояния по горизонтали;

P – атмосферное давление;

S – расстояние по горизонтали.

Сила Кориолиса (A), обусловленная вращением Земли, является отклоняющей силой, действующей перпендикулярно направлению движения воздуха. Она начинает действовать, как только воздух приходит в движение под влиянием барического градиента. В Северном полушарии эта сила отклоняет движение вправо, а в Южном – влево, под углом 90° . Её величина определяется по формуле:

$$A = 2\omega \sin\varphi U, \quad (2)$$

где:

ω – угловая скорость вращения Земли;

φ – географическая широта;

U – скорость ветра.

На полюсах сила Кориолиса достигает максимума (2ω), уменьшаясь по мере приближения к экватору, где её значение равно нулю.

Сила трения возникает при контакте воздушных масс с поверхностью Земли, препятствуя их движению и направлена противоположно вектору скорости. Её значение определяется по формуле:

$$F_{\text{тр}} = -kU, \quad (3)$$

где U – скорость ветра;

k – коэффициент трения, который характеризует неровность (шероховатость) подстилающей поверхности.

Сила трения значима только в пограничном слое атмосферы и уменьшается с высотой, становясь практически нулевой на уровне, где

влияние поверхности минимально. По мере увеличения высоты скорость ветра возрастает, а его направление совпадает с изогипсами.

Центробежная сила (C) проявляется при движении воздуха по криволинейной траектории и направлена от центра вращения вдоль радиуса кривизны. Её значение рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{U^2}{r}, \quad (4)$$

где U – скорость ветра;

r – радиус кривизны траектории.

Однако существует случай, когда данной силой можно пренебречь: при условии, если радиус ≥ 1000 км, то величина центробежной силы намного меньше силы барического градиента и силы Кориолиса.

2. Ветер в свободной атмосфере

В пограничном слое атмосферы сила трения играет значительную роль, но в свободной атмосфере её влияние отсутствует, что приводит к формированию градиентного ветра. Этот тип ветра характеризуется движением воздуха вдоль изобар, где направление в каждой точке совпадает с касательной к изобаре. Иными словами, градиентный ветер — это устойчивое движение воздуха без участия силы трения.

Особый случай градиентного ветра возникает, когда центробежная сила равна нулю, а изобары и изогипсы имеют прямолинейную форму. Такой ветер называется геострофическим. Геострофический ветер представляет собой стабильное, неизменное во времени и пространстве горизонтальное движение вдоль прямолинейных изобар. Основное различие между градиентным и геострофическим ветром заключается в том, что первый возможен вдоль криволинейных изобар, а второй — только вдоль прямолинейных.

Геострофический ветер формируется под действием двух уравновешивающих друг друга сил: силы барического градиента и силы

Кориолиса. При этом движение вдоль изобар организовано так, что область низкого давления находится слева от направления ветра, если стоять лицом по потоку.

Скорость геострофического ветра определяется по картам абсолютной барической топографии (в км/ч) с использованием формулы:

$$U_g = 100 / (\sin(\varphi) * \Delta n) \quad (5)$$

где:

Δn — расстояние (в сотнях километров) между изогипсами, проведёнными через 4 геопотенциальных декаметра;

φ — географическая широта.

При наличии центробежной силы градиентный ветер трансформируется в геоциклострофический. Он возникает в результате взаимодействия трёх сил: барического градиента, Кориолиса и центробежной. Такой ветер характерен для циклонов и антициклонов. В циклоне сила барического градиента уравнивается совместным действием силы Кориолиса и центробежной силы, что приводит к движению воздуха против часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой стрелке в Южном. В антициклоне ситуация обратная: сила Кориолиса уравнивается суммой сил барического градиента и центробежной, а движение воздуха происходит по часовой стрелке в Северном полушарии и против часовой в Южном.

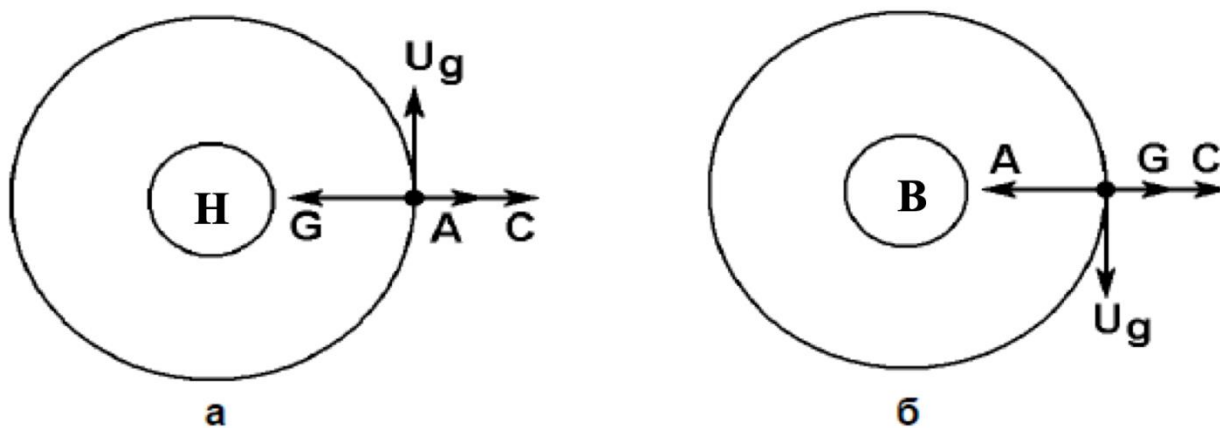


Рисунок 1.1 – Градиентный ветер в циклоне (а) и антициклоне (б) в северном полушарии

Следует отметить, что если в этих двух воздушных массах горизонтальный барический градиент одинаков, то скорость градиентного ветра в циклоне меньше, чем в антициклоне. Но разница в барических градиентах обеих масс все же существует – в антициклоне он как правило не превышает 1 гПа на 100 км, а в циклоне может достигать более 8 гПа на 100 км. Значит, мы можем судить о том, что скорость ветра в циклонах обычно больше, чем в антициклонах. [5]

3. Ветер в пограничном слое атмосферы

В пограничном слое атмосферы при отсутствии центробежной силы и при установившемся горизонтальном движении воздуха сила барического градиента уравнивается суммарным действием сил Кориолиса и трения. Наличие силы трения в этом слое приводит к отклонению ветра от направления изобар. В Северном полушарии ветер поворачивает влево, то есть против часовой стрелки. На приземных картах погоды изобары ориентированы так, что область низкого давления находится слева от направления ветра, а область высокого давления — справа. Угол отклонения ветра от изобары составляет около 30° над сушей и примерно

20° над морем, что объясняется различием в коэффициенте трения: над сушей он выше, чем над морем.

В циклоне (см. рис. 1.2а) сила барического градиента уравнивается совместным действием сил Кориолиса, трения и центробежной силы. Это выражается формулой:

$$G = A + F_{\text{тр}} + C, \quad (6)$$

где:

G — сила барического градиента;

A — сила Кориолиса;

$F_{\text{тр}}$ — сила трения;

C — центробежная сила.

В антициклоне (см. рис. 1.2б) равнодействующая сил барического градиента и центробежной силы уравнивается суммой сил Кориолиса и трения, что описывается формулой:

$$G + C = A + F_{\text{тр}}, \quad (7)$$

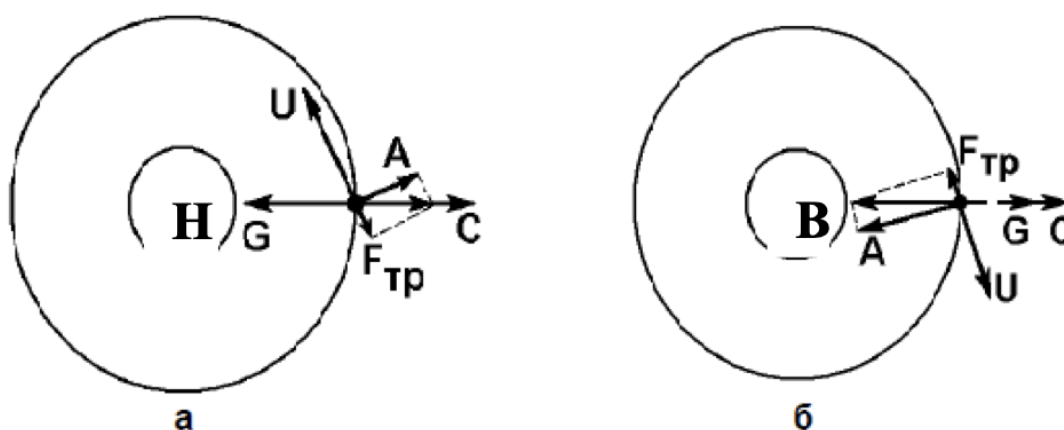


Рисунок 1.2 – Ветер в слое трения в циклоне (а) и антициклоне (б) в северном полушарии

В свободной атмосфере изобары совпадают с линиями тока, что означает, что ветер в каждой точке направлен по касательной к этим линиям. В пограничном слое атмосфера такого соответствия нет из-за влияния силы трения. Линия тока — это траектория, вдоль которой ветер движется касательно в каждой своей точке.

В циклоне центр представляет собой область сходимости воздушных потоков, где воздух устремляется к центру, вызывая восходящие движения. Это способствует формированию облаков и осадков. В антициклоне, напротив, центр является зоной расходимости, где воздух расходится от центра, формируя нисходящие потоки. Такие движения приводят к рассеиванию облаков и прояснению погоды.[8]

4. Влияние силы трения на ветер в пограничном слое атмосферы

Сила трения в пограничном слое атмосферы оказывает наибольшее влияние на ветер вблизи подстилающей поверхности, особенно в приземном слое до высоты около 50 м. Здесь ветер значительно отклоняется влево от изобары (в Северном полушарии) под действием трения. С увеличением высоты влияние силы трения уменьшается, что приводит к сокращению угла отклонения ветра от изобары. На верхней границе пограничного слоя, где трение практически отсутствует, угол отклонения приближается к нулю, и ветер становится близким к градиентному.

В слое трения с высотой изменяются как направление, так и скорость ветра. Направление ветра постепенно приближается к направлению изобары, а скорость увеличивается. Обычно наблюдается правое вращение ветра с высотой (по часовой стрелке в Северном полушарии), что обусловлено уменьшением влияния трения и изменением барического поля с высотой. Однако в редких случаях возможно левое вращение или сохранение направления ветра, что связано с быстрыми изменениями барического поля.

Наглядное представление этих процессов даёт спираль Экмана (см. рис. 1.3), которая иллюстрирует изменение направления и скорости ветра с высотой. Спираль строится на основе двух составляющих ветра — U и V , где V_0 обозначает действительный ветер, а V_g — геострофический ветер.

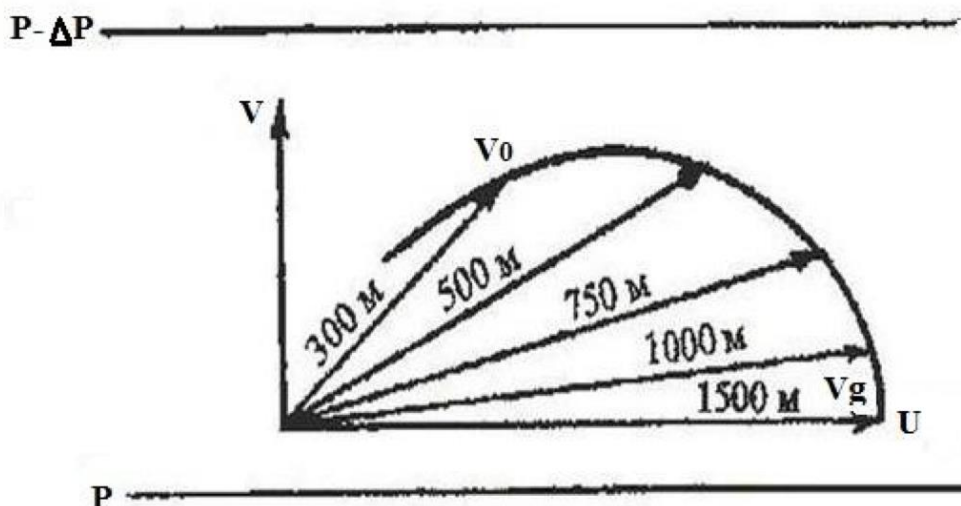


Рисунок 1.3 – Спираль Экмана

Скорость приземного ветра над сушей имеет суточный ход с минимумом в послеполуденные часы и максимумом утром или ночью. На высоте около 500 м суточный ход ветра приобретает обратный характер: максимум скорости наблюдается днём, а минимум — ночью. Основная причина — суточный ход турбулентного обмена, который днём сильнее, чем ночью. Днём турбулентность увеличивает скорость ветра в нижней части пограничного слоя и уменьшает её в верхней. Ночью, при ослаблении турбулентного обмена, скорость ветра в нижней части слоя снижается, а в верхней — возрастает.

Суточный ход также проявляется в направлении ветра. Днём скорость приземного ветра увеличивается, сопровождаясь правым вращением (по часовой стрелке в Северном полушарии), так как направление ветра приближается к изобарам, соответствуя ветру в верхней части слоя трения. Ночью скорость ветра уменьшается, и наблюдается

левое вращение, вызванное отклонением ветра от изобар из-за ослабления турбулентности. Основной фактор этих изменений — суточные вариации турбулентного обмена.[5]

5. Термический ветер

В слое атмосферы толщиной z горизонтальное изменение температуры воздуха вызывает появление силы барического градиента и градиентного ветра на верхней границе слоя. Это объясняется тем, что в тёплом воздухе давление уменьшается с высотой медленнее, чем в холодном.

Термический ветер — это приращение геострофического ветра при переходе между высотами. Он не связан с реальным движением воздуха, а определяется горизонтальным градиентом температуры в слое атмосферы. Термический ветер направлен вдоль изотерм средней температуры слоя $\nabla T_{\text{ср}}$, при этом холодный воздух располагается слева, а тёплый — справа (в Северном полушарии). Скорость термического ветра определяется по формуле 8:

$$U_t = \frac{gz}{2\omega \sin \varphi} * \frac{\Delta T_{\text{ср}}}{\Delta n} \quad (8)$$

где $\Delta T_{\text{ср}}$ — средняя температуры воздуха в слое высотой z ;

n — расстояние по горизонтали;

g — ускорение силы тяжести;

ω — угловая скорость;

φ — широта;

$\Delta T_{\text{ср}}/\Delta n$ — горизонтальный градиент температуры в слое.

Теоретически, чем больше горизонтальный градиент температуры и толщина слоя z , тем выше скорость термического ветра. В атмосфере сильные ветры со скоростью более 30 м/с, называемые струйными

течениями, возникают в зонах значительных горизонтальных градиентов температуры. [9]

1.2. Основные характеристики ветра

Направление ветра:

В метеорологии — направление, откуда дует ветер (метеорологический ветер). В авиации — направление, куда дует ветер (навигационный ветер). Измеряется оно относительно географического меридиана.

- На метеостанциях: высота измерения — 8 м над поверхностью.
- На аэродромах: высота 6–10 м над взлётно-посадочной полосой (ВПП). Точность на аэродромах: по скорости — до 1 м/с, по направлению — до 10°.

Скорость ветра:

Единицы измерения: метры в секунду (м/с, MPS), километры в час (км/ч, КМН), узлы (КТ) или условные единицы.

На приземных картах погоды, в сводках METAR и SPECI указывается фактический истинный ветер с периодом осреднения 10 мин.

В прогнозах TAF — прогностический истинный ветер.

Мгновенный ветер измеряется анеморумбометрами с периодом осреднения 2–3 с.

Порыв ветра: если мгновенная скорость превышает среднюю на 5 м/с и более, указывается как максимальный ветер в METAR и местных сводках.

Порывистость и турбулентность:

- Порывистость отражает турбулентность в атмосфере, связанную с вихревым движением воздуха.
- Колебания скорости и направления ветра происходят вокруг среднего значения.
- Сила порывов указывает на степень атмосферной турбулентности.

Изменчивость ветра:

Ветер меняется в пространстве и времени. При высокой скорости ветра: направление более стабильно, скорость более изменчива. При низкой скорости ветра: направление менее стабильно, скорость менее изменчива.

Обозначение на картах погоды:

Ветер обозначается стрелками (направление истинного ветра) и оперением (скорость).

Оперение:

- Малое перо: 2,5 м/с или 10 км/ч.
- Большое перо: 5 м/с или 18 км/ч.
- Флажок/вымпел: 25 м/с или 93 км/ч.

1.3. Классификация ветра

Для оценки скорости ветра используется шкала Бофорта — 12-балльная система, принятая Всемирной метеорологической организацией (табл.1.1). Она основана на визуальной оценке воздействия ветра на наземные объекты или волнение в открытом море. Средняя скорость ветра определяется на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью.

Шкала разработана английским адмиралом Фрэнсисом Бофортом в 1806 году. Признана в международной синоптической практике с 1874 года. Изначально не включала указание скорости ветра и имела меньше баллов, но позже была усовершенствована.

Применение:

- Шкала позволяет классифицировать ветер по его силе (от 0 до 12 баллов) на основе визуальных признаков, таких как движение листвы, дыма, волн или повреждения объектов.
- Используется в метеорологии для приближенной оценки скорости ветра.

Таблица 1.1

Перевод скорости ветра из шкалы Бофорта в скорость ветра (м/с)

Балл	Название	Скорость ветра в м/с
0	Штиль	0-0,2
1	Тихий ветер	0,3-1,5
2	Легкий ветер	1,6-3,3
3	Слабый ветер	3,4-5,4
4	Умеренный ветер	5,5-7,9
5	Свежий ветер	8,0-10,0
6	Сильный ветер	10,1-13,8
7	Крепкий ветер	13,9-17,1
8	Очень крепкий ветер	17,2-20,7
9	Шторм	20,8-24,4
10	Сильный шторм	24,5-28,4
11	Жестокий шторм	28,5-32,6
12	Ураган	Более 32,6

Так же существуют формулы (9,10), полученные опытным путем, для перевода скорости ветра в баллах в скорость ветра в метрах:

$$U = 2B - 1, \quad (9)$$

Где U – скорость ветра в метрах в секунду (м/с);

B – балл по шкале Бофорта.

Данная формула справедлива для значения $B \leq 8$.

Для перевода скорости ветра в узлы используется формула (10):

$$U = 1,87\sqrt{B^3}, \quad (10)$$

Однако, стоит заметить, что данную формулу, в отличие от предыдущей, можно использоваться уже для всей шкалы.

Классификация и единицы измерения ветра.

Международная организация гражданской авиации – МОГА (или International Civil Aviation Organization ICAO за рубежом) рекомендует использовать километры в час (км/ч) для измерения скорости ветра, как у земли, так и на высотах. Но в настоящее время распространение получили немного другие единицы измерения: у земли это метры в секунду (м/с) или узлы (КТ) (особенно при визуальных судовых наблюдениях), а на высотах - километры в час (км/ч). Направление ветра измеряется в угловых градусах относительно истинного меридиана.

Местные ветры характерны для определённых местностей, зависят от физико-географических и термических условий. Основные виды местных ветров в России:

Бриз: Возникает у берегов водоёмов (моря, озёра, крупные реки).

Дневной (морской): с моря на сушу, начинается в 10–11 утра, распространяется до 40 км вглубь континента.

Ночной (береговой): с суши на море, начинается после заката, распространяется до 10 км в море.

Горно-долинный ветер: Характерен для горных систем, связан с циркуляцией воздуха между долиной и хребтом.

Днём: из долины вверх по нагретому склону.

Ночью: вниз по склону.

Наиболее выражен в ясную летнюю погоду.

Бора: Холодный, сильный ветер с прибрежных невысоких гор на море.

Распространяется на несколько километров в море, а вдоль побережья — до десятков километров.

Вызывает значительное понижение температуры.

Фен: Тёплый, сухой, часто порывистый ветер с гор.

Наветренная сторона хребта: облачность, осадки, плохая видимость.

Подветренная сторона: сухая, малооблачная погода.

Характерен для Закавказья, Северного Кавказа, Средней Азии.

Афганец: Жаркий, пыльный ветер южного/юго-западного направления.

Значительно ухудшает видимость, влияет на полёты воздушных судов, особенно на взлёт и посадку.

Местные ветры оказывают значительное воздействие на метеорологические параметры и авиационные операции. Требуют учёта при планировании полётов из-за изменений видимости, температуры и турбулентности. [1]

1.4. Влияние ветра на полет ВС

1. Влияние ветра на взлёт и посадку самолётов

Самолёты предпочтительно взлетают и садятся против ветра, что обусловлено принципами аэродинамики. Подъёмная сила, необходимая для отрыва или контролируемой посадки, определяется формулой:

$$Y = c_y S (\rho V)^2 / 2, \quad (11)$$

где:

Y — подъёмная сила (Н);

c_y — коэффициент подъёмной силы (безразмерная величина, зависит от профиля крыла и угла атаки);

S — площадь крыла (м^2);

ρ — плотность воздуха (кг/м^3);

V — скорость воздушного потока относительно самолёта (м/с).

Скорость потока V зависит от скорости самолёта и рассчитывается по формуле:

- При встречном ветре: $V = V_{с-та} + U$, (12)

- При попутном ветре: $V = V_{с-та} - U$, (13)

Взлёт против ветра

Встречный ветер увеличивает скорость обтекания крыла, позволяя достичь подъёмной силы для взлёта при меньшей скорости относительно земли:

$$V_{с-та} = V_{отр} - U \quad (14)$$

Это сокращает длину разбега, что особенно важно для аэродромов с короткими ВПП. Например, при ветре 10 м/с самолёт может взлететь с разбега на 15–20% короче, чем в штиль.

Посадка против ветра

Встречный ветер снижает скорость самолёта относительно земли при посадке, уменьшая длину пробега и повышая управляемость. Это критично для безопасности на сложных аэродромах.

Попутный ветер

При попутном ветре для достижения необходимой подъёмной силы требуется большая скорость самолёта, что увеличивает длину разбега и пробега. Это может привести к рискам, таким как выкатывание за ВПП.

Здесь можно сделать вывод: ветер существенно влияет на длину и время разбега/пробега. Игнорирование его направления и силы снижает безопасность и эффективность взлёта и посадки. [2]

2. Струйные течения и условия полётов

Исследование струйных течений (СТ) началось с развитием метеорологии в XX веке. Послевоенные технологии, включая радиозонды, авиационные полёты и космические аппараты, выявили узкие зоны быстрого переноса воздуха в верхней тропосфере и нижней стратосфере со скоростями свыше 30 м/с. Эти зоны, названные струйными течениями,

формируются в областях резких перепадов давления и температуры, характерных для высотных фронтальных зон. Для анализа СТ наиболее информативна метеокарта АТ300, отображающая данные на высоте около 9–10 км.

Характеристики СТ:

Скорости на оси СТ достигают 100 м/с и более.

Градиенты скорости:

- Вертикальные: 5–10 м/с на 1 км высоты.
- Горизонтальные: от 10 м/с на 100 км.

Турбулентность: максимальна вблизи оси СТ, создавая очаговые зоны сильной болтанки.

Мезоструи: локальные ветровые изменения на высотах набора или снижения, влияющие на траекторию.

СТ оказывают двойственное воздействие на полёты:

Положительное: попутные СТ сокращают время полёта и расход топлива (до 15–20% экономии на дальних маршрутах).

Отрицательное:

- Сильная турбулентность угрожает комфорту и безопасности.
- Снос самолёта при пересечении СТ под большим углом.
- Мезоструи на этапах манёвров (набор высоты, снижение, заход на посадку) могут вызвать отклонения от курса.

Ввиду этого следует избегать полётов в СТ при встречном ветре или высокой турбулентности, пересекать СТ под минимальным углом для снижения воздействия турбулентности, а также учитывать мезоструи на критических этапах полёта, чтобы предотвратить резкие изменения траектории.

3. Влияние сдвига ветра на полёты

Сдвиг ветра — это резкое изменение скорости или направления ветра в горизонтальной или вертикальной плоскости. Его воздействие на

самолёт зависит от характера изменений: резкое усиление *встречного* ветра вызывает «подбрасывание» самолёта, а уменьшение его скорости ветра приводит к «проваливанию». Усиление *попутного* ветра, наоборот, может вызвать «проваливание», а его ослабление создаёт эффект «подбрасывания».

Боковой сдвиг заставляет самолёт крениться и разворачиваться в сторону ветра, вызывая снос от траектории. Это не влияет на воздушную скорость или высоту, но изменяет курс и положение.

Сдвиг ветра особенно опасен на малых высотах, где времени на коррекцию мало. Боковой сдвиг может привести к выкатыванию за пределы ВПП или отклонению от безопасного сектора набора высоты.

При сильном сдвиге ветра пилотам рекомендуется уходить на второй круг для обеспечения безопасности.

Сдвиг ветра относится к опасным метеоявлениям. Информация о нём оперативно передаётся экипажам для корректировки манёвров. Пилотам следует внимательно анализировать метеосводки перед взлётом и посадкой, быть готовыми к немедленной реакции на изменения ветра, особенно на малых высотах.

Струйные течения и сдвиги ветра требуют тщательного учёта при планировании и выполнении полётов. Их правильное использование повышает эффективность, но недооценка рисков может привести к серьёзным последствиям [6]

2. Методы прогнозирования скорости и направления ветра

2.1. Прогноз направления ветра

Для прогнозирования направления ветра используется синоптический метод, основанный на анализе атмосферных процессов с помощью синоптических карт: приземных, абсолютной топографии (АТ), относительной топографии (ОТ), а также аэрологических диаграмм и вертикальных разрезов атмосферы.

Синоптик оценивает и прогнозирует синоптическую ситуацию в районе аэродрома, определяя преобладающее направление ветра.

Для точной оценки встречной или попутной составляющей скорости ветра, а также боковой составляющей U_{bk} , направление ветра в авиационных прогнозах указывается:

- По восьми румбам с точностью до десятков градусов.
- С использованием графиков (см. рис. 2.1), где:

Вертикальная ось — скорость ветра u , (м/с).

Боковые оси — угол между направлением ветра и ВПП β , (градусы).

Горизонтальная ось — боковая составляющая скорости ветра U_{bk} , (м/с).

Боковая составляющая рассчитывается как для прогнозного, так и для фактического ветра, измеренного на АМСГ.

Краткосрочные прогнозы (до 12 часов) вместо прогноза направления ветра всё чаще стали заменять его диагнозом на основе текущих данных.

Крупные прогностические центры применяют компьютерные программы, основанные на физических уравнениях и актуальных метеоданных.

Результаты оформляются в виде карт температуры и ветра на разных высотах.

Прогноз направления ветра сочетает синоптический анализ и численные методы, обеспечивая точные данные для авиации, включая расчёт боковой составляющей ветра для безопасности полётов. [3]

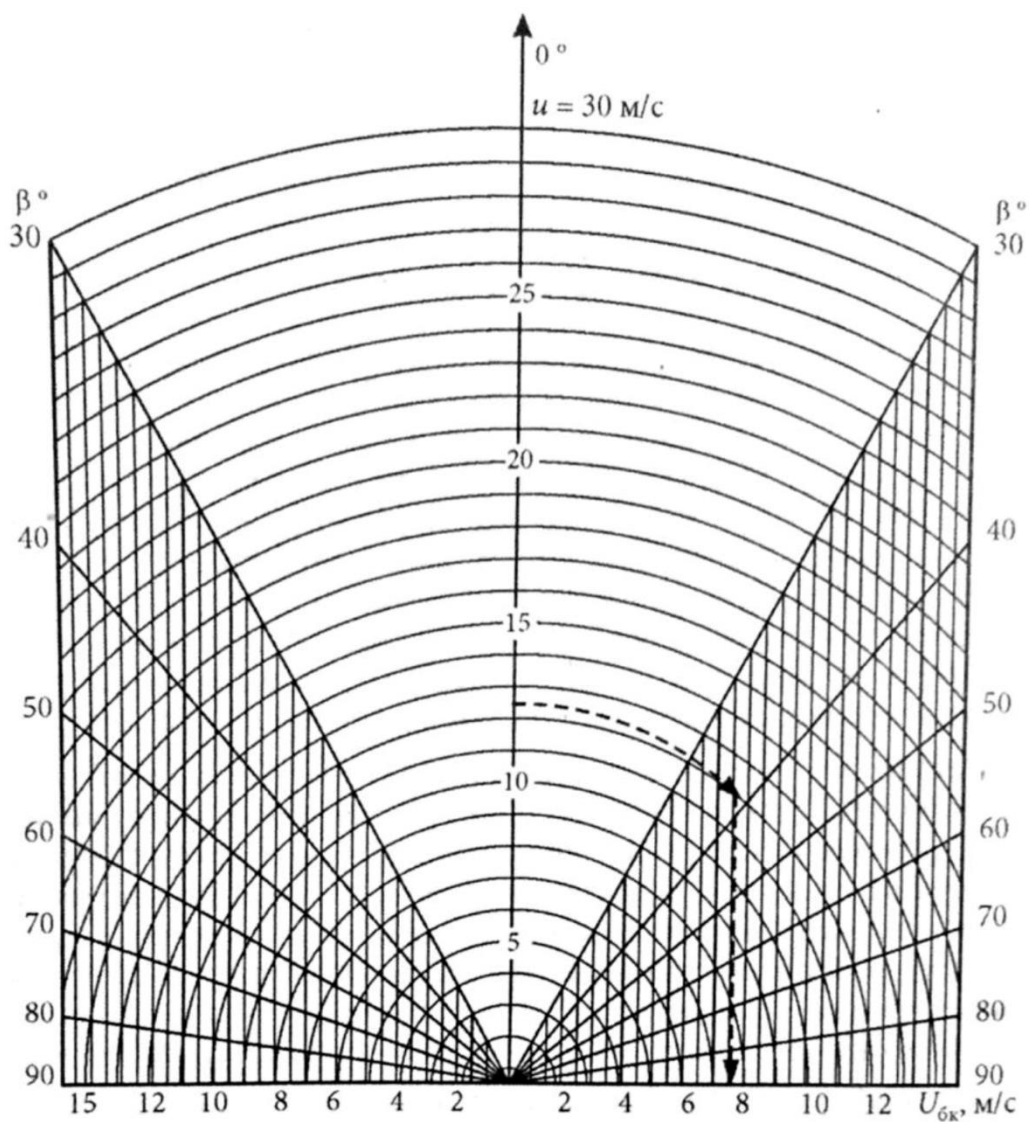


Рисунок 2.1 – Номограмма для определения боковой составляющей ветра по скорости ветра U и углу β между направлением ветра и направлением ВПП

2.2. Прогноз скорости ветра у земли

Для прогнозирования скорости ветра у земли применяются четыре метода. Два из них — методы А.С. Зверева и О.Г. Богаткина — подходят для ветра любой скорости, а два других используются для прогноза сильного ветра и шквалов.

1) Метод А.С. Зверева основан на анализе графика (см. рис. 2.2), где скорость ветра определяется по следующим параметрам:

- Вертикальная ось: горизонтальный градиент давления (мб/1° меридиана).
- Горизонтальная ось: ожидаемая скорость ветра (м/с).
- Дополнительные факторы: время года (зима/лето) и время суток (день/ночь).

Метод А.С. Зверева позволяет прогнозировать скорость ветра у земли, учитывая градиент давления и сезонные/суточные особенности, что важно для точного планирования авиационных операций.

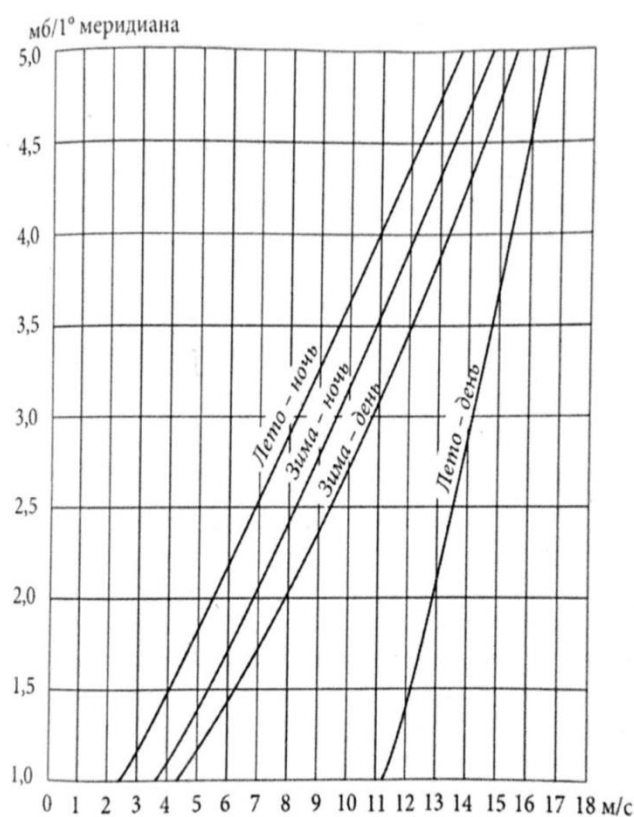


Рисунок 2.2 – График зависимости скорости ветра от величины горизонтального градиента давления

2) Метод О.Г. Богаткина

Метод О.Г. Богаткина не требует использования графиков и основан на полуэмпирической формуле:

$$U = k(pp), \quad (15)$$

где U – скорость ветра, м/с;

k – полуэмпирический коэффициент (для северо-западной части ЕТР равен 2,5);

(pp) – барометрическая тенденция, гПа/3ч, взятая по абсолютной величине за последний срок наблюдений.

Особенности этого метода заключаются в том, что формула наиболее эффективна в зоне холодного фронта и позволяет прогнозировать скорость ветра любой величины.

Метод О.Г. Богаткина обеспечивает простой и эффективный расчёт скорости ветра у земли, особенно в условиях холодного фронта, что полезно для авиации.

3) Прогноз максимального ветра при грозах

Для прогнозирования максимальной скорости ветра при грозах используются два метода: анализ аэрологической диаграммы и данные зондирования атмосферы. Аэрологическая диаграмма показывает изменение ветра с высотой.

Метод с использованием аэрологической диаграммы

Для прогноза максимальной скорости ветра при грозе выполняются следующие шаги:

1. Определить спрогнозированное значение максимальной температуры воздуха у земли (см. рис. 2.3).
2. Подняться по влажной адиабате до уровня 600 гПа.
3. На уровне 600 гПа определить величину ΔT — разность между температурой на влажной адиабате и температурой на кривой стратификации ($^{\circ}\text{C}$).
4. Рассчитать максимальную скорость ветра по формуле:

$$U_{max} = 2\Delta T, \quad (16)$$

где U —скорость ветра, м/с;

ΔT — разность между температурой на влажной адиабате и на кривой стратификации, °С.

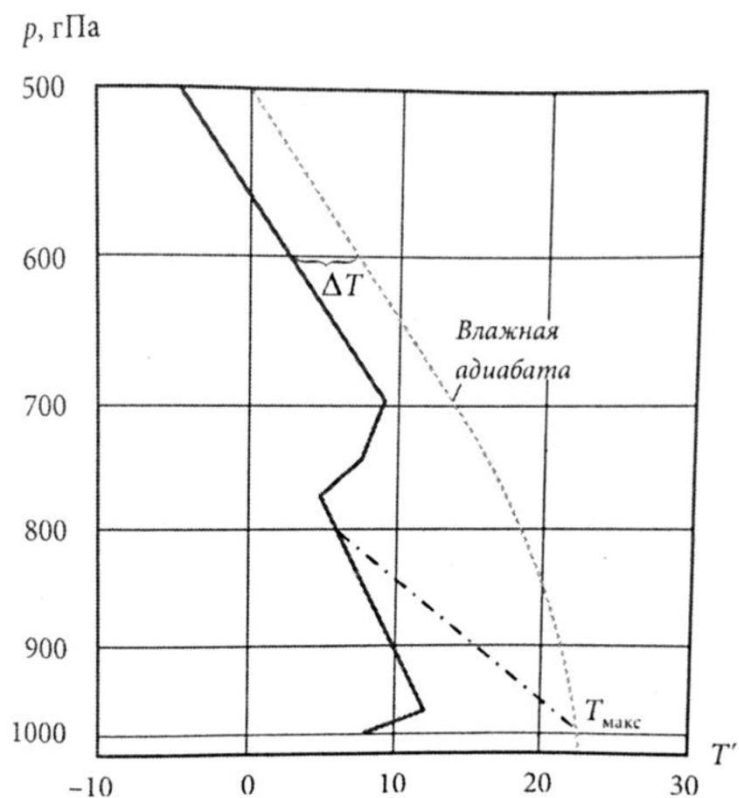


Рисунок 2.3 – График для прогноза максимальных порывов ветра у земли при грозах

Второй метод основан на использовании данных зондирования атмосферы. Он позволяет оценить максимальную скорость ветра при грозах без применения аэрологической диаграммы, опираясь на параметры атмосферы, полученные с радиозондов.

Порядок действий:

- Используются данные зондирования, включающие профили температуры, влажности и ветра на разных высотах.
- Определяется индекс неустойчивости атмосферы (например, CAPE — Convective Available Potential Energy), который указывает на вероятность сильных конвективных явлений, таких как грозы.
- Анализируется сдвиг ветра (разница скорости и направления ветра между нижними и верхними слоями атмосферы, например, между поверхностью и уровнем 600 гПа).
- Максимальная скорость ветра при грозе оценивается с учётом величины сдвига ветра (чем больше сдвиг, тем выше вероятность сильных порывов), энергии неустойчивости (CAPE), которая коррелирует с интенсивностью грозы и эмпирических коэффициентов, зависящих от региона и условий.

Этот метод эффективен в условиях, где доступны данные радиозондирования, подходит для прогноза шквалов и сильных порывов ветра при грозах.

Метод зондирования атмосферы позволяет прогнозировать максимальную скорость ветра при грозах с учётом неустойчивости и сдвига ветра, что важно для авиации и метеорологического планирования.[3]

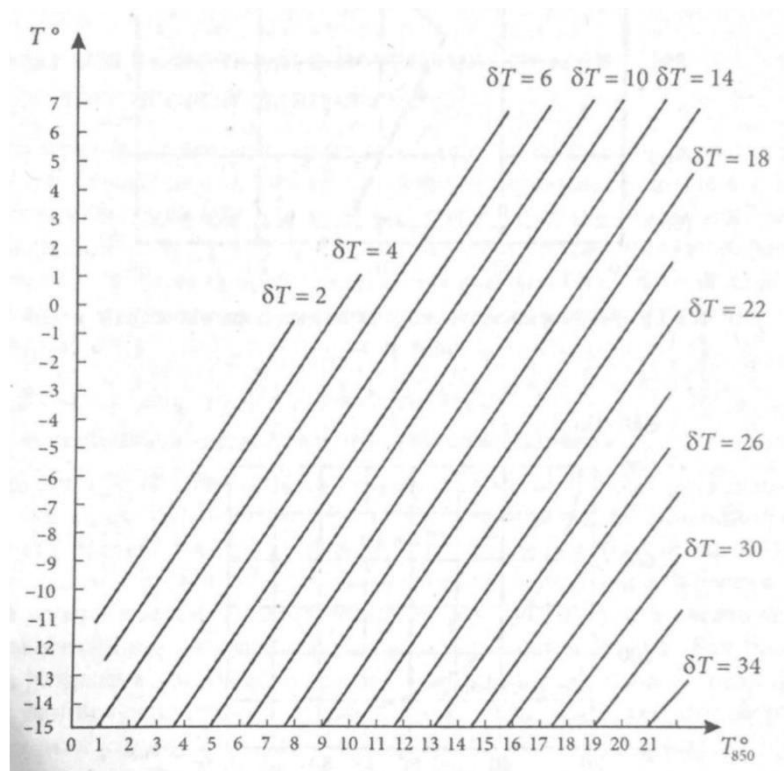


Рисунок 2.4 – График для определения величины δT

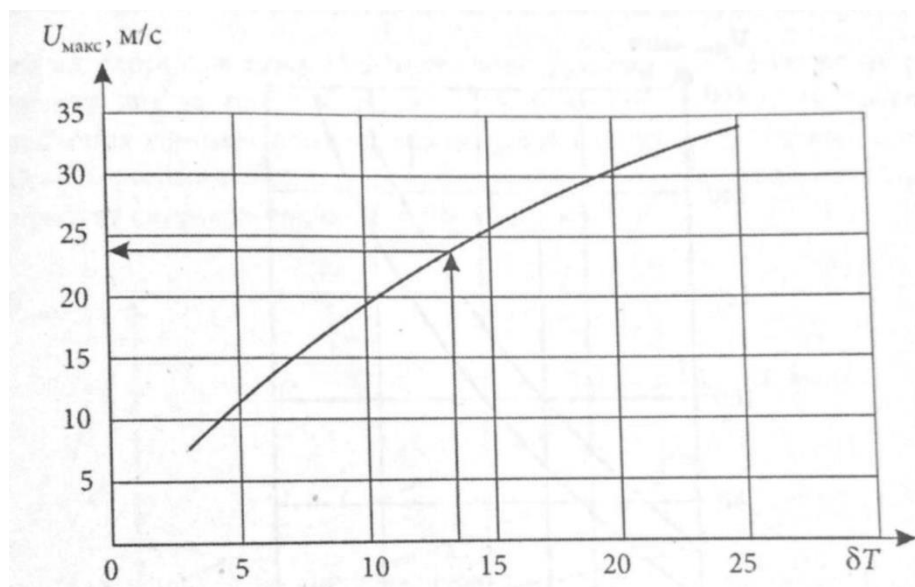


Рисунок 2.5 – График для определения максимальной скорости ветра при грозе

4. Прогноз шквалов. Методику прогноза шквалов предложили Б.Е. Песков и А.И. Снитковский. Заблаговременность прогноза составляет 3-6 часов при ожидаемой мощно-кучевой облачности. На рисунке 2.6 предоставлен график для данного прогноза. По горизонтальной оси – суммарное значение скорости ветра (м/с) на уровне земли, 850, 700 и 500 гПа; по вертикальной оси – вертикальная мощность кучево-дождевого облака, гПа. Весь график разделен кривой на две зоны: «шквал», «отсутствие шквала». При попадании в зону «шквал» следует судить о резком и внезапном усилении ветра и изменения его направления. Скорость ветра при наличии шквала можно уточнить по рисунку 2.7.[4]

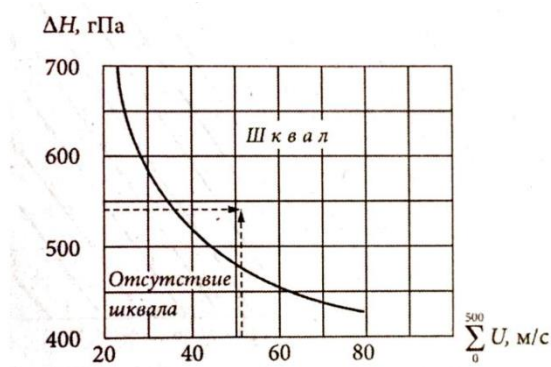


Рисунок 2.6 – График для определения возможности шквала

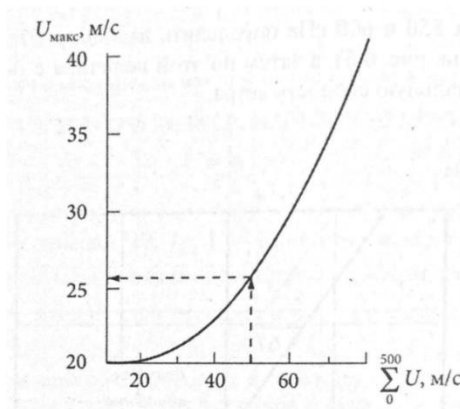


Рисунок 2.7 – Определение максимальной скорости ветра при шквале

5. Определение скорости порывов ветра. Расчёт скорости порыва ветра производится по формуле:

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{ср}} + kU_{\text{ср}}, \quad (17)$$

где $U_{\text{ср}}$ – средняя скорость ветра,

k –коэффициент, который подбирается индивидуально для каждого пункта.

Так же для прогноза ветра у земли используется метод с использованием карты АТ-850 (рис. 2.8). По горизонтальной оси – ожидаемая максимальная скорость ветра у земли (м/с), по вертикальной – прогностическая скорость ветра на уровне 850 гПа.

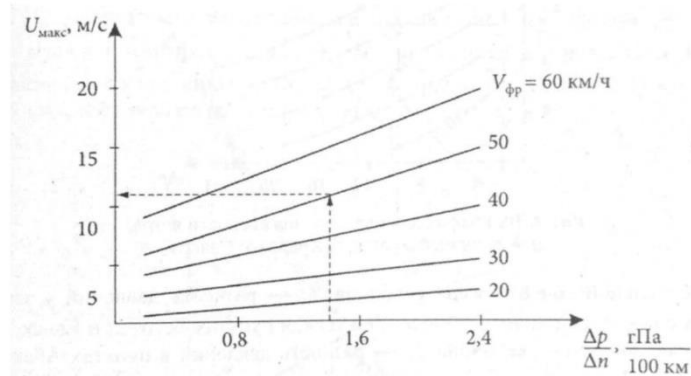


Рисунок 2.8 – График для прогноза скорости ветра у земли по данным о ветре на уровне 850 гПа

Для определения скорость ветра у земли в зоне фронта используется график на рисунке 2.9. Горизонтальная ось – горизонтальный градиент давления (гПа/100м), вертикальная – максимальная скорость ветра (м/с). По графику видно, что на нём есть несколько наклонных линий, которые как раз и характеризуют скорость перемещения фронта (км/ч). Скорость

перемещения фронта - есть зависимость горизонтального градиента давления от максимальной скорости ветра. [3]

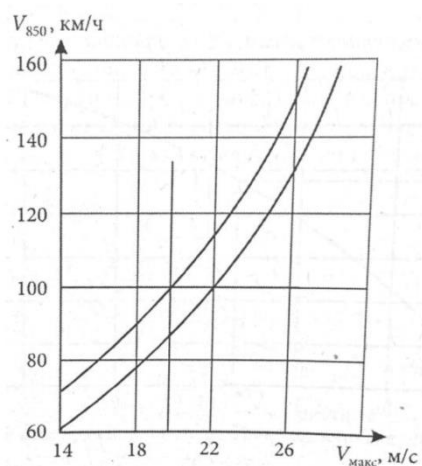


Рисунок 2.9 – График для определения скорости ветра в зоне фронта

3. Методы измерения скорости и направления ветра на аэродроме

3.1. Методы измерения скорости и направления ветра станцией КРАМС-4

Для измерения метеорологических параметров на аэродроме Пулково расположена комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция (КРАМС-4), в составе которой находятся измеритель скорости ветра WAA151/252 (Vaisala) и измеритель направления ветра WAV151/252 (Vaisala).

Назначение КРАМС-4

Система КРАМС-4 разработана для автоматического измерения ключевых метеорологических характеристик: температуры и относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, атмосферного давления, высоты облаков, метеорологической видимости и количества осадков.

Принцип работы

КРАМС-4 использует первичные датчики для дистанционного измерения метеопараметров. Эти данные преобразуются в цифровой формат с помощью измерительных контроллеров, передаются по каналам связи в центральный блок, где обрабатываются, отображаются на дисплее оператора, сохраняются в архив и формируются в метеосводки.

Измерительный канал ветра

Канал предназначен для обработки сигналов от датчиков скорости и направления ветра, преобразуя их в данные, необходимые для метеообеспечения авиации. В канал поступают цифровые сигналы с текущими значениями скорости и направления воздушного потока. Анемометры должны фиксировать изменения скорости ветра за 3 секунды или быстрее, согласно рекомендациям ВМО, где пиковая скорость определяется на основе мгновенных значений, усреднённых за 3 с.

3.2. Выходные данные канала параметров ветра

1. Усреднённые значения скорости и направления ветра за 2 и 10 минут (скользящее осреднение).
2. Максимальная скорость ветра (порывы), определённая из мгновенных значений (усреднённых за 3 с) за последние 10 минут.
3. Боковая составляющая максимальной скорости ветра относительно ВПП, рассчитываемая по формуле:

$$V_I = V_{\max} \cdot \sin a, \quad (18)$$

где $V_{\max}$ - максимальная скорость ветра; a — угол между направлением ветра и осью ВПП.

4. Направление ветра, усреднённое за 2 минуты, с учётом магнитного склонения аэродрома (при склонении $\geq 5^\circ$).
5. Оповещения о превышении максимальной скорости ветра пороговых значений (5, 10, 15, 20 м/с и др., согласно местным инструкциям).
6. Анализ изменений скорости и направления ветра за 10 минут перед составлением сводок METAR/SPECI для выявления нестабильности:
 - Сдвиг направления на $\geq 30^\circ$ при средней скорости ≥ 5 м/с (устойчиво ≥ 2 мин).
 - Изменение максимальной скорости на ≥ 5 м/с.
 - Сдвиг направления на $\geq 60^\circ$ при средней скорости ≥ 2 м/с.

КРАМС-4 обеспечивает точное измерение и обработку метеоданных, включая ветровые параметры, что критично для безопасной аэронавигации.

4. Анализ параметров ветра на аэродроме «Пулково» г.Санкт-Петербург

4.1. Характеристика местности

Местность, в которой находится международный аэропорт Пулково, расположена в северо-западной части Европейской части России, на территории города Санкт-Петербурга. Этот регион обладает уникальными климатическими, метеорологическими и синоптическими условиями, которые существенно влияют на эксплуатацию воздушных судов и особенности метеорологического обеспечения деятельности аэропорта.

Регион характеризуется умеренно-континентальным климатом с морским влиянием, что проявляется в мягких зимах и прохладных летах. В зимний период могут проникать холодные арктические воздушные массы, вызывающие сильные похолодания, переменные ветры и снегопады.

Регион находится под влиянием западных и юго-западных воздушных масс, а также фронтальных систем, приносящих переменчивую погоду. Влияние морской среды способствует повышенной влажности, облачности, а также формированию туманов и циклонов, особенно в холодное время года.

Местность, в которой расположен аэропорт Пулково, характеризуется сложными и переменчивыми климатическими и метеоусловиями. Зимы холодные и снежные, с низкими температурами и возможными сильными ветрами, а лето — умеренно теплое с высокой влажностью. Регулярные туманы, осадки и изменение погодных условий требуют постоянного и точного метеорологического обеспечения, а также наличия специальных средств и методов для безопасной эксплуатации воздушных судов в таких условиях.

Для проведения исследования межгодовой изменчивости скорости ветра в районе аэродрома, был сформирован архив данных измерений за четыре года (с 2020 по 2023 включительно). На основе подготовленного

архива рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения скорости ветра (табл. 4.1). На основе полученных данных получены таблицы и построены графики для дальнейшего анализа.

Таблица 4.1

Среднемесячные и среднегодовые значения скорости ветра

	дек	ноя	окт	сент	авг	июль	июнь	май	апр	мар	фев	январь	среднее за год
2023	1,64	1,54	2,16	1,88	1,49	2,22	1,62	1,99	1,45	2,01	2,08	2,43	1,87
2022	2,10	1,71	2,08	1,42	1,41	1,71	1,77	2,07	1,83	1,55	1,57	2,13	1,78
2021	1,79	2,38	2,67	1,41	1,91	1,49	1,30	1,77	2,10	2,21	1,73	1,48	1,85
2020	2,24	2,32	1,60	2,18	1,42	2,04	1,38	1,89	2,35	2,23	2,98	3,03	2,14

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что в 2020 году наблюдается общий рост среднего значения скорости ветра по сравнению с последующими годами. Это может указывать на изменения в климатических условиях и атмосферной динамике.

4.2. Анализ скорости ветра

Рассмотрим межгодовую изменчивость скорости ветра в районе аэродрома. На графике (рис. 4.1) представлены усредненные значения скорости ветра по месяцам за 2020-2023 годы.

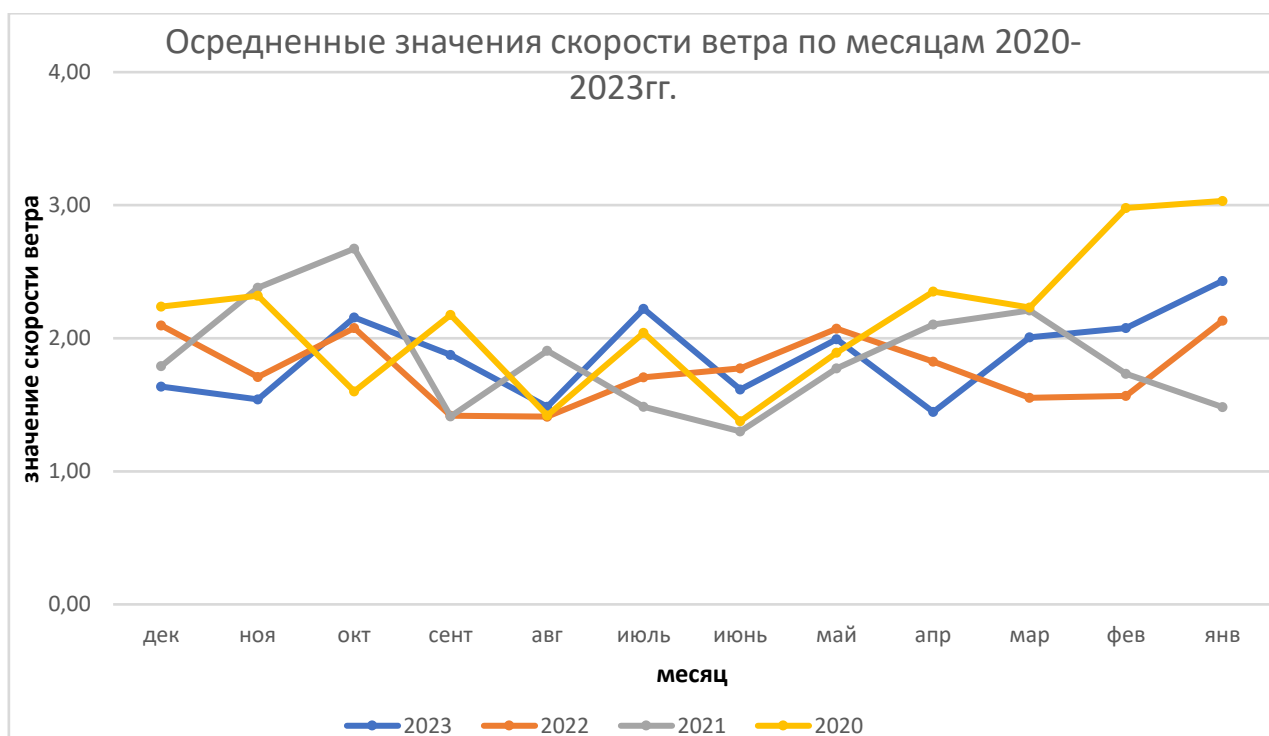


Рисунок 4.1 – Осредненные значения скорости ветра по месяцам за период 2020-2023гг

Рассмотрим данные по сезонно.

Зимние месяцы. В феврале и январе отмечаются более высокие значения скорости ветра. Холодные зимние температуры часто приводят к образованию фронтов и увеличению давления, что повышает вероятность образования сильных ветров. Порывистый ветер в это время года может быть вызван рядом метеорологических явлений, включая циклоны или атмосферные фронты.

Весенние месяцы. В марте 2023 года фиксируются более высокие значения средней скорости ветра, относительно других весенних месяцев. Весной происходит активизация процессов конвекции, что может вызывать порывистые ветры. Ветры могут усилиться из-за контраста температур между холодным воздухом и прогревающейся земной поверхностью.

Летние месяцы. Июнь, июль и август показывают более стабильные значения скорости ветра, что типично для летних месяцев, когда влияние

фронтов уменьшается. Обычно в это время преобладают антициклоны, которые приносят более спокойные погодные условия.

Осенние месяцы. В сентябре и октябре наблюдаются колебания показателей. Осень — это переходный период, когда смена сезона может вызывать изменения в атмосфере. А участвовавшие на территории циклоны могут привести к увеличению ветровой активности.

В целом в 2022 году, особенно в летние месяцы, скорость ветра была ниже. Это может быть связано с более высокими температурами в условиях менее активной атмосферы. Как мы помним, лето 2022 года было достаточно жарким и засушливым. В отдельные дни температура воздуха поднималась до отметки 30 градусов, что не типично для рассматриваемого региона.

Теперь сравним среднемесячный показатель скорости ветра с осредненными по дням значениями скорости ветра за февраль 2020 года (рис. 4.2).

Среднемесячный показатель скорости ветра составил около 3 м/с (обозначен оранжевой линией). Это значение представляет собой базовый уровень, относительно которого можно сравнивать ежедневные колебания. Синие точки на графике указывают на среднесуточные значения скорости ветра в течение месяца.

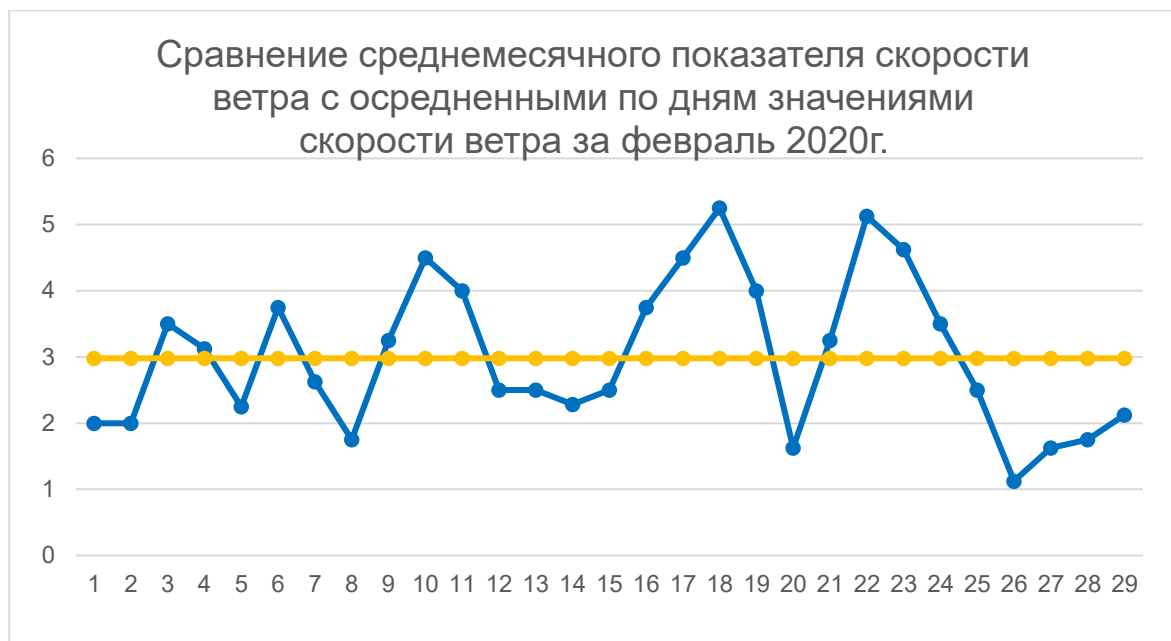


Рисунок 4.2 – Изменчивость среднесуточных значений скорости ветра в феврале 2020

Видно, что в феврале отмечались стабильные периоды и периоды с более ветренной погодой.

Стабильные периоды. В первой половине февраля скорость ветра, в основном, находится на уровне чуть ниже или около 3 м/с. Это может указывать на устойчивые атмосферные условия без значительных метеорологических изменений.

Ветренные дни. В некоторых случаях, особенно во второй половине месяца, наблюдаются пики скорости ветра, достигающие 5 м/с (среднесуточное значение) или выше. Данные отклонения могут объясняться влиянием фронтальных систем, которые зачастую приводят к сильным ветрам.

Например, в дни, которые явно выбиваются на графике (18, 22 февраля), высокая скорость ветра обусловлена разницей давления, которая видна на рисунках 4.3а,б соответственно, в отличие от ситуации 20 февраля (рис. 4.3в).

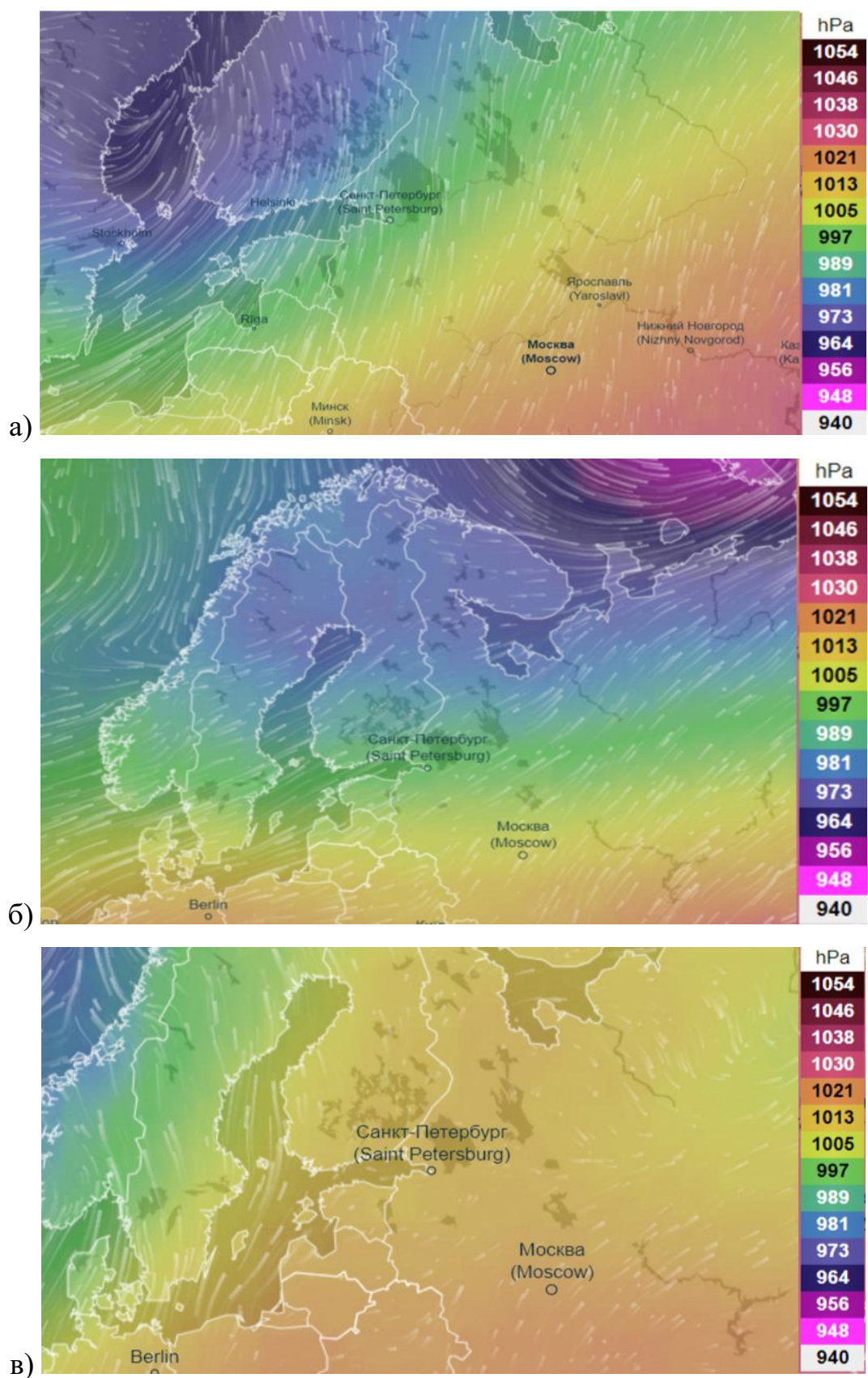


Рисунок 4.3 – Данные реанализа онлайн сервиса Ventusky[9]

а) 18 февраля, б) 22 февраля, в) 20 февраля

Существенная разница между средними значениями скорости ветра 18 и 20 февраля 2020 года, явно заметная на графике, объясняется прохождением циклона, сформировавшимся над Атлантическим океаном (вблизи южных берегов Исландии), находившимся в стадии максимального развития 16.02.2020 (рис. 4.4, 4.5).

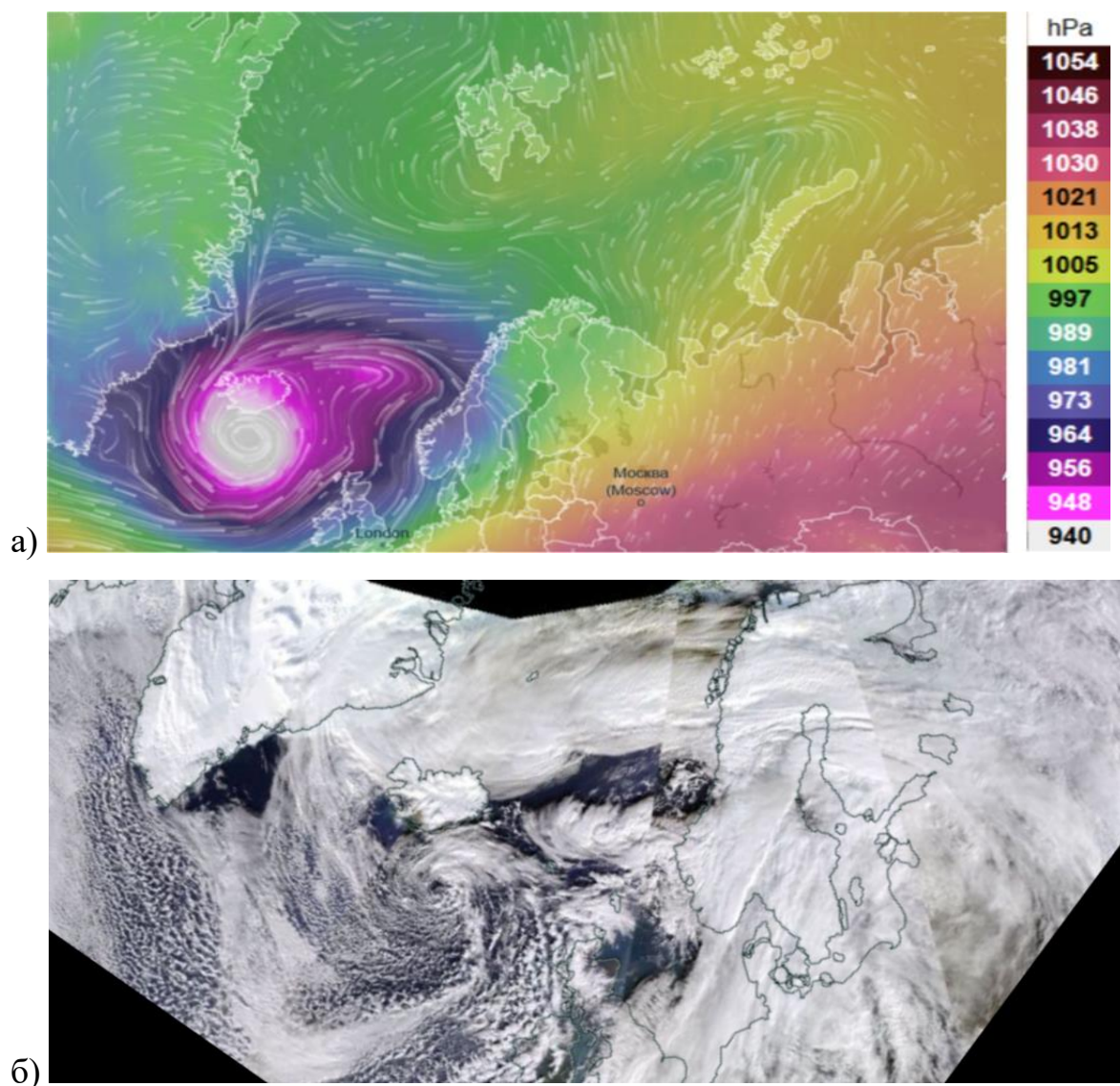


Рисунок 4.4 – Изображение барических систем за 16.02.2020

а) данные реанализа онлайн сервиса Ventusky, б) спутниковый снимок

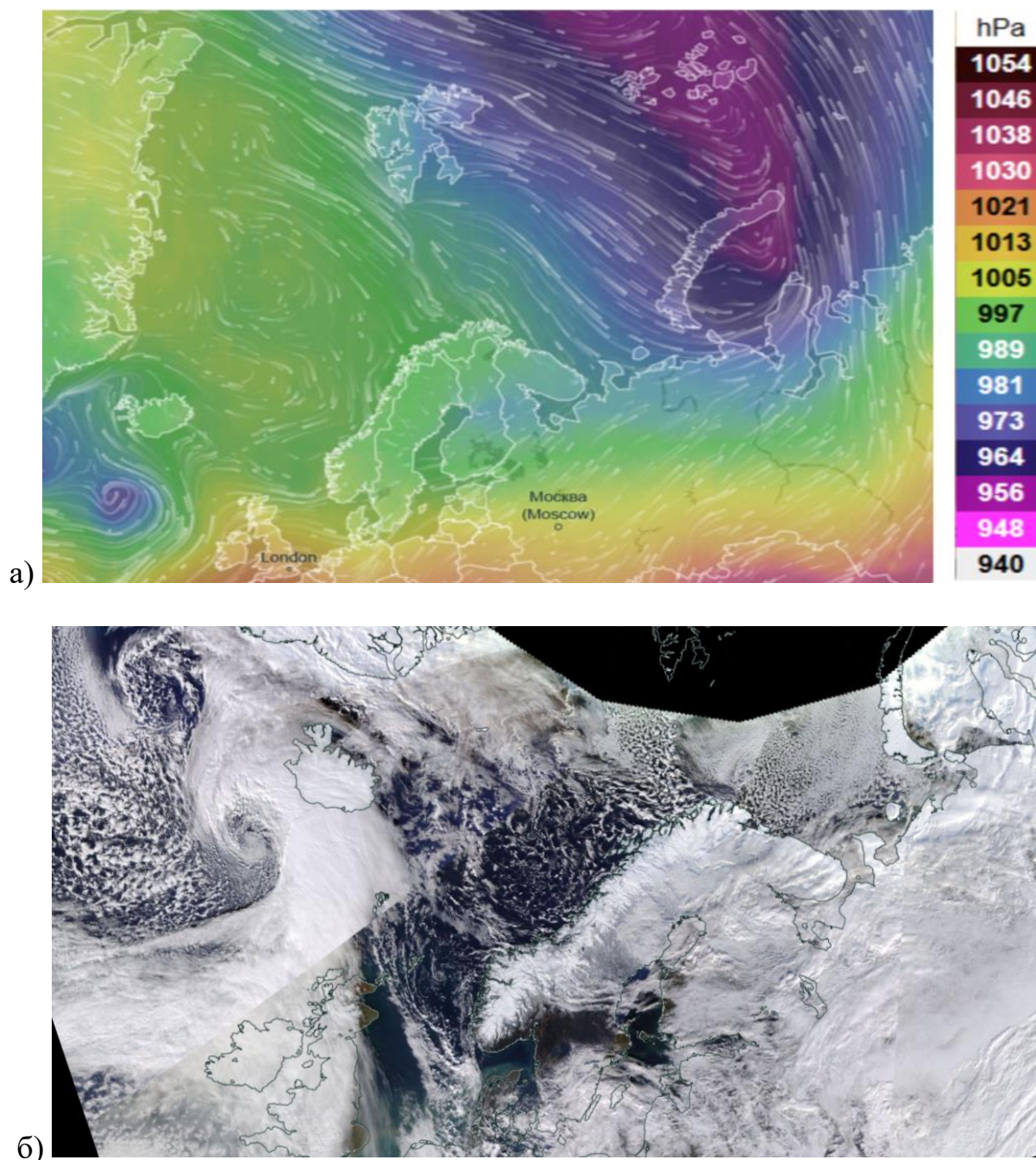


Рисунок 4.5 – Изображение барических систем за 20.02.2020

а) данные реанализа онлайн сервиса Ventusky, б) спутниковый снимок

В летнем периоде заметно выбивается июль 2023 (рис. 4.6), когда были зафиксированы максимально высокие значения скорости ветра за все летние месяцы анализируемого периода (2020 – 2023гг.).

На значение осредненного показателя за указанный месяц сильное влияние оказали дни, в которые скорость ветра превышала 3,5 м/с. По графику на рисунке 4.6 видно, что соответствующие значения были зафиксированы в следующие даты: 03.07, 04.07, 05.07.



Рисунок 4.6 – Изменчивость среднесуточных значений скорости ветра в июле 2023г.

Проанализировав приземные карты погоды за 03.07 – 05.07 (рис. 4.7, 4.8) можно заметить, что в эти даты погода в Санкт-Петербурге определялась проходящим фронтом окклюзии 3 числа, а так же холодным фронтом второго рода 4 и 5 числа.

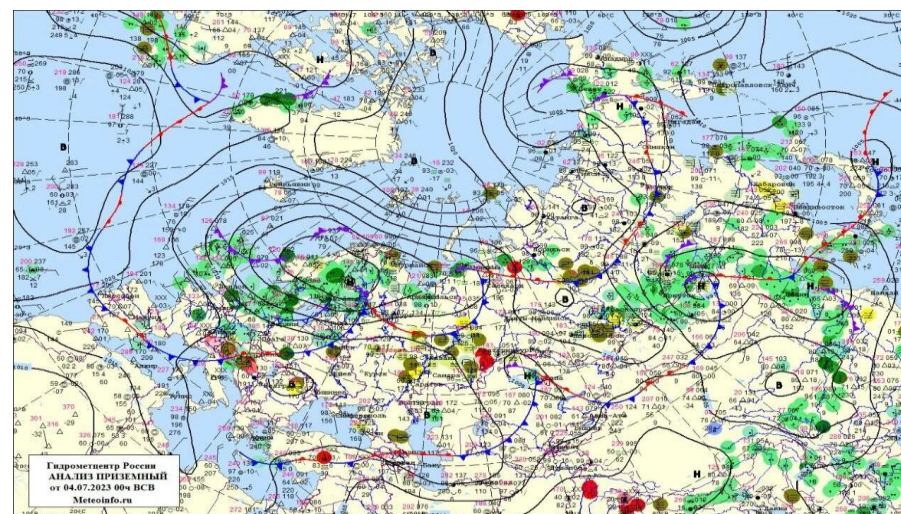
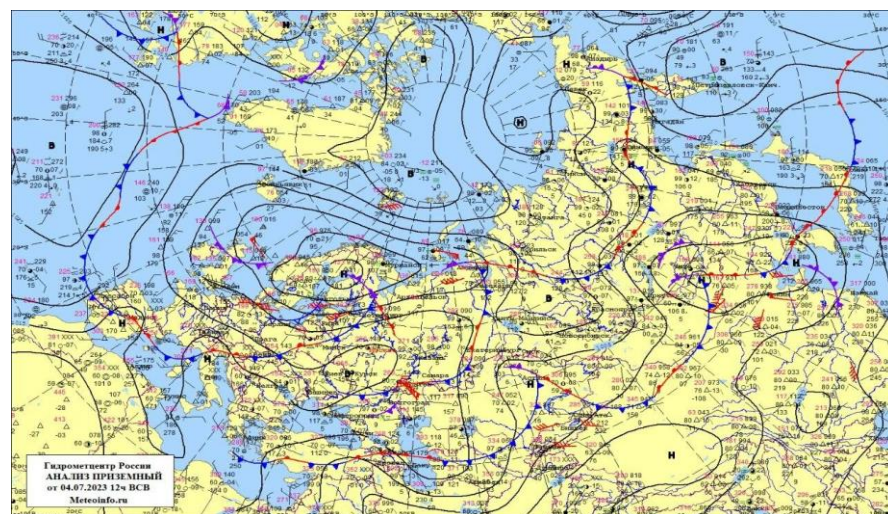
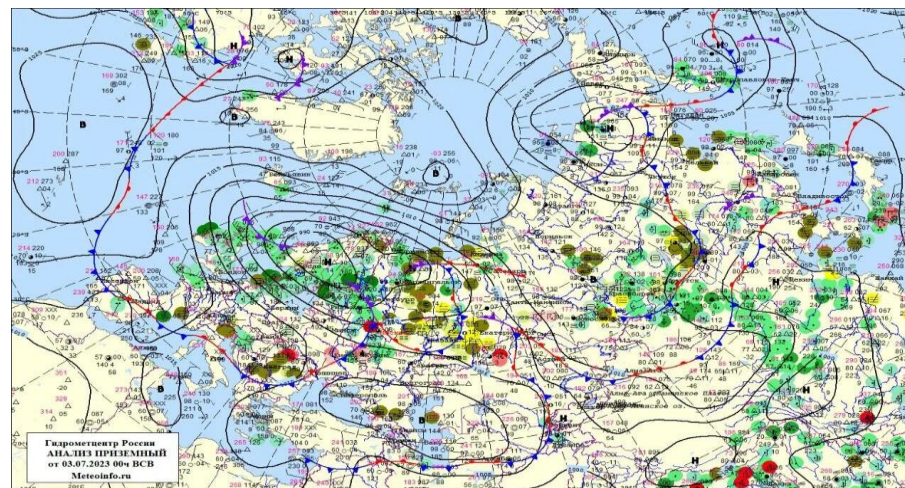


Рисунок 4.7 – Приземные карты погоды за 03.07 и 04.07

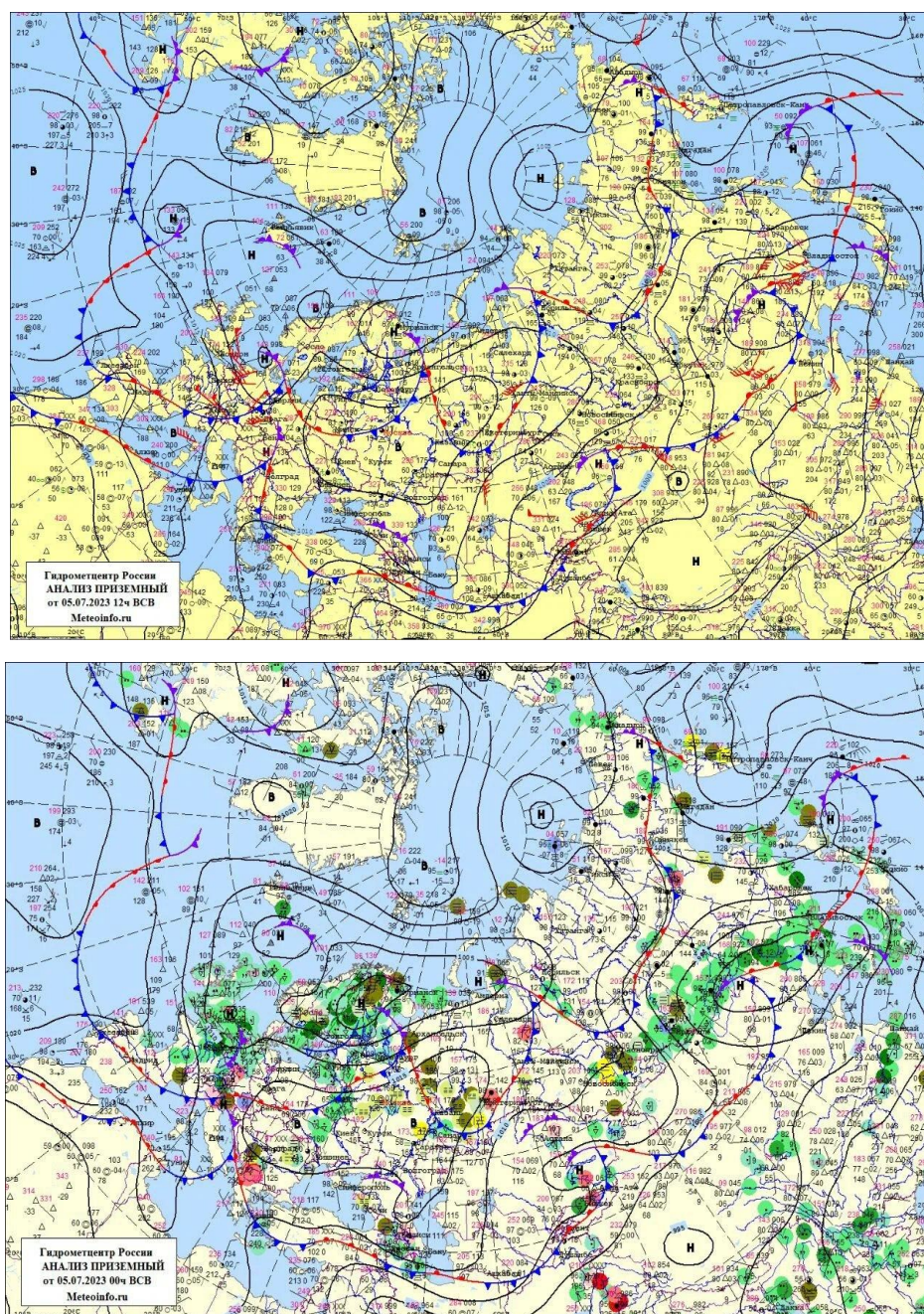


Рисунок 4.8 – Приземные карты погоды за 05.07

03.07 циклон находился в стадии максимального развития с давлением в центре 984 гПа и располагался на востоке Ботнического залива (рис. 4.9а), в следствие чего оказывал непосредственное влияние на погоду в г. Санкт-Петербург.

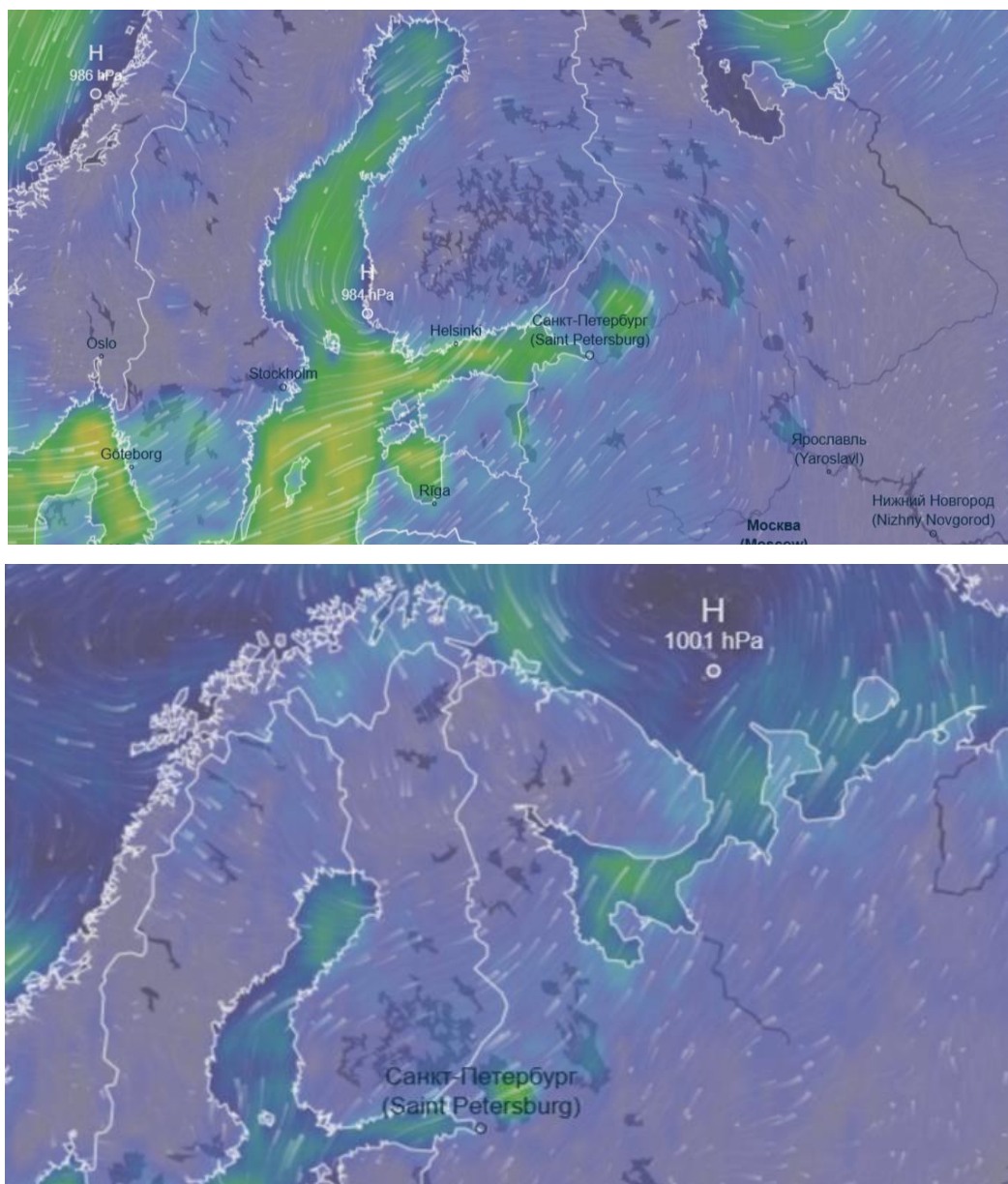


Рисунок 4.9 – данные реанализа онлайн сервиса Ventusky

а) за 03.07; б) за 06.07

06.07. циклон располагался над Баренцевым морем и имел давление в центре 1001 гПа, потому не оказывал сильного влияния на погоду, а именно на скорость ветра в г. Санкт-Петербург. Как видно на графике, представленном на рисунке 10, средняя скорость ветра в этот день значительно снизилась и составляла 1,5 м/с.

4.3. Анализ направления ветра

В исследовании применена восьмилучевая роза ветров, отражающая направления ветра по восьми румбам горизонта (рис. 4.10). Всего проанализировано 7340 метеорологических сроков. На каждом луче указано количество случаев, соответствующих определённому направлению ветра за период наблюдений.

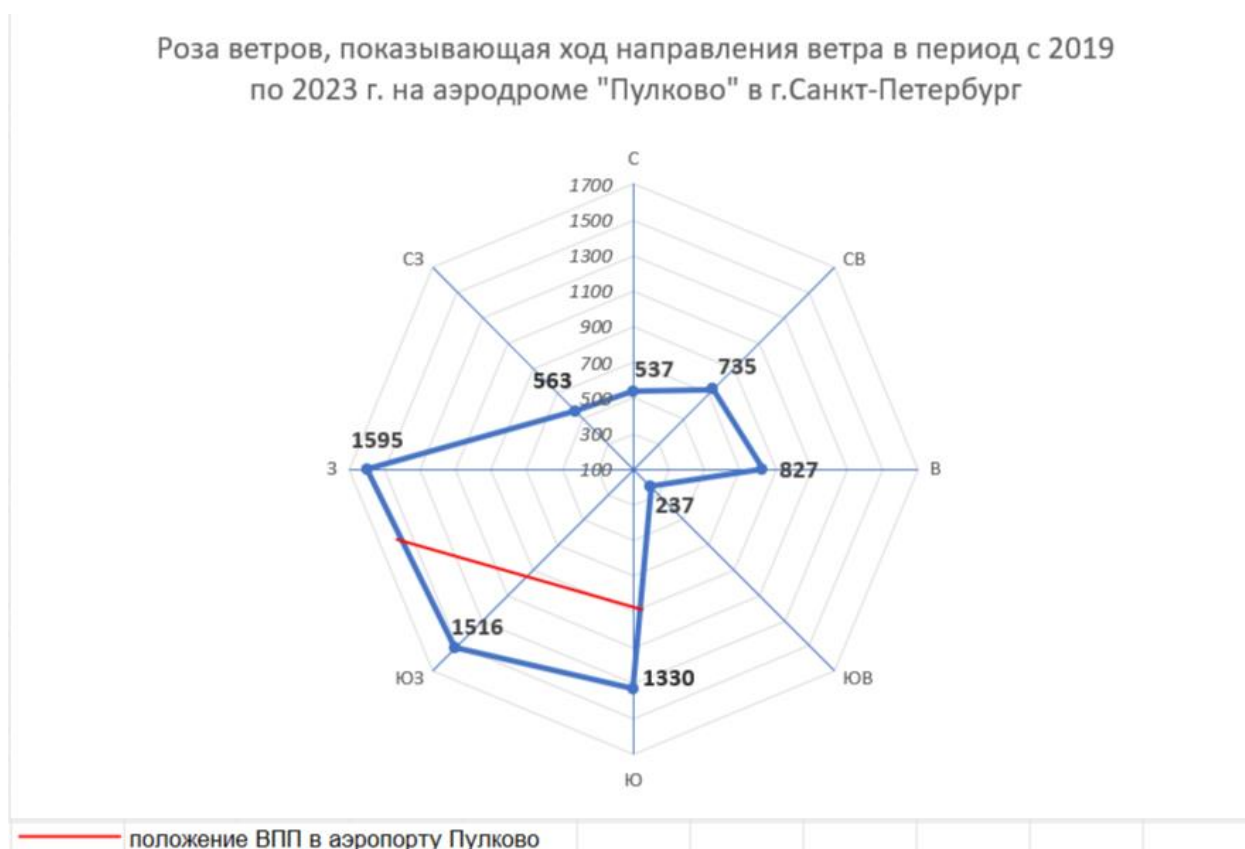


Рисунок 4.10 – Распределение направлений ветра за период с 2019-2023гг

Судя по рисунку, предоставленному выше, мы можем судить о том, что в районе аэродрома «Пулково» преобладающим направлением ветра является ветер западного направления – 1595 сроков, ветер южного направления фиксировался на 1330 сроках, северного – 537, юго-западного

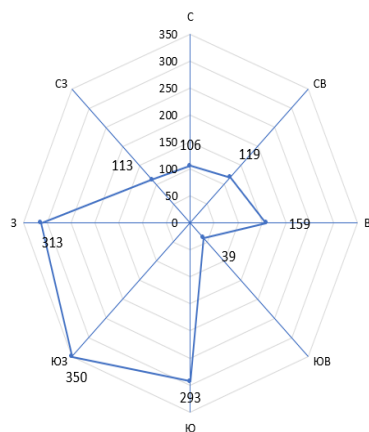
– 1516, северо-западного – 563. Это соответствует действительности, так как аэродром находится в зоне, для которой характерен западный перенос ВМ (преобладающее направление ветра – западное или юго-западное).

Красная полоса на рисунке 4.10, вытянутая с юго-востока на северо-запад – условное обозначение расположения взлетно-посадочных полос (они на аэродроме параллельны). Учитывая расположение ВПП на аэродроме и преобладающее западное направление ветра, полученное в результате расчётов, можно судить о том, что на аэродроме практически всегда господствует встречный ветер. Аэродром работает в штатном режиме, направление ветра не оказывает особого влияния на взлет и посадку ВС на аэродроме «Пулково».

Отслеживая динамику по годам (рис. 4.11а-г) можно сделать несколько выводов:

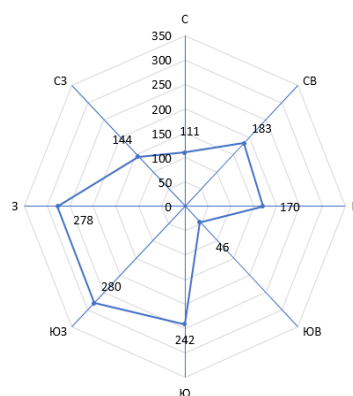
- основная масса ветров в Санкт-Петербурге — западные направления (ЮЗ и З), что характерно для региона с доминирующими западными ветрами;
- в 2020 году преобладали западные ветры, что типично для региона;
- в 2021 году заметно увеличилось количество ветров с северо-востока, но в последующие годы его доля снизилась;
- в 2022–2023 годах наблюдается рост ветров с востока, что указывает на изменение метеоусловий.

Роза ветров, показывающая ход направления ветра в 2020 г. на аэродроме "Пулково" в г.Санкт-Петербург



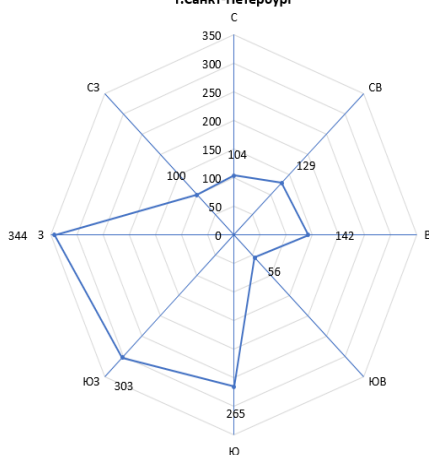
а)

Роза ветров, показывающая ход направления ветра в 2021 г. на аэродроме "Пулково" в г.Санкт-Петербург



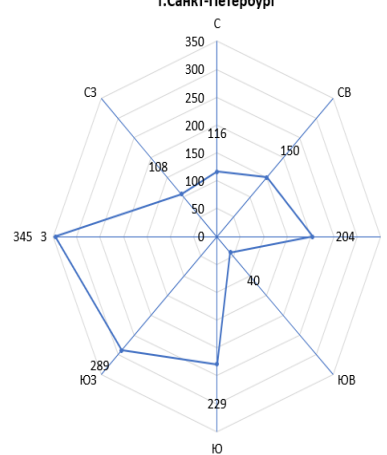
б)

Роза ветров, показывающая ход направления ветра в 2022 г. на аэродроме "Пулково" в г.Санкт-Петербург



в)

Роза ветров, показывающая ход направления ветра в 2023 г. на аэродроме "Пулково" в г.Санкт-Петербург



г)

Рисунок 4.11 – Распределение направлений ветра по годам за период с 2019-2023гг

а) 2020г.; б) 2021г.; в) 2022г.; г) 2023г.

Заключение

Ветер является важной характеристикой метеоусловий, оказывающей значительное влияние на деятельность авиации и климатические процессы региона. Анализ данных за исследуемый период показывает тенденцию к снижению средней скорости ветра на исследуемом аэродроме, а также выраженную сезонную динамику: повышенные значения наблюдаются в зимние месяцы из-за усиления метеорологических процессов, таких как циклоны и атмосферные фронты.

Географическое расположение аэродрома «Пулково» определяет преобладание западных и юго-западных направлений ветра, что подтверждается результатами восьмилучевой розы ветров. Эти сведения важны для обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов и планирования летных работ, а также способствуют более точному прогнозированию условий в регионе.

Результат работы позволяет сделать определенные выводы:

- юго-западное направление остается стабильным и доминирующим направлением, с долей 19-29%;
- увеличилась доля западных ветров в 2022–2023 годах.
- произошло снижение доли южных ветров в 2023 году по сравнению с 2020 и 2021 годами;
- заметно увеличилась доля восточных ветров в 2023 году по сравнению с предыдущими годами, что может свидетельствовать о смене метеоусловий;
- ветра северного направления стабильно имеют небольшую долю;
- в 2021 году максимальная доля принадлежит северо-восточному направлению, в следующие года происходит ее снижение;

- доля северо-западного направления немного уменьшилась в 2022–2023 годах.

Общая тенденция — постепенный рост числа фиксирований (зачений в базе), говорит об увеличении числа ветровых событий или об улучшении методов его регистрации.

В работе

- рассмотрены условия формирования ветров и приведена их классификация;
- приведены методы прогнозирования скорости и направления ветра;
- дана краевая характеристика аэродрома;
- подготовлен архив данных по скорости и направлению ветра за 2020 по 2023 гг.;
- выполнено исследование межгодовой изменчивости параметров ветра по данным аэродромной станции за 4 года;
- проведен анализ приземных карт и спутниковых снимков за дни с высокой скоростью ветра.

Цель работы достигнута, Все поставленные задачи выполнены.

Список источников

1. Астапенко П.Д. Авиационная метеорология. Учебное пособие [Текст] / П.Д. Астапенко, А.М. Баранов, И.М. Шварев и др. – М.:Транспорт, 1979. - 263 с.
2. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. [Текст] / О.Г. Богаткин; СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 339с.
3. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие [Текст]/ – О.Г. Богаткин, 2-е изд., стереотипное. –СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 288с.
4. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Учебное пособие. [Текст] / А.С. Зверев, Издание 2-е, перераб. и доп. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 711 с.
5. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Учебник. [Текст] / Л.Т.Матвеев – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 752с.
6. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Учебное пособие [Текст] / В.А. Позднякова. – Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. – 113с.
7. Радикевич В.М. Динамическая метеорология для океанологов. Учебное пособие. [Текст] / В.М. Радикевич – Л., изд. ЛПИ, 1985. – 157с.
8. Сафонова Т.В. Авиационная метеорология. Учебное пособие. [Текст]/ / Т.В. Сафонова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 215 с.
9. Электронный ресурс – Онлайн сервис Ventusky. Режим доступа: <https://www.ventusky.com/ru>
10. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты: [Утв. Центр. комис. по приборам и методам получения и перераб. гидрометеорол. информ. Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природ. среды 26. 12. 78].