



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование условий возникновения сильного ветра на
аэродроме Внуково»

Исполнитель Байматова Екатерина Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)
Волбуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 07 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ВЕТЕР. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ.....	6
И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	6
1.1. Механизм образования ветра	8
1.2. Методы прогнозирования ветра у земли.....	10
ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА	14
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА АЭРОДРОМА ВНУКОВО ЗА ПЕРИОД 2021 – 2022 ГГ.	16
3.1. Физико-климатическое описание аэродрома Внуково	16
3.1.1. Особые явления погоды, характерные для аэродрома Внуково	17
3.2. Анализ ветрового режима на аэродроме Внуково за 2021 – 2022 гг.	18
3.3. Типовые синоптические ситуации при случаях сильного ветра за период 2021 – 2022 гг.	22
3.4. Общая оправдываемость прогноза и критерии успешности	30
3.5. Прогноз сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021-2022 гг. по прогностическим моделям.....	37
<i>Модель COSMO-Ru/6.0</i>	37
<i>Модель ICON</i>	40
<i>Модель GFS</i>	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

ВВЕДЕНИЕ

Ветер всегда представлял собой неиссякаемый источник энергии. Но вместе с его полезными свойствами, у него есть и плохие качества. Сильный ветер вредит народному хозяйству, железнодорожному транспорту, морскому транспорту и конечно же авиации.

С самого первого дня развития авиации по настоящее время главной проблемой остается безопасность полетов. Безопасность полетов зависит от состояния атмосферы, то есть от внешних факторов.

Одним из самых важных метеорологических факторов, который влияет на безопасность полетов является ветер, а именно его скорость и направление. При прогнозе ветра, синоптик обязан информировать летный экипаж об ожидаемой скорости ветра на аэродроме, о направлении и скорости ветра по маршруту воздушного судна, и конечно же о характеристиках ветра в точке прибытия.

Целью данной работы является изучение условий возникновения сильного ветра на аэродроме Внуково.

При достижении поставленной цели решены следующие задачи:

1. Создать архив случаев сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021-2022 гг.;
2. Проанализировать годовой ход случаев сильного ветра;
3. Проанализировать случаи сильного ветра по сезонам;
4. Проанализировать суточный ход случаев сильного ветра;
5. Рассмотреть типовые синоптические ситуации при возникновении сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;
6. Рассмотреть сопутствующие явления при возникновении сильного ветра
7. Построить матрицы сопряженности случаев сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;

8. Определить критерии успешности прогноза сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;
9. Спрогнозировать сильный ветер на аэродроме Внуково по моделям и сравнить результаты с фактическими данными.

Сильный ветер является опасным явлением для полетов воздушных судов, а также может повлиять на безопасность при взлете и посадке. Поэтому для службы прогнозирования очень важно понимать условия образования сильного ветра на конкретном аэродроме для более точного прогноза этого явления.

На актуальных данных (журнал АВ-6) за период 2021 – 2022 года были проведены исследования случаев сильного ветра на аэродроме Внуково и проведена оценка успешности прогнозов сильного ветра. В этом и заключается практическая значимость данной работы.

ГЛАВА 1. ВЕТЕР. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Ветер – передвижение воздуха относительно земной поверхности, в результате неоднородности поля атмосферного давления в атмосфере или другими словами – сила горизонтального барического градиента. Давление в атмосфере неодинаково, как по горизонтали, так и по вертикали на всем земном шаре. В результате этого воздух перемещается под некоторым углом относительно земной поверхности. Как показывает практика этот угол мал, и при исследовании режима ветра, учитывают лишь его горизонтальную составляющую. Вертикальная составляющая ветра, меньше горизонтальной, заметной она становится в результате сильной конвекции, либо при неоднородности рельефа, когда воздух вынужден подниматься вверх или спускаться.

Величину силы барического градиента на приземной карте можно определить по сгущению изобар, на картах абсолютной типографии по сгущению изогипс: чем гуще проведены изобары или изогипсы, тем сильнее будет сила барического градиента, а значит тем больше будет скорость ветра.

Ветер в приземном слое и свободной атмосфере характеризуется направлением и скоростью [6].

Направление ветра – это точка горизонта, откуда он дует. Скорость ветра выражается в метрах в секунду (м/с), километры в час (км/ч), узлы (уз) или условные единицы (баллы). Для того, чтобы определить направление ветра используется 8 основных точек горизонта и 8 дополнительных, они называются румбами (Рис. 1). Каждому направлению соответствует азимут, который выражается в градусах (табл. 1) [9].

Таблица 1 – направление ветра и его обозначение

Название	Обозначение румбов		Градусы	
	Русское	Международное	от	до
Северо-северо-восток	ССВ	NNE	12	33
Северо-восток	СВ	NE	34	56
Восток-северо-восток	ВСВ	ENE	57	78
Восток	В	E	79	101
Востоко-юго-восток	ВЮВ	ESE	102	123
Юго-восток	ЮВ	SE	124	146
Юго-юго-восток	ЮЮВ	SSE	147	168
Юг	Ю	S	169	191
Юго-юго-запад	ЮЮЗ	SSW	192	213
Юго-запад	ЮЗ	SW	214	236
Западо-юго-запад	ЗЮЗ	SWS	237	258
Запад	З	W	259	281
Западо-северо-запад	ЗСЗ	WNW	282	303
Северо-запад	СЗ	NW	304	326
Северо-северо-запад	ССЗ	NNW	327	348
Север	С	N	349	11

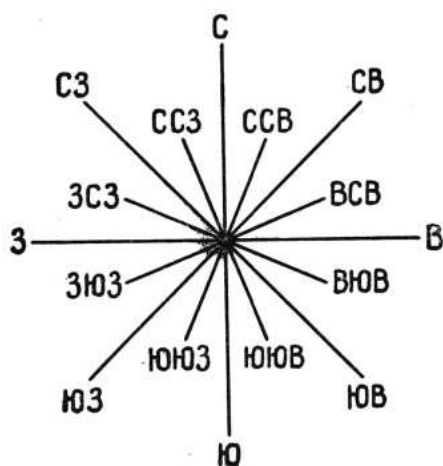


Рисунок 1 – Расположение румбов и их сокращенные обозначения

1.1. Механизм образования ветра

Пограничный слой атмосферы – это слой в котором в отличие от свободной атмосферы, динамические и термические процессы в значительной степени определяются турбулентностью. Высота пограничного слоя составляет 1,5 – 2 км.

Из определения ветра, известно, что атмосфера всегда находится в непрерывном движении. В формировании этих движений огромную роль играют силы, действующие в атмосфере. Самой главной движущей силой в атмосфере является сила барического градиента. Как только воздух в пограничном слое начинает перемещаться, на него начинают влиять и другие силы: сила трения и сила Кориолиса.

Сила барического градиента (F_p) – величина, которая характеризует отношение горизонтального градиента к единице массы воздуха. Эта сила всегда направлена перпендикулярно изобарам в сторону низкого давления.

$$F_p = \frac{\partial p}{\partial n} \#(1.1)$$

Где: ∂P – разность давления в двух пунктах
 ∂n – расстояние между этими пунктами

Главной причиной возникновения силы барического градиента в атмосфере является термический фактор, то есть неравномерное нагревание подстилающей поверхности.

Сила Кориолиса (F_k) – это отклоняющая инерционная сила, которая связана с вращением Земли вокруг оси, она связана с широтой места и скоростью воздушного потока. Эта сила не изменяет скорость ветра, а лишь отклоняет вектор его движения на 90 градусов. В северном полушарии отклонение происходит вправо, а в южном влево, на экваторе эта сила становится равной нулю.

$$F_k = 2\omega_z \rho V_g \#(1.2)$$

Где: ω_z – угловая скорость вращения Земли
 ρ – плотность воздуха
 V_g – величина вектора скорости

Сила трения (F_τ) – вектор этой силы равен и противоположен векторной сумме силы барического градиента и силы Кориолиса. Сила трения будет зависеть от свойств подстилающей поверхности. В свободной атмосфере сила трения равна нулю, поэтому скорость воздушного потока будет зависеть только от сил барического градиента [8].

$$\vec{F}_\tau = - (\vec{F}_p + \vec{F}_k) \#(1.3)$$

При отсутствии ускорения должен сохраняться баланс трех сил:

$$\vec{F}_\tau + \vec{F}_p + \vec{F}_k = 0 \#(1.4)$$

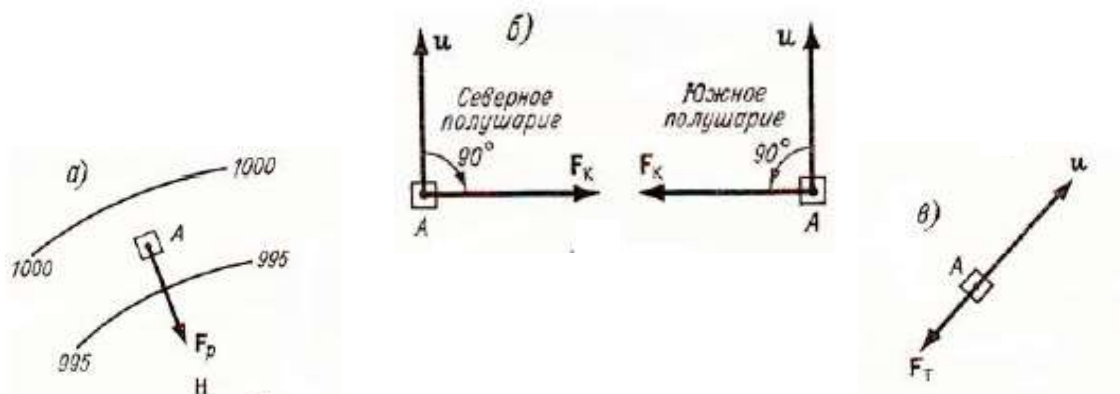


Рисунок 2 – Силы, действующие на частицу А в атмосфере (а) сила барического градиента б) сила Кориолиса в) сила трения)

1.2. Методы прогнозирования ветра у земли

Метод А.С. Зверева.

Зверевым предложен график (рис.4), с помощью которого по горизонтальному градиенту давления в зависимости от времени года и времени суток можно определить ожидаемую скорость ветра.

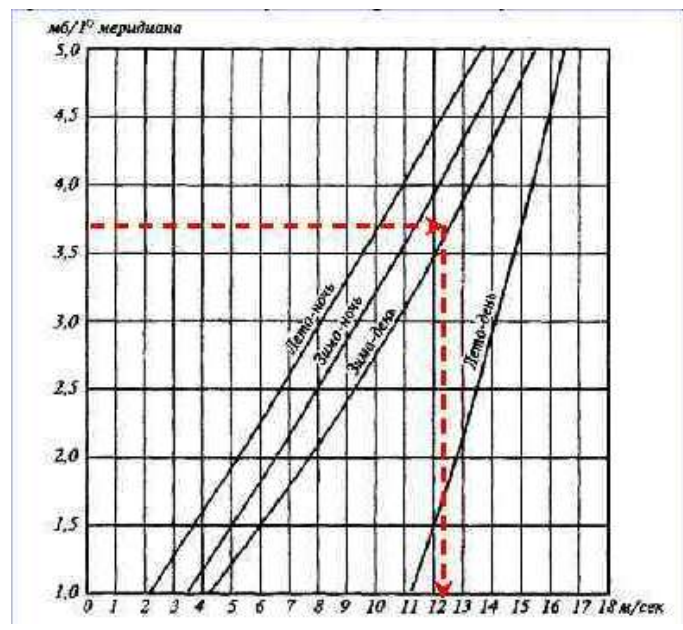


Рисунок 4 – График зависимости скорости ветра от горизонтального градиента давления

Метод О.Г. Богаткина. По этому методу рекомендуется определять скорость ветра по полуэмпирической формуле:

$$V = k(pp)\#(1.2.1.)$$

Где: V – скорость ветра, м/с
 k – полуэмпирический коэффициент, для северо-западной европейской части России данный коэффициент равен 2,5
 (pp) – барометрическая тенденция, гПа/3 ч, которая берется по абсолютной величине за последний срок наблюдений

По данному методу получаются вполне удовлетворительные результаты, особенно в зонах прохождения холодных фронтов.

Прогноз максимального ветра при грозах по аэрологической диаграмме.

Для прогноза по аэрологической диаграмме, необходимо от спрогнозированного значения максимальной температуры воздуха у земли подняться по влажной адиабате до уровня 600 гПа и определить величину ΔT (рис.3). Эта величина равна разности между температурой на влажной адиабате и на кривой стратификации. Максимальная скорость ветра будет определяться выражением

$$V_{\text{макс}} = 2\Delta T, \#(1.2.2)$$

Где: $V_{\text{макс}}$ – скорость ветра, м/с
 ΔT – в градусах

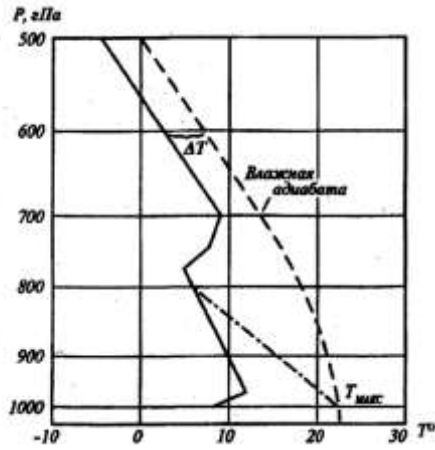


Рисунок 3 – График для прогноза максимальных порывов ветра у земли при грозах

Прогноз ветра у земли по данным о ветре на уровне 850 гПа.

Этот метод позволяет спрогнозировать скорость ветра у земли с заблаговременностью до суток. Для этого используется переводной график (рис. 5). По вертикальной оси откладывается скорость ветра на уровне 850 гПа, а по горизонтальной – скорость ветра у земли, которую ожидают.

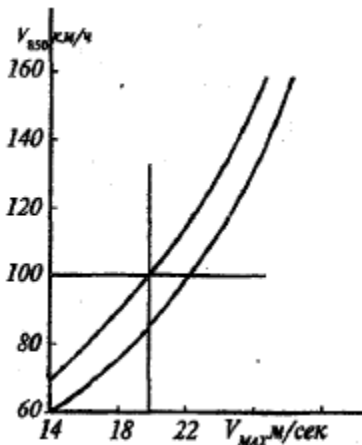


Рисунок 5 – График для прогноза скорости ветра у земли по данным о ветре на уровне 850 гПа

На севере при использовании данного метода прогноза следует использовать другой переводной график (рис. 6). На нем по вертикальной оси откладывается разность значений давления в двух пунктах по нормали к

потоку – величина Δp_2 , а по горизонтали разность значений атмосферного давления в двух пунктах по потоку – величина Δp_1 .

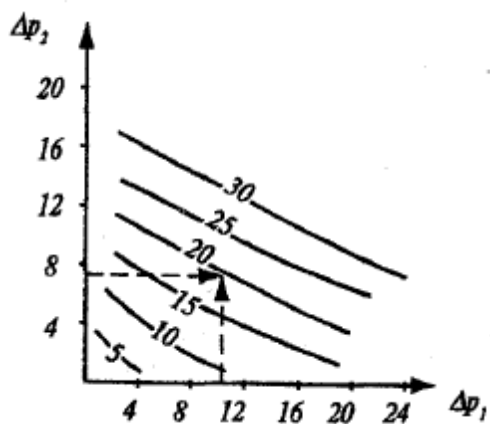


Рисунок 6 – График для определения скорости ветра, применяемый в районах севера

Прогноз Е. Рейтера.

Как известно на практике также возникает необходимость в прогнозе ветра на высотах для авиации. Ведь в свободной атмосфере следует учитывать скорость струйных течения, а также их толщину. Для решения данной задачи Е. Рейтер предложил по данным зондирования атмосферы в произвольном масштабе строить график, по вертикали которого откладывается высота, а по горизонтали – скорость ветра [5].

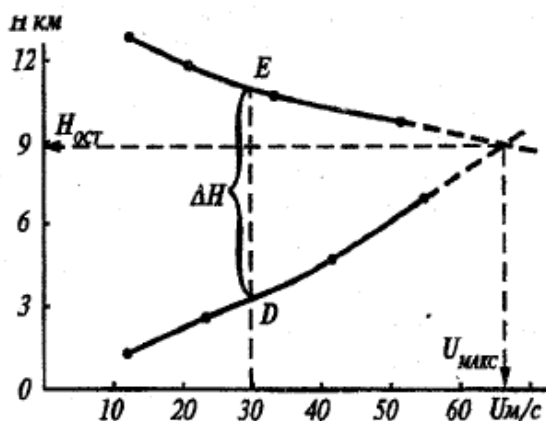


Рисунок 7 – Определение параметров струйного течения по методу Е. Рейтера

ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Почему же синоптики в авиационных прогнозах ветра указывают направление и скорость как на земле, так и на высотах.

Ветер отношению к траектории полета воздушного судна представляет собой переносное движение – это встречный ветер, боковой ветер и восходящий поток.

На малых высотах существенно происходит влияние ветра на параметры воздушного судна. Посадку и взлет самолета необходимо производить против ветра, потому что встречный ветер будет усиливать подъемную силу самолета и воздушную скорость, за счет этого длина разбега самолета при взлете и длина пробега при посадке уменьшится. Именно поэтому при проектировании взлетно-посадочных полос (ВПП) на аэродроме учитывается годовая повторяемость направления ветра. Если производить посадку и взлет самолета при попутном ветре, то длина разбега и длина пробега будут значительно увеличены, вследствие этого для воздушного судна может не хватить длины ВПП, что приведет к авиационному событию.

Также на практике нередко приходится производить взлет и посадку при боковом ветре. Это существенно усложняет пилотирование. Если неточно учесть ветер, то это может привести к посадке вне ВПП. Чтобы обеспечить безопасность, для каждого типа самолета существует предельно-допустимая скорость бокового ветра. Магистральные самолеты могут совершать посадку и взлет при боковом ветре до 15 м/с при сухой ВПП, при влажной ВПП скорость бокового ветра должна быть до 5-8 м/с. Для легких самолетов скорость бокового ветра не должна превышать 10 м/с.

Если скорость встречного ветра составляет 25-30 м/с, то полеты ограничиваются. Причина заключается в том, что физически такой ветер является порывистым, и скорость ветра может колебаться от 10 до 30 м/с.

Такие резкие изменения приводят к резким изменениям подъемной силы, и это опасно как при взлете воздушного судна, так и при посадке.

Что же происходит с воздушным судном на больших высотах. Дело в том, что когда самолет попадает в свободную атмосферу, то на скорость ветра на таких высотах сила трения не действует, и скорость ветра с высотой сравнивается со скоростью реального ветра. Существуют так называемые струйные течения. Струйные течения – это перенос воздуха в виду узкого течения с большими скоростями, обычно в верхней тропосфере и нижней стратосфере с осью вблизи тропопаузы. Максимальная скорость ветра в таком случае наблюдается на оси струйного течения.

Турбулентность обычно отмечается на холодной стороне струйного течения. Если полет будет происходить против струйного течения, то соответственно скорость самолета будет уменьшаться, и наоборот. Если полет происходит на больше расстояния, то струйные течения можно использовать для сокращения времени в полете или для увеличения дальности.

Экипаж самолета также должен иметь информацию о резких изменениях параметров ветра. Одним из таких параметров является сдвиг ветра.

Сдвиг ветра – это векторная разность векторов ветра, измеренная в двух точках пространства, которая отражает изменение, как скорости, так и направления ветра при перемещении от одной точки к другой. По интенсивности, сдвиг ветра делят на критерии (табл. 2). Под действием сдвига ветра, самолет испытывает эволюцию не только в вертикальной плоскости, но и изменяет направление движения [7].

Таблица 2 – критерии сдвига ветра

Интенсивность сдвига ветра (качественный термин)	Влияние на управление воздушным судном	Вертикальный сдвиг ветра, м/с на 30 м; горизонтальный сдвиг ветра м/с на 600 м.
Слабый	Незначительное	0-2
Умеренный	Значительное	2-4
Сильный	Существенные трудности	4-6
Очень сильный	Опасное	>6

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА АЭРОДРОМА ВНУКОВО ЗА ПЕРИОД 2021 – 2022 ГГ.

3.1. Физико-климатическое описание аэродрома Внуково

Аэродром Внуково расположен в 27,8 км юго-западнее центра города Москва и в 5,6 км южнее железнодорожной станции Внуково в зоне умеренно-континентального климата. Географические координаты контрольной точки аэродрома $55^{\circ}35'56,7''$ северной широты и $37^{\circ}16'22,7''$ восточной долготы. Превышение контрольной точки аэродрома: +205,69 м. Магнитное склонение аэродрома составляет $+11,05'$. Номер часового пояса – 2 ($T_m = UTC + 3$ часа). Аэродром работает круглосуточно.

На погоду аэропорта Внуково оказывают влияние воздушные массы, поступающие с Атлантики, с районов Южной Европы, Средиземного, Черного и Каспийского морей, из Средней Азии и Казахстана, реже из Западной Сибири, а также из Арктики. Огромную роль в формировании погоды аэродрома играет Атлантический океан.

Потепление наступают за счет воздушных масс из Южной Европы. Важным климатологическим значением южно-европейского воздуха заключается в том, что с его адвекцией связан переход весной средней суточной температуры воздуха через $0^{\circ}C$ в сторону положительных температур, что приводит к разрушению снежного покрова.

Похолодание в зимний период связано с влиянием холодных воздушных масс из Арктики. Воздействие на погоду воздуха из западной и восточной Арктики различно. Так как западно-арктический воздух формируется над западной частью Северного Ледовитого океана, Баренцевым морем и севером Европейской части России, то образующийся над ними воздух гораздо теплее арктического воздуха, приходящего с

востока. Это объясняется тем, что эти районы согреты теплым океаническим течением Гольфстрим, в то время как воздушные массы из восточной Арктики, формируются над ледяными полями восточного сектора Арктики и над севером Западной Сибири.

3.1.1. Особые явления погоды, характерные для аэродрома Внуково

Осадки, метели.

За период с 2018-2022 гг. во Внуково среднегодовое количество осадков составило 740,3 мм, среднемесячное – 61,7 мм. Суммарное количество осадков от года к году непостоянно, так за 2022 год количество осадков составило – 765 мм, а за 2021 – 822,6 мм. Наибольшее среднемесячное количество осадков отмечают в декабре 2022 – 133,1 мм; наименьшее в августе – 3,6 мм.

Снег на аэродроме Внуково отмечается с сентября по май (самое раннее выпадение снега – 24 сентября 2019 г, самая поздняя 4 мая 2022 г). Среднее число дней со снегом составляет 117,2 дня. Метели на аэродроме наблюдаются с ноября по март. Среднегодовая повторяемость составляет 0,3 %. Максимум метелей отмечается в январе – 1,3 %, минимум в марте – 0,2%. Средняя продолжительность метелей за год – 2,2 ч, максимальная продолжительность отмечалась в январе – 13 ч. При скорости ветра 6-10 м/с метели наблюдались в – 40,8 %, при скорости 11-15 м/с – 53,7 %, наибольшая повторяемость приходит на ветра северо-западного, восточного и южного направлений.

Гроза, град

Грозы на аэродроме отмечаются с марта по сентябрь. Среднегодовая повторяемость гроз составляет 0,6 %. Максимум отмечается в июле – 2,3 %, минимум в марте и апреле – 0,1 %.

Среднее число дней с грозой за год составляет 24,2 дня; максимум дней с грозой приходится на июль – 8,6 дней, минимум на март 0,4 дня.

Град – редкое явления, средняя повторяемость составляет 0,0 %. За период с 2018 по 2022 годы град наблюдался в июне (20.06.2020 – продолжительность 15 минут), в июле (19.07.2018 – продолжительность 6 минут), в августе (10.08.2020 – продолжительность 4 минуты), в мае (29.05.2022 – продолжительность 7 минут).

Ветер

В годовом ходе на аэродроме Внуково отмечается наибольшая повторяемость ветров юго-западного направления (12,6 – 13,3 %) со средней скоростью ветра 5,6 – 6,7 м/с. Значительна также повторяемость ветров юго-восточного (9,1 – 13,3 %), западного и южного направлений со средними скоростями 5,1 – 6,9 м/с.

Среднее число дней со скоростью ветра более 15 м/с – 29,4 в году и 20 м/с – 3,4 дня. По сравнению с предыдущими периодами наблюдений увеличилось среднее число дней со скоростью ветра более 15 м/с. Например, за период с 1996 года по 2005 год среднее количество дней в году со скоростью более 15 м/с составляло 11 дней; в период с 2013 год по 2017 среднее число дней составляло 21 день; с 2016 года по 2020 год – 29 дней; с 2021 года по 2022 год – 32 дня.

За период с 1996 года по 2005 год среднее число дней со скоростью ветра более 20 м/с составляло 0,8; в период с 2013 год по 2017 среднее число дней составляло 2,2; с 2016 по 2020 год – 3,4; с 2021 года по 2022 год – 4,5.

3.2. Анализ ветрового режима на аэродроме Внуково за 2021 – 2022 гг.

Рассмотрим годовой ход повторяемости скоростей ветра ≥ 15 м/с за 2021 год (табл. 3.2.1)

Таблица 3.2.1 – Повторяемость скоростей ветра ≥ 15 м/с за 2021 год

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
НГЯ (≥ 15 м/с)	3	3	3	7	9	4	4	1	2	3	4	2

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ОЯ (≥ 20 м/с)	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
Повторяемость, %	10	10	10	23	29	13	13	3	6	10	13	6

Из таблицы 3.2.1 мы видим, что случаи сильного ветра более 15 м/с наблюдались на аэродроме в течении всего года. Наибольшая повторяемость ветра со скоростью 15м/с и более в 2021 году приходится на весенние месяцы (апрель, май).

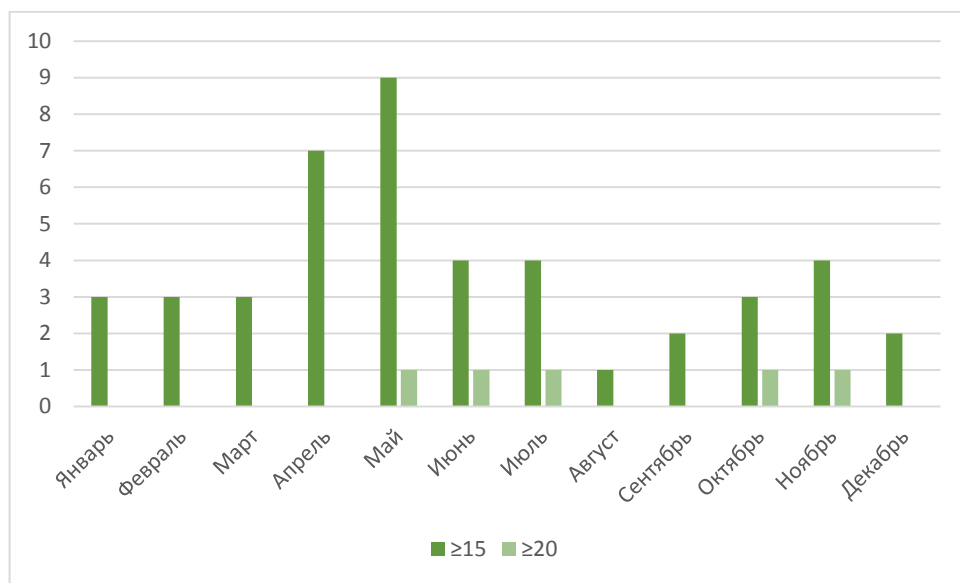


Рисунок 8 – Годовой ход случаев с сильным ветром за 2021 год

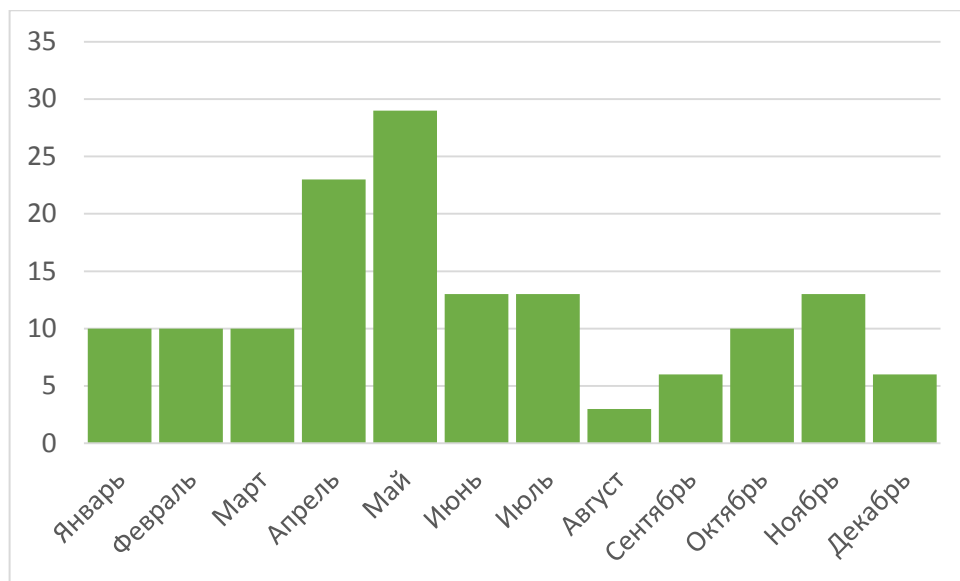


Рисунок 9 – Повторяемость сильных скоростей ветра за 2021 год, %

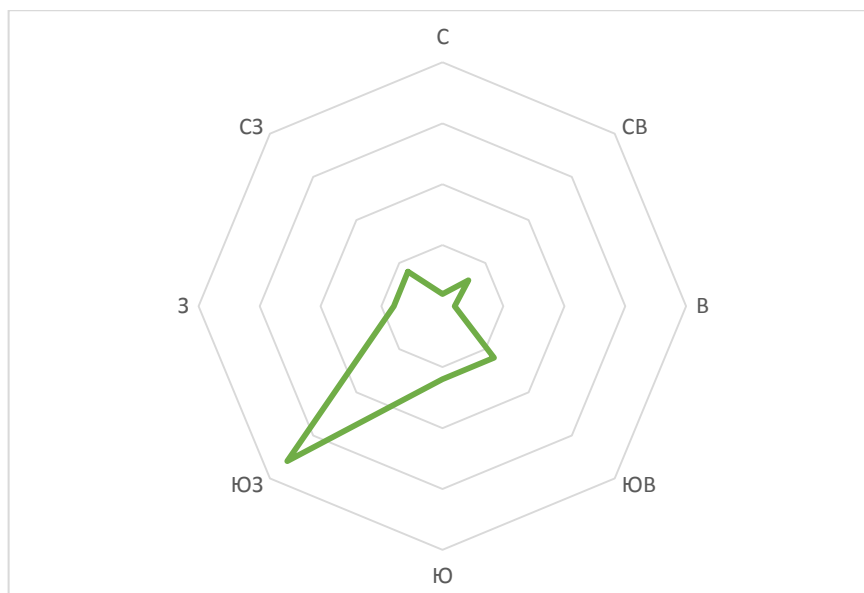


Рисунок 10 – Роза ветров скорости ветра ≥ 15 м/с за 2021 год

Преобладающим направлением ветра при скорости 15 м/с и более в 2021 году были ветра юго-западного направления.

Рассмотрим годовой ход повторяемости скоростей ветра ≥ 15 м/с за 2022 год (табл. 3.2.2)

Таблица 3.2.2 – Повторяемости скоростей ветра ≥ 15 м/с за 2022 год

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
НГЯ (≥ 15 м/с)	2	4	5	5	10	3	5	0	2	5	2	0
ОЯ (≥ 20 м/с)	0	0	2	0	1	0	2	0	0	1	0	0
Повторяемость, %	6	14	16	17	32	10	16	0	6	17	6	0

Из таблицы мы видим, что случаи с сильным ветром на аэродроме Внуково в 2022 году наблюдались не в течение всего года. В августе и декабре таких случаев не наблюдалось. Но наибольшая повторяемость ветра со скоростью более 15 м/с в 2022 году приходится март, апрель, май, июль и октябрь.

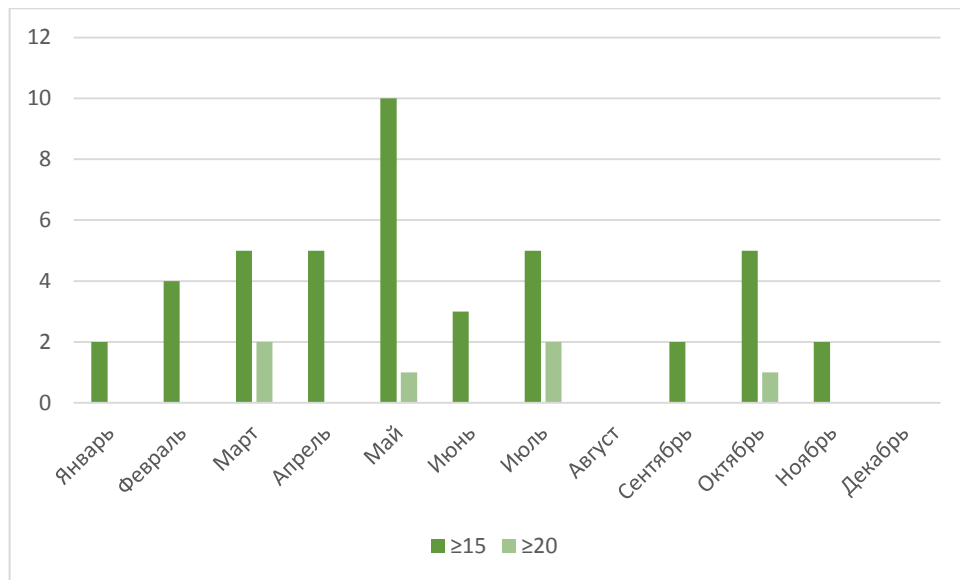


Рисунок 11 – Годовой ход случаев с сильным ветром за 2022 год

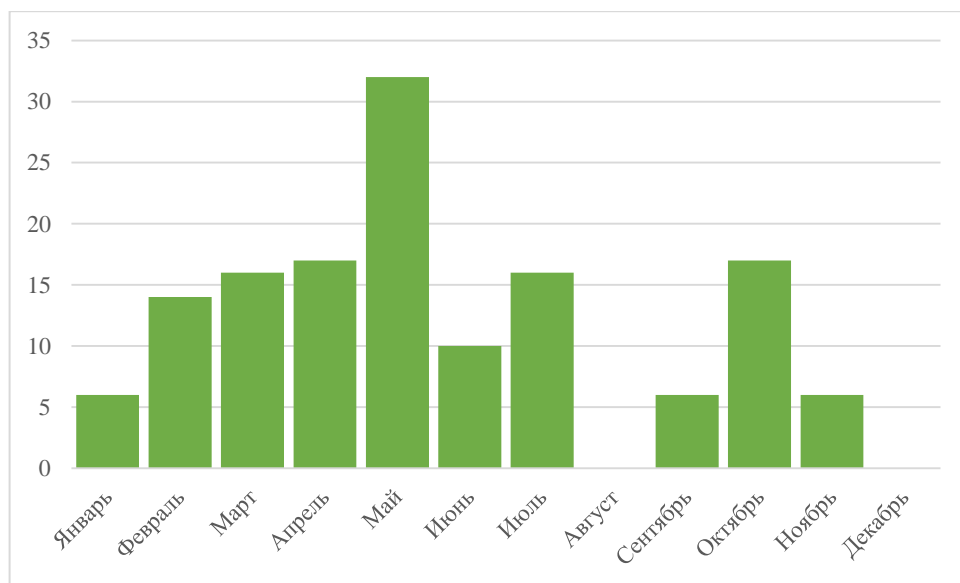


Рисунок 12 – Повторяемость сильных скоростей ветра за 2022 год

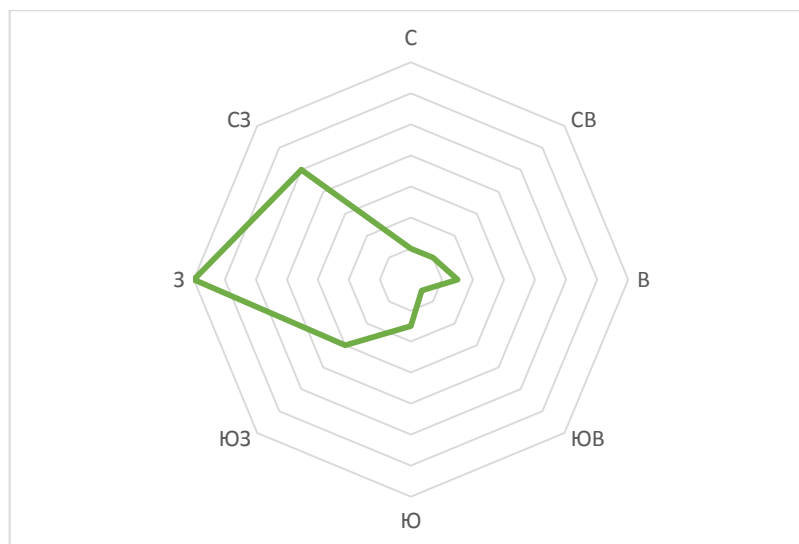


Рисунок 13 – Роза ветров скорости ветра ≥ 15 м/с за 2022 год

Преобладающим направлением ветра в 2022 году при скорости ветра 15 м/с и более является западное и северо-западное направление.

3.3. Типовые синоптические ситуации при случаях сильного ветра за период 2021 – 2022 гг.

Для возникновения сильных скоростей ветра, необходимы благоприятные синоптические условия. Составим сводную таблицу за 2021 и 2022 гг., выпишем все случаи сильного ветра со скоростью 15 м/с и более, определим синоптические условия, которые наблюдались в это время.

Таблица 3.3.1 – продолжительность сильного ветра и сопутствующие явления за 2021 год

Дата	Общая продолжительность за сутки (ч)	V ветра (м/с)	Синоптическая ситуация
13.01.2021	4	15	Теплый фронт (снег)
14.01.2021	4	15	Тыловая часть циклона (снег)
27.01.2021	3	15	Теплый фронт (снег)
12.02.2021	3	18	Теплый фронт (снег)

13.02.2021	4	16	Тыловая часть циклона (снег)
26.02.2021	3	16	Ложбина (дождь)
4.03.2021	3	16	Холодный фронт (снег)
12.03.2021	3	16	Гребень (снег)
30.03.2021	2	15	Ложбина (дождь)
6.04.2021	5	15	Ложбина
8.04.2021	4	22	Холодный волновой фронт (снег с дождем)
15.04.2021	1	15	Теплый сектор циклона
17.04.2021	4	16	Теплый сектор циклона
18.04.2021	2	15	Фронт окклюзии (дождь)
23.04.2021	5	18	Холодный фронт (гроза)
25.04.2021	1	18	Тыловая часть циклона
4.05.2021	4	20	Ложбина (град)
6.05.2021	3	18	Теплый сектор циклона (дождь)
12.05.2021	4	19	Ложбина (гроза, шквал)
15.05.2021	2	15	Холодный волновой фронт (гроза, шквал)
18.05.2021	3	15	Западная периферия АЦ
19.05.2021	5	15	Ложбина (дождь)
20.05.2021	4	19	Ложбина (гроза, шквал)
21.05.2021	2	19	Тыловая часть циклона (дождь)
23.05.2021	4	15	Фронт окклюзии (дождь)
6.06.2021	1	19	Ложбина (гроза, шквал)
8.06.2021	4	21	Ложбина гроза, (шквал)
27.06.2021	2	18	Передняя часть циклона (гроза, шквал)
28.06.2021	3	15	Центр циклона (гроза, шквал)
15.07.2021	2	15	Малогradientное поле высокого давления (гроза, шквал)
17.07.2021	1	16	Холодный фронт (шквал)
23.07.2021	3	16	Ложбина (дождь)
31.07.2021	2	16	Гребень
18.08.2021	4	18	Размытый фронт

			окклюзии (гроза)
4.09.2021	3	15	Тыловая часть циклона (дождь)
14.09.2021	1	16	Тыловая часть циклона
16.10.2021	4	15	Ложбина (дождь)
22.10.2021	2	27	Холодный фронт (дождь)
24.10.2021	2	16	Ложбина (дождь)
6.11.2021	3	17	Ложбина (дождь)
7.11.2021	4	17	Ложбина (дождь)
20.11.2021	4	16	Ложбина (снег с дождем)
30.11.2021	3	22	Холодный фронт (снег, дождь)
25.12.2021	2	15	Вторичный холодный фронт (снег)
26.12.2021	4	17	Фронт окклюзии (снег)

На рис. 14 представлена повторяемость синоптических ситуаций при сильном ветре за период 2021 год. Мы видим, что ложбина циклона является наиболее часто повторяемой синоптической обстановкой, при которой наблюдаются сильные скорости ветра является – 15 %, на втором месте холодный фронт – 8 %, тыловая часть циклона – 6 %.



Рисунок 14 – повторяемость синоптических ситуаций при сильном ветре за 2021 год

В таблице 3.3.2 и на рисунке 15 представлена продолжительность сильного ветра и сопутствующие явления за 2022 год.

Таблица 3.3.2 – Продолжительность сильного ветра и сопутствующие явления за 2022 год

Дата	Общая продолжительность за сутки (ч)	V ветра (м/с)	Синоптическая ситуация
13.01.2022	2	15	Ложбина (снег)
14.01.2022	5	17	Холодный фронт (снег)
15.01.2022	4	15	Тыловая часть циклона (снег)
16.01.2022	3	15	Тыловая часть циклона (снег)
17.01.2022	5	15	Фронт окклюзии (снег)
13.02.2022	2	17	Ложбина
16.02.2022	7	16	Гребень
17.02.2022	8	16	Ложбина (дождь)
20.02.2022	5	17	Ложбина (снег)
22.02.2022	2	16	Тыловая часть циклона (снег с дождем)
04.03.2022	4	17	Ложбина
05.03.2022	7	15	Тыловая часть циклона
06.03.2022	4	15	Ложбина
26.03.2022	8	23	Ложбина (дождь со снегом)
27.03.2022	4	20	Тыловая часть циклона (дождь)
28.03.2022	2	17	Ложбина (дождь)
02.04.2022	10	15	Холодный фронт (дождь)
05.04.2022	2	15	Ложбина
06.04.2022	1	17	Волновой холодный фронт
08.04.2022	6	18	Холодный фронт (дождь)
16.04.2022	7	15	Волновой холодный фронт (дождь)
17.04.2022	10	15	Передняя часть циклона (дождь)
20.04.2022	5	17	Ложбина
21.04.2022	4	16	Фронт окклюзии
29.04.2022	2	16	Малогradientное поле повышенного

			давления (гроза)
01.05.2022	2	15	Западная периферия АЦ
03.05.2022	7	18	Ложбина (гроза)
04.05.2022	5	16	Тыловая часть циклона
09.05.2022	3	18	Тыловая часть циклона
10.05.2022	4	18	Тыловая часть циклона
12.05.2022	1	15	Ложбина (дождь)
13.05.2022	3	20	Тыловая часть циклона (гроза)
14.05.2022	2	16	Тыловая часть циклона (гроза)
16.05.2022	3	18	Ложбина
19.05.2022	3	15	Ложбина (дождь)
22.05.2022	4	16	Передняя часть циклона
23.05.2023	4	16	Гребень
29.05.2022	7	17	Тыловая часть циклона
03.06.2022	2	15	Восточная периферия АЦ (гроза)
06.06.2022	5	15	Восточная периферия АЦ (дождь)
14.06.2022	3	16	Холодный фронт (гроза)
17.06.2022	4	15	Тыловая часть циклона (гроза)
19.06.2022	3	15	Фронт окклюзии (дождь)
07.07.2022	5	16	Ложбина (гроза)
10.07.2022	1	22	Ложбина (гроза, шквал)
11.07.2022	1	16	Ложбина (гроза, шквал)
19.07.2022	1	15	Тыловая часть циклона (гроза)
21.07.2022	1	21	Фронт окклюзии (шквал)
28.07.2022	1	25	Холодный волновой фронт (гроза)
07.08.2022	2	15	Холодный волновой фронт (гроза)
19.08.2022	7	16	Гребень
31.08.2022	10	15	Ложбина (дождь)
01.09.2022	4	15	Тыловая часть циклона (дождь)
02.09.2022	7	16	Тыловая часть циклона (дождь)
05.09.2022	3	15	Тыловая часть циклона (дождь)

19.09.2022	9	17	Антициклон (дождь)
03.10.2022	2	18	Ложбина (дождь)
04.10.2022	7	15	Тыловая часть циклона (дождь)
07.10.2022	4	16	Ложбина
18.10.2022	1	15	Ложбина (дождь)
30.10.2022	1	22	Холодный фронт (дождь со снегом)
12.11.2022	4	18	Ложбина (дождь)
13.11.2022	24	17	Ложбина (дождь, снег)
14.11.2022	2	15	Тыловая часть циклона (дождь, снег)

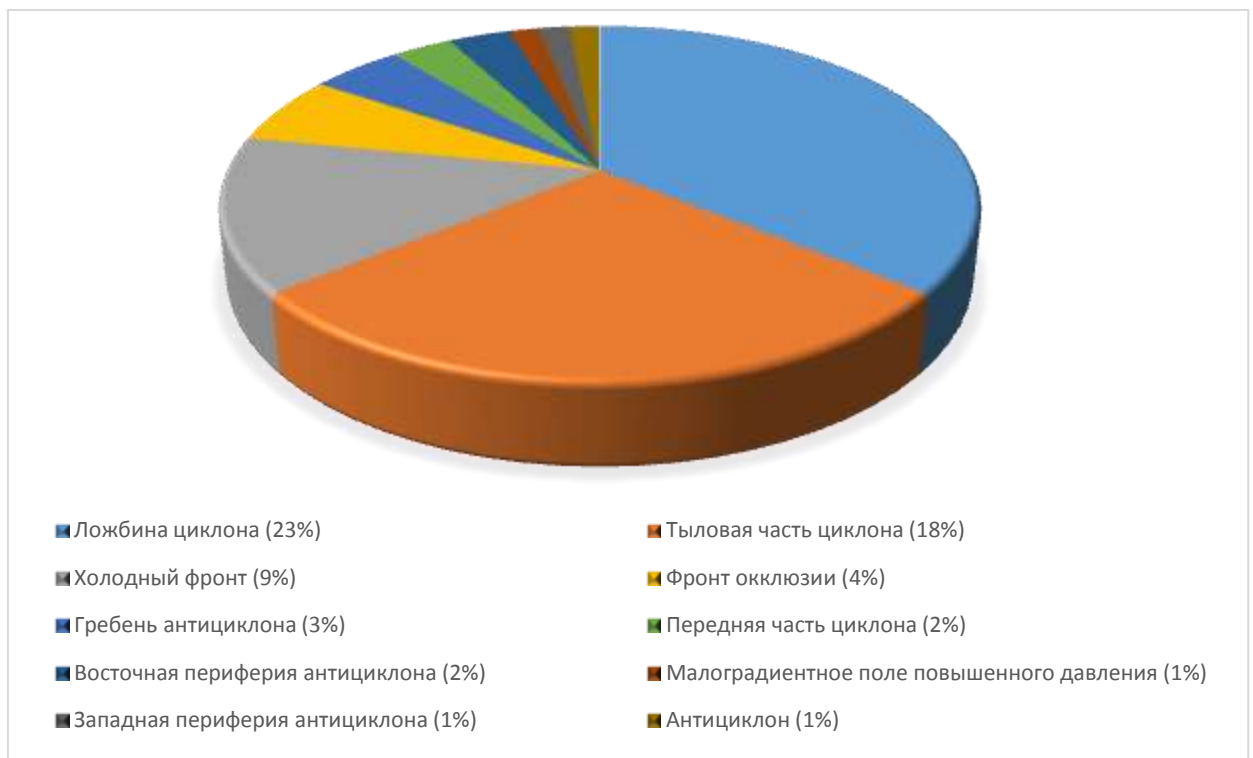


Рисунок 15 – повторяемость синоптических ситуаций при сильном ветре за 2022 год

На рисунке мы видим, что наиболее часто повторяемой синоптической обстановкой в 2022 году при которой наблюдаются сильные скорости ветра, является также ложбина циклона – 23 %, на втором месте тыловая часть циклона – 18 %, на третьем месте холодный фронт – 9 %.

Далее представлены типовые синоптических ситуаций при сильном ветре за 26.03.2022 г. (рис.16) – теплый сектор циклона, и за 04.05.2022 г. (рис.17) – ложбина.

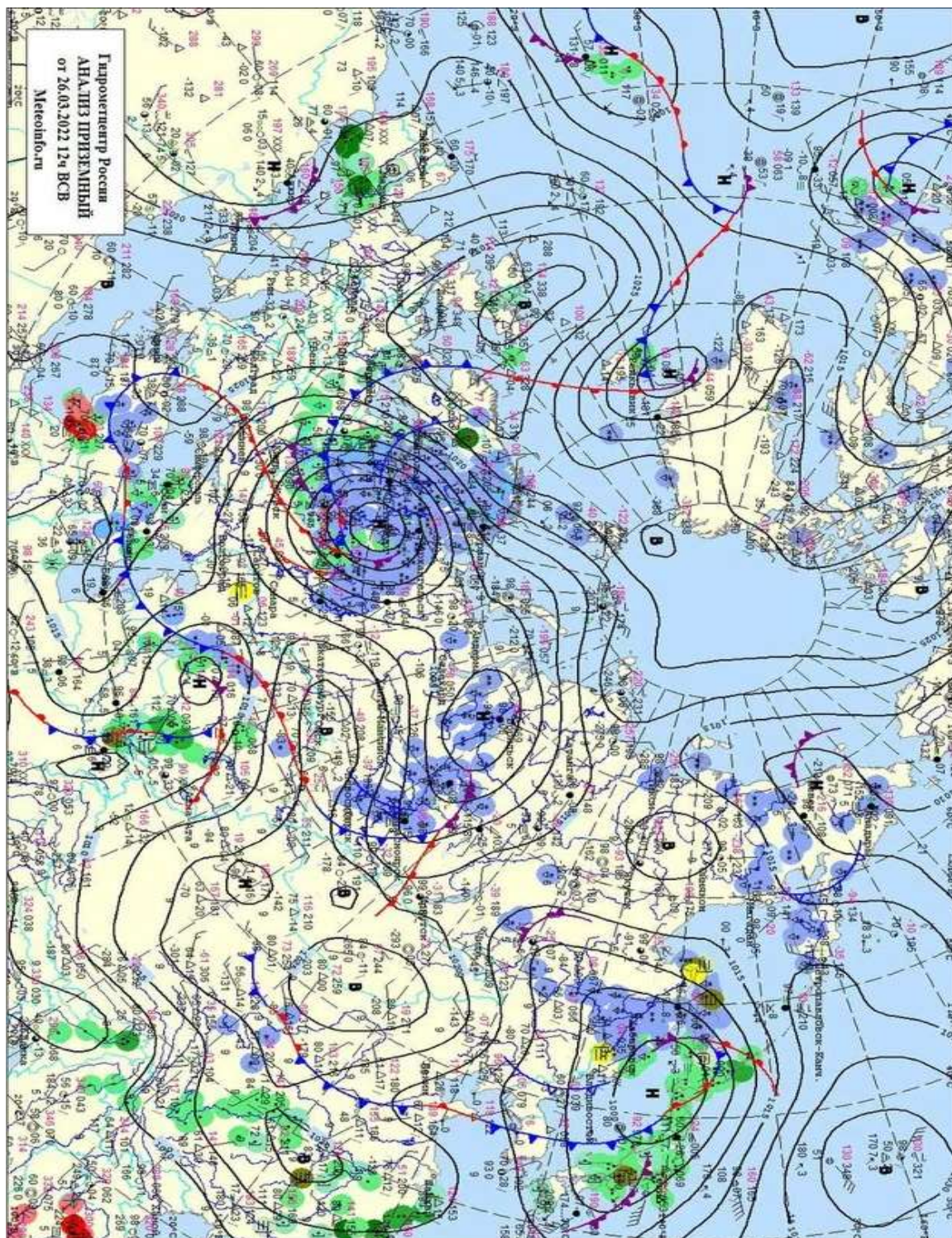


Рисунок 16 – Синоптическая ситуация за 26.03.2022 г. (теплый сектор циклона)

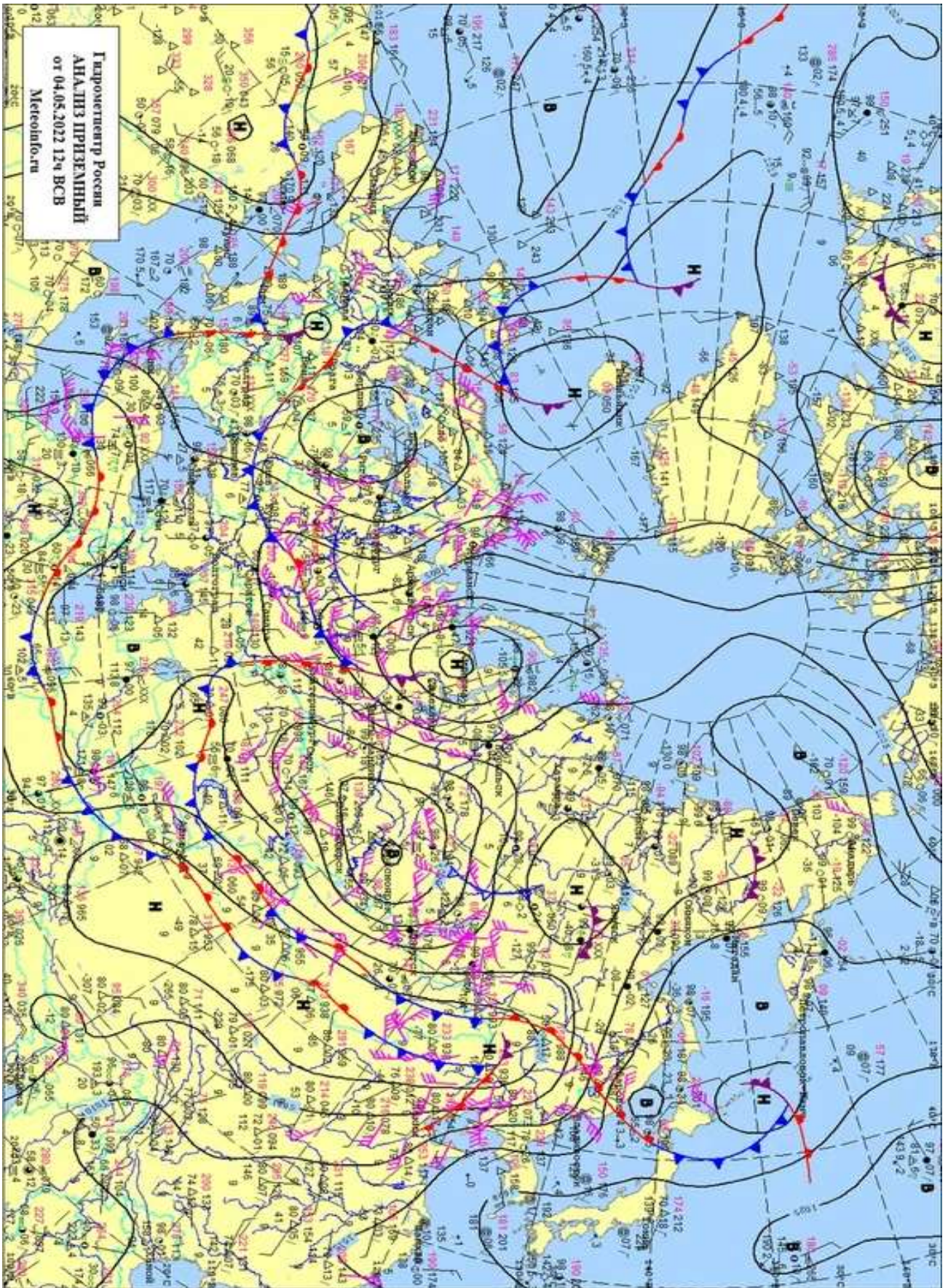


Рисунок 17 – Синоптическая ситуация за 04.05.2022 г.

(ложбина)

3.4. Общая оправдываемость прогноза и критерии успешности

Посчитаем общее количество случаев со скоростью ветра более 15 м/с, построим двухфазную матрицу и вычислим общую оправдываемость прогноза и критерии успешности за 2021 и 2022 год.

2021 год:

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	43	0	43
$\bar{Ф}$	7	315	322
Σ	50	315	365

- 1) Общая оправдываемость прогноза в процентном соотношении определяется по формуле:

$$P = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} * 100\% \quad (3.4.1)$$

Где: N – общее количество прогнозов

n_{11} и n_{22} – число случаев оправдавшихся прогнозов

$$P = \frac{43+315}{365} * 100\% = 98\%$$

- 2) Оправдываемость прогноза факта наличия явления:

$$U = \frac{n_{11}}{n_{10}} * 100\% \quad (3.4.2)$$

Где: n_{10} – число случаев наличия явления

$$U = \frac{43}{43} * 100\% = 100\%$$

3) Предупрежденность факта наличия явления:

$$\Pi = \frac{n_{11}}{n_{01}} * 100\% \quad (3.4.3)$$

Где: n_{01} – число случаев прогнозов наличия явления

$$\Pi = \frac{43}{50} * 100\% = 86\%$$

4) Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления:

$$U_{\text{б.т.}} = \frac{n_{22}}{n_{20}} * 100\% \quad (3.4.4)$$

Где: n_{22} – число случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явления

n_{20} – число случаев отсутствия явления

$$U_{\text{б.т.}} = \frac{315}{322} * 100\% = 98\%$$

5) Предупрежденность факта отсутствия явления:

$$П_{б.т.} = \frac{n_{22}}{n_{02}} * 100\% \quad \#(3.4.5)$$

Где: n_{02} – число случаев прогнозов отсутствия явления

$$П_{б.т.} = \frac{315}{315} * 100\% = 100\%$$

б) Критерий точности по Обухову:

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right) \quad \#(3.4.6)$$

Где: n_{12} – число случаев неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления

n_{21} – число случаев неоправдавшихся прогнозов наличия явления

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{43} + \frac{7}{322} \right) = 0.98$$

Построим матрицы сопряженности по сезонам года, чтобы узнать в какой период года происходит наиболее лучшая оправдываемость прогноза.

Декабрь – Февраль			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	6	0	6
$\bar{Ф}$	2	82	84
Σ	8	82	90

Март – Май			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	19	0	19
$\bar{Ф}$	4	69	73
Σ	23	69	92

$$P = \frac{6 + 82}{90} * 100\% = 98\%$$

$$U = \frac{6}{6} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{6}{8} * 100\% = 75\%$$

$$U_{6.т.} = \frac{82}{84} * 100\% = 98\%$$

$$\Pi_{6.т.} = \frac{82}{82} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{6} + \frac{2}{84} \right) = 0,98$$

Июнь – Август			
	П	$\bar{\Pi}$	Σ
Ф	9	0	9
$\bar{\Phi}$	0	83	83
Σ	9	83	92

$$P = \frac{9 + 83}{92} * 100\% = 100\%$$

$$U = \frac{9}{9} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{9}{9} * 100\% = 100\%$$

$$U_{6.т.} = \frac{83}{83} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi_{6.т.} = \frac{83}{83} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{9} + \frac{0}{83} \right) = 1$$

$$P = \frac{19 + 69}{92} * 100\% = 96\%$$

$$U = \frac{19}{19} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{19}{23} * 100\% = 83\%$$

$$U_{6.т.} = \frac{69}{73} * 100\% = 95\%$$

$$\Pi_{6.т.} = \frac{69}{69} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{19} + \frac{4}{73} \right) = 0,95$$

Сентябрь – Ноябрь			
	П	$\bar{\Pi}$	Σ
Ф	9	0	9
$\bar{\Phi}$	1	81	82
Σ	10	81	91

$$P = \frac{9 + 81}{91} * 100\% = 99\%$$

$$U = \frac{9}{9} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{9}{10} * 100\% = 90\%$$

$$U_{6.т.} = \frac{81}{82} * 100\% = 99\%$$

$$\Pi_{6.т.} = \frac{81}{81} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{9} + \frac{8}{82} \right) = 0,99$$

Наибольшая оправдываемость сильных скоростей ветра в 2021 году была в летний период года – 100 %. Наименьшая оправдываемость в весенний период – 96 %. Наибольшее количество случаев сильного ветра на аэродроме Внуково было зафиксировано в весенний период, наименьшее количество в зимний период.

Анализируя случаи сильного ветра за 2021 год, можно отметить, что наблюдались случаи, когда модель спрогнозировала скорость ветра больше, чем была по факту. Например, 31.01.2021 г, модель спрогнозировала скорость 15 м/с, а на аэродроме в этот день фактическая скорость ветра составила 13 м/с. Таких случаев за год было 7, поэтому общая оправдываемость оказалась ниже и составила 98 %.

2022 год:

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	71	0	71
$\bar{Ф}$	18	276	294
Σ	89	276	365

$$P = \frac{71+276}{365} * 100\% = 95\%$$

$$U = \frac{71}{71} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{71}{89} * 100\% = 80\%$$

$$U_{б.т.} = \frac{276}{294} * 100\% = 94\%$$

$$\Pi_{б.т.} = \frac{276}{276} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{71} + \frac{18}{294} \right) = 0,94$$

Декабрь – Февраль			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	14	0	14
$\bar{Ф}$	4	72	76
Σ	18	72	90

$$P = \frac{14 + 72}{90} * 100\% = 96\%$$

$$U = \frac{14}{14} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{14}{18} * 100\% = 78\%$$

$$U_{б.т.} = \frac{72}{76} * 100\% = 95\%$$

$$\Pi_{б.т.} = \frac{72}{72} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{14} + \frac{4}{76} \right) = 0,95$$

Март – Май			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	30	0	30
$\bar{Ф}$	7	55	62
Σ	37	55	92

$$P = \frac{30 + 55}{92} * 100\% = 92\%$$

$$U = \frac{30}{30} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{30}{37} * 100\% = 81\%$$

$$U_{б.т.} = \frac{55}{62} * 100\% = 89\%$$

$$\Pi_{б.т.} = \frac{55}{55} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{30} + \frac{7}{62} \right) = 0,89$$

Июнь – Август			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	15	0	15
$\bar{Ф}$	4	73	77
Σ	19	73	92

$$P = \frac{15 + 73}{92} * 100\% = 96\%$$

$$U = \frac{15}{15} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{15}{19} * 100\% = 79\%$$

Сентябрь – Ноябрь			
	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	12	0	12
$\bar{Ф}$	3	76	79
Σ	15	76	91

$$P = \frac{12 + 76}{91} * 100\% = 97\%$$

$$U = \frac{12}{12} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{12}{15} * 100\% = 80\%$$

$$U_{\text{б.т.}} = \frac{73}{77} * 100\% = 95\%$$

$$U_{\text{б.т.}} = \frac{76}{79} * 100\% = 96\%$$

$$P_{\text{б.т.}} = \frac{73}{73} * 100\% = 100\%$$

$$P_{\text{б.т.}} = \frac{76}{76} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{15} + \frac{4}{77} \right) = 0,95$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{12} + \frac{3}{79} \right) = 0,96$$

Наибольшая оправдываемость сильных скоростей ветра в 2022 году была в осенний период – 97 %, наименьшая оправдываемость в весенний период - 92 %. Наибольшее число случаев сильного ветра было в весенний период, наименьшее в осенний.

Анализируя случаи сильного ветра за 2022 год, можно отметить, что наблюдались случаи, когда модель также, как и в 2021 году спрогнозировала скорость ветра больше, чем была по факту. Например, 05.07.2022 и 06.07.2022 гг., модель спрогнозировала скорость 15 м/с, а на аэродроме в эти дни фактическая скорость ветра составила 11 м/с. Таких подобных случаев за год было 18, поэтому общая оправдываемость оказалась ниже и составила 95%.

Построим сводную таблицу за два года, для того чтобы проанализировать общую оправдываемость ветра и критерии успешности на аэродроме Внуково за 2021-2022 гг.

Таблица 3.4.1 – общая таблица оправдываемости за 2021-2022 гг.

Критерии/год	2021	2022
P	98%	95%
U	100%	100%
П	86%	80%
U _{б.т.}	98%	94%
П _{б.т.}	100%	100%
Q	0.98	0.94

При сравнении получившихся результатов, можно сказать: в 2021 году общая успешность оправдавшихся прогнозов была выше на 3%, чем в 2022 году. Были выше также критерии успешности и критерий точности Обухова.

3.5. Прогноз сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021-2022 гг. по прогностическим моделям

На аэродроме Внуково в 2021 – 2022 гг. достаточно высокий процент оправдавшихся прогнозов. Для прогнозирования характеристик ветра синоптики используют модель COSMO-Ru/6.0, которая была доработана для территории аэродрома Внуково. Мне стало интересно, сможет ли любая другая модель также точно спрогнозировать сильные скорости ветра на аэродроме Внуково. Для этого я выбрала отрезок времени, который равен ста суткам с 26 марта 2022 года по 3 июля 2022 года, выписала максимальную скорость ветра и прогноз максимальной скорости за каждый день. Для сравнения, я выбрала две модели – немецкую модель ICON и американскую модель GFS. Результаты исследований приведены в сводной таблице 3.5.1.

Модель COSMO-Ru/6.0

Для прогнозирования характеристик ветра на аэродроме Внуково используется негидростатическая мезомасштабная численная модель COSMO-Ru/6.0. Разработана модель Гидрометцентром России. Шаг сетки 6 км. Данная модель основана на системе термогидродинамических уравнений, которые описывают сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере [2].

Уравнения модели записываются в системе координат, которые образованы сферической системой координат со смещенным северным полюсом по задаваемому меридиану и орографической вертикальной координатой, связанной с высотой [2].

Результаты численного прогноза по модели подготавливаются ежедневно 4 раза в сутки в 00, 06, 12 и 18 ч по UTC периодом на 120 часов.

На рисунке 18 представлены метеограммы COSMO-Ru/6.0 с прогнозом следующих характеристик и явлений: скорости и направления ветра у земли и на высотах (м/с), температуры воздуха у земли ($^{\circ}\text{C}$), температуры точки росы у земли и на высотах ($^{\circ}\text{C}$), давления воздуха (гПа), количество облачности (баллы), высота нижней и верхней границы конвективной облачности (км).

Модель ICON

Глобальная негидростатическая модель атмосферы является совместной разработкой Немецкой службы погоды и Метеорологического института Макса Планка Гамбургского. Модель введена в практику с 20 января 2015 года. Предназначена для прогнозирования погоды и исследования климата, использует горизонтальную треугольную сетку, шаг горизонтальной сетки 13 км. Расчет производится с шагом в один час на период 72 часа [4].

Модель GFS

Эта математическая модель, которая используется для прогнозирования погоды. Модель была создана и в настоящее время используется Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA). Обновляется 4 раза в сутки. Прогнозы рассчитываются на период до 16 суток. Шаг модели составляет 22 км, расчеты выполняются с трехчасовым шагом [3].

Таблица 3.5.1 – результаты расчетов сильных скоростей ветра по моделям

Дата	Модель COSMO-Ru/6.0 (м/с)	Модель ICON (м/с)	Модель GFS (м/с)	Фактическая скорость (м/с)
26.03.2022	25	20	22	23
27.03.2022	20	21	19	20
28.03.2022	22	21	21	21
29.03.2022	23	17	19	21
30.03.2022	11	9	9	11
31.03.2022	6	6	8	6
01.04.2022	15	11	13	14
02.04.2022	15	13	13	15
03.04.2022	15	13	13	11
04.04.2022	7	8	8	7
05.04.2022	15	16	16	15
06.04.2022	18	17	18	18
07.04.2022	15	12	14	13
08.04.2022	18	14	18	18
09.04.2022	13	8	15	13

10.04.2022	10	9	14	10
11.04.2022	15	10	12	14
12.04.2022	13	11	12	11
13.04.2022	13	13	13	13
14.04.2022	15	12	14	14
15.04.2022	10	7	6	10
16.04.2022	18	15	13	16
17.04.2022	15	13	13	15
18.04.2022	13	10	9	13
19.04.2022	11	11	12	11
20.04.2022	18	16	15	17
21.04.2022	17	14	17	16
22.04.2022	5	6	4	5
23.04.2022	9	11	9	9
24.04.2022	12	9	12	12
25.04.2022	13	9	12	11
26.04.2022	9	8	12	9
27.04.2022	15	12	9	14
28.04.2022	9	6	8	9
29.04.2022	18	16	13	16
30.04.2022	13	14	8	13
01.05.2022	15	14	16	15
02.05.2022	9	12	8	9
03.05.2022	18	16	17	18
04.05.2022	18	18	14	18
05.05.2022	15	10	13	15
06.05.2022	12	9	11	12
07.05.2022	13	11	12	13
08.05.2022	14	13	13	14
09.05.2022	18	13	17	18
10.05.2022	18	17	14	18
11.05.2022	14	13	14	13
12.05.2022	18	12	14	18
13.05.2022	21	18	17	20
14.05.2022	18	18	18	16
15.05.2022	13	10	12	12
16.05.2022	21	18	17	20
17.05.2022	13	12	12	12
18.05.2022	14	13	12	14
19.05.2022	15	14	15	15
20.05.2022	8	8	8	8
21.05.2022	11	11	10	11
22.05.2022	16	17	15	16
23.05.2022	16	17	13	16
24.05.2022	14	12	15	14
25.05.2022	13	13	11	13
26.05.2022	14	9	14	14
27.05.2022	15	13	14	15
28.05.2022	15	10	13	14
29.05.2022	18	12	18	17

30.05.2022	7	5	6	7
31.05.2022	8	9	13	8
01.06.2022	13	8	10	12
02.06.2022	13	10	10	12
03.05.2022	15	13	15	15
04.06.2022	10	9	9	10
05.06.2022	14	9	13	14
06.06.2022	18	10	16	17
07.06.2022	13	9	12	11
08.06.2022	9	9	5	9
09.06.2022	6	6	5	6
10.06.2022	11	9	10	11
11.06.2022	6	7	6	6
12.06.2022	6	8	8	6
13.06.2022	7	6	9	7
14.06.2022	16	10	17	16
15.06.2022	13	14	12	13
16.06.2022	12	10	12	12
17.06.2022	17	10	17	17
18.06.2022	13	10	8	12
19.06.2022	18	15	16	17
20.06.2022	10	8	10	10
21.06.2022	3	5	4	3
22.06.2022	11	9	12	11
23.06.2022	12	9	12	12
24.06.2022	12	9	11	12
25.06.2022	10	6	8	10
26.06.2022	10	10	4	10
27.06.2022	13	9	14	13
28.06.2022	13	9	10	13
29.06.2022	11	6	12	11
30.06.2022	15	11	10	14
01.07.2022	13	12	13	13
02.07.2022	10	10	9	10
03.07.2022	15	10	14	15

Построим матрицы методических прогнозов по модели COSMO – Ru/6.0, ICON, GFS – посчитаем общую оправдываемость и критерии успешности.

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	34	0	34
$\bar{Ф}$	7	59	66
Σ	41	59	100

Общая оправдываемость:

$$P = \frac{34 + 59}{100} * 100\% = 93\%$$

Критерии успешности:

$$U = \frac{34}{34} * 100\% = 100\%$$

$$\Pi = \frac{34}{41} * 100\% = 83\%$$

$$U_{\text{б.т.}} = \frac{59}{66} * 100\% = 89\%$$

$$\Pi_{\text{б.т.}} = \frac{59}{59} * 100\% = 100\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{0}{34} + \frac{7}{66} \right) = 0,89$$

Модель ICON

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	17	17	34
$\bar{Ф}$	3	63	66
Σ	20	80	100

Общая оправдываемость:

$$P = \frac{17 + 63}{100} * 100\% = 80\%$$

Критерии успешности:

$$U = \frac{17}{29} * 100\% = 50\%$$

$$\Pi = \frac{17}{20} * 100\% = 85\%$$

$$U_{б.т.} = \frac{63}{66} * 100\% = 95\%$$

$$\Pi_{б.т.} = \frac{63}{80} * 100\% = 79\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{17}{34} + \frac{3}{66} \right) = 0,55$$

Модель GFS

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	23	11	34
$\bar{Ф}$	3	63	66
Σ	26	74	100

Общая оправдываемость:

$$P = \frac{23 + 63}{100} * 100\% = 86\%$$

Критерии успешности:

$$U = \frac{23}{34} * 100\% = 86\%$$

$$П = \frac{23}{26} * 100\% = 88\%$$

$$U_{б.т.} = \frac{63}{66} * 100\% = 95\%$$

$$П_{б.т.} = \frac{63}{74} * 100\% = 85\%$$

$$Q = 1 - \left(\frac{11}{34} + \frac{3}{66} \right) = 0,73$$

Общая оправдываемость прогнозов по моделям за выбранный промежуток времени составила:

Модель COSMO-Ru/6.0 – 93 %, по модели ICON – 85 %, модель GFS - 86 %.

После выполненной работы можно смело сказать, что общая оправдываемость прогноза по глобальным моделям неплохая. Использование моделей ICON и GFS для прогнозирования максимальных скоростей ветра на

аэродроме Внуково в качестве дополнительного метода будет также целесообразно, как и использование региональной модели COSMO-Ru/6.0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы выполнено следующее:

1. Создан архив случаев сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021-2022 гг.;
2. Проанализирован годовой ход случаев сильного ветра;
3. Проанализированы случаи сильного ветра по сезонам;
4. Проанализирован суточный ход случаев сильного ветра;
5. Рассмотрены типовые синоптические ситуации при возникновении сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;
6. Рассмотрены сопутствующие явления при возникновении сильного ветра;
7. Построены матрицы сопряженности случаев сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;
8. Определены критерии успешности прогноза сильного ветра на аэродроме Внуково за период 2021 – 2022 гг.;
9. Спрогнозирован сильный ветер на аэродроме Внуково по моделям и сопоставлен с результатами фактических наблюдений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <https://www.ventusky.com>
2. <https://meteoinfo.ru>
3. <https://www.meteorologiaenred.com>
4. <https://www.meteoprog.com>
5. Богаткин О.Г. – Информационно - справочная книга авиационного метеоролога. - СПб. 2010 – 220с.;
6. Богаткин О.Г. – Авиационная метеорология. – СПб. 2005 – 329с;
7. Иванова А.Р., Шакина Н.П. – Прогнозирование метеорологических условий для авиации. – Москва, 2016 – 312с.;
8. Подольская Э.Л. Механика жидкости и газа. Раздел «Геофизическая гидродинамика». Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007.- 154с.;
9. Наставление гидрометеорологическим станциями и постам Выпуск 3, Ч. 1. – Л.:Гидрометеиздат, 1985 – 301с.;