



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Комплексный подход к прогнозу атмосферной турбулентности
в зоне московского РПИ»

Исполнитель Жукова Анастасия Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 09 » июня 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ

	Содержание	2
	Сокращения	3
	Введение	4
1	Турбулентность	7
1.1	Болтанка самолета, ее интенсивность и перегрузка самолета	10
1.2	Типы турбулентности	14
1.2.1	Термическая турбулентность	15
1.2.2	Механическая турбулентность	17
1.2.3	Орографическая турбулентность	20
1.2.4	Турбулентность спутного следа	28
1.2.5	Турбулентность ясного неба	34
2	Методы прогнозирования турбулентности	37
2.1	Турбулентность в струйном течении	37
2.2	Синоптический метод прогноза	39
2.3	Графический метод прогноза	43
3	Комплексный подход к прогнозу атмосферной турбулентности по Московскому РПИ	47
3.1	Прогнозы GAMET	47
3.2	Прогнозы SIGMET	47
3.3	Исследование методов прогнозирования атмосферной турбулентности	50
	Заключение	61
	Список использованной литературы	62

СОКРАЩЕНИЯ

ИКАО	-	Международная организация гражданской авиации
АМЦ	-	Авиационный метеорологический центр
АМСГ	-	Авиационная метеорологическая станция гражданская
GAMET	-	Зональный прогноз, составляемый открытым текстом с сокращениями для полетов на малых высотах
SIGMET	-	Предупреждения об опасных метеорологических явлениях, наблюдаемых или ожидаемых в пределах конкретного Района Полетной Информации (РПИ)
AIRMET	-	Информация о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений и условий погоды по маршруту полета, не указанных ранее в прогнозе GAMET
AIREP SPECIAL	-	Отчеты о фактических погодных условиях самолета в полете
ОВД	-	Орган воздушного движения
РПИ	-	Район полетной информации
ВС	-	Воздушное судно
ВПП	-	Взлетно-посадочная полоса
ТЯН	-	Турбулентность ясного неба
FL	-	Эшелон полета

ВЕДЕНИЕ

Атмосферная турбулентность – это мелкомасштабные, нерегулярные движения воздуха, характеризующиеся ветрами, меняющимися по скорости и направлению. Турбулентность является важным фактором атмосферной циркуляции, потому что она «перемешивает и взбалтывает» атмосферу, заставляя водяной пар, аэрозоли, а также энергию распределяться как по вертикали, так и по горизонтали [1].

Стоит отметить, что не все турбулентные вихри вызывают болтанку и затрудняют выполнение полетов. Только соизмеримые или превышающие размер вихри могут оказать существенное влияние на ВС [2].

До 20% авиационных происшествий в последние годы связаны с сложными условиями полета. Самый сложный этап полета - посадка. На воздушное судно оказывают влияние не только различные силы, но и неблагоприятные погодные условия, негативное влияние которых в разы больше. Как следствие авиационных происшествий и инцидентов на посадке на порядок больше, чем на других этапах полета [3].

Атмосферной турбулентности уделяют особое внимание прогнозисты еще и потому, что это явление является сложным для прогнозирования, хотя и достаточно часто встречающимся.

Ниже представлены некоторые летные происшествия, связанные с болтанкой:

- 260 человек погибли на борту самолета Airbus A-300 компании American Airlines в 2001 году. Воздушное судно попало в зону турбулентности сразу после взлета из аэропорта г. Нью-Йорк. Экипаж не справился с управлением;

- в 2010 году в небе над Россией Боинг Вьетнамских авиалиний находился в зоне турбулентности, направляясь из Ханоя в Париж. 30 человек

получили ранения;

- пять человек было ранено осенью 2015 года во время рейса Гренада-Майами на борту самолета American Airlines, который попал в зону турбулентности. В корпусе самолета образовалась трещина;

- весной 2016 года в аэропорту г. Ростов-на-Дону разбился Боинг авиакомпании FlyDubai. Самолет попал в зону турбулентности при посадке. 62 человека погибли;

- в 2016 году авиакомпания Etihad, выполнявшая рейс из Абу-Даби в Джакарту, попала в зону атмосферной турбулентности. Пострадали более 30 человек;

- 27 семь человек были ранены на борту самолета, выполнявшего рейс Москва-Бангкок 1 мая 2017 года, компания Аэрофлот, при попадании в зону турбулентности ясного неба [4].

В оперативной работе синоптик АМЦ/АМСГ обязан своевременно предоставлять прогноз атмосферной турбулентности в форматах GAMET, SIGMET, AIRMET и AIREP SPECIAL, согласно должностной инструкции и нормативных документов, а также в кратчайшие сроки передавать информацию сотрудникам ОВД.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в отсутствии на сегодняшний день точных методов прогнозирования атмосферной турбулентности для Московского района полетной информации, где на территории площадью более 732 272 кв. км и на интервале высот до 16 150 м производится наибольшее число полетов. Повышение качества прогнозов турбулентности может быть достигнуто только при глубоком изучении динамики явлений и всестороннем учете особенностей атмосферных процессов. Повышение точности прогнозов способствует повышению безопасности полетов, снижению рисков и финансовых затрат на производство полетов.

Целью данной работы является исследование методов прогноза атмосферной турбулентности применительно к Московскому району полетной информации.

Задачами работы являются:

- создание архива случаев атмосферной турбулентности за период 2018-2021 гг. (всего 15 093 случая);
- проведение анализа повторяемости случаев атмосферной турбулентности по различным критериям:
 - интенсивности, сезонной изменчивости, распределение по эшелонам;
 - анализ типовых синоптических ситуаций при возникновении турбулентности;
- апробации методов прогноза атмосферной турбулентности и выбор оптимального метода с учетом комплексного подхода по Московскому РПИ.

1. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентность является нормальным регулярным состоянием атмосферы. Причиной атмосферной турбулентности служат градиенты температуры, скорости и направления ветра между воздушными массами или внутри одной, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Данные градиенты возникают по следующим причинам:

- шероховатость поверхности земли по причине которой с прохождением, ветер принимает большие вертикальные градиенты;
- орография, вследствие которой воздушные потоки деформируются;
- температурные градиенты, возникающие от неравномерного прогрева земли;
- облакообразование, при котором возникают физические процессы, которые меняют характер полей ветра и температуры;
- инверсии с последующим образованием горных волн, которые способны терять устойчивость.

Вихри, в силу своих размеров, вовлекают борты в свой поток, изменяя высоту полета, угол атаки и, следовательно, нарушая управляемость ВС. А вихри малых размеров компенсируются наличием разных знаков [6].

По причине того, что турбулентность приводит к дисбалансу сил и движение ВС становится неконтролируемым, происходит следующее:

- изменение высоты, угла атаки;
- временная потеря управляемости и контролируемости самолета;
- временное прекращение, износ и поломка отдельных приборов и частей ВС.

Турбулентность имеет неодинаковое высотное распределение по всей атмосфере. Однако, согласно статистике выделяется, что в слое до 1000 м (где земная поверхность неоднородна) повторяемость случаев 25 %, до 6000 м (влияние подстилающей поверхности в разы уменьшается) – 10 %, а от 6000 м до 11000 м (не наблюдаются контрасты скорости ветра, связанные со струйными течениями) повторяемость 15%.

Также исследователи упоминают термин частоты встречаемости болтанки, который определяет расстояние, необходимое борту ВС для «встречи» с одним случаем болтанки. Так для тропосферы установлены расстояния для встречи с умеренной или сильной болтанкой около 9000 км, для очень сильной болтанки около 23000 км.

Так же на основе полученных и исследованных данных бортовых перегрузок установлены размеры турбулентных зон. Н.З. Пинус и И.Г. Пчелко [7], задали параметры 100*100*1 км для 80% турбулентных зон, а также выявили тенденцию уменьшения площади зон с увеличением высоты подъема ВС.

По В.Н. Барахтину, время существования турбулентных зон: 0,5-50 часов, среднее время: 4-6 часов.

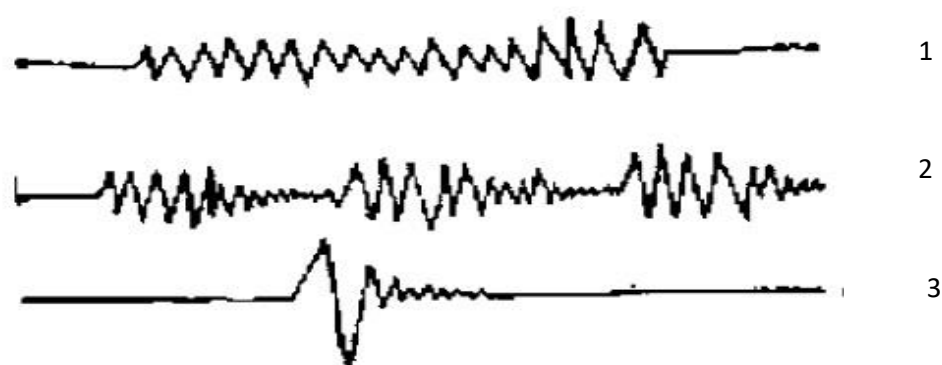


Рисунок 1.1 - Запись акселерографа самолета в зоне турбулентности:

1 – непрерывная зона; 2 – прерывистая зона; 3 – отдельные тяги (броски)
самолета

Зоны турбулентности также классифицируются по их типу, которых выделяют основные три: сплошные турбулентные зоны, прерывистые зоны и отдельные броски самолетов [8].

1.1. Болтанка самолета, ее интенсивность и перегрузка самолета

Наиболее опасно наличие атмосферной турбулентности на этапах взлета и посадки воздушных судов, здесь возможны неожиданные броски ВС по вертикальной плоскости, что в свою очередь приводит к изменению скорости полета, изменению маршрута, принятию критических значений углов атаки, что делает невозможным управление самолета или вертолета.

Интенсивность болтанки, при попадании ВС в зону атмосферной турбулентности, можно описать, определив перегрузку (формула 1.1):

$$n = \frac{Y}{Y_0}, \quad (1.1)$$

где: Y - подъемная сила в данный момент времени
 Y_0 - подъемная сила горизонтального полета

Для удобства расчетов примем, что подъемная сила равна массе самолета ($Y_0 = G$), и, учитывая отклонение от среднего ($Y = Y_0 + \Delta Y$), получим формулу:

$$n = \frac{Y}{G} = \frac{Y_0 + \Delta Y}{G} = \frac{Y_0}{G} + \frac{\Delta Y}{G} = 1 + \frac{\Delta Y}{G} \quad (1.2)$$

Т.к. значение перегрузки равно единице, решено рассчитывать ее приращение:

$$\Delta n = n - 1 \quad (1.3)$$

Приращение перегрузки самолета можно записать формулой 1.4, учитывая, что ускорение самолета в турбулентной атмосфере – j :

$$\Delta n = \frac{m_j}{m_g} = \frac{j}{g} \quad (1.4)$$

Отсюда получаем, что приращение перегрузки является безразмерной величиной.

Если принять, что самолет летит с горизонтальной скоростью V , а вертикальный порыв U_y получим формулу подъемной силы (1.5.)



Рисунок 1.2 - Влияние вертикального порыва ветра на полет самолета

$$Y = c_y S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1.5)$$

где: ρ - плотность воздуха
 V - скорость полета
 S - площадь крыла
 c_y - коэффициент подъемной силы

и после воздействия порыва:

$$Y + \Delta Y = (c_y + \Delta c_y) S \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.6)$$

Из формулы 1.5 видно, что изменению в выражении подлежит только коэффициент подъемной силы, а зная, что $V \gg U_y$, получаем:

$$\Delta c_y = \frac{\partial c_y}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \quad (1.7)$$

где: $\frac{\partial c_y}{\partial \alpha}$ - наклон (скорость) изменения коэффициента подъемной силы
 $\Delta \alpha$ - изменение угла атаки

Или можно упростить через тангенс:

$$\operatorname{tg}(\Delta \alpha) = \frac{U_y}{V} \approx \Delta \alpha \quad (1.8)$$

Теперь, если из выражения (1.6) вычесть выражение (1.5) и подставить все значения, то имеем следующую формулу:

$$\Delta Y = \frac{\partial c_y}{\partial \alpha} \frac{U_y}{V} S \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.9)$$

Для получения параметров приращения перегрузки необходимо разделить уравнение на G и получить:

$$\Delta n = \frac{Y}{G} = \frac{\partial c_y}{\partial \alpha} S \rho \frac{V U_y}{2G} \quad (1.10)$$

или

$$\Delta n = \frac{\partial c_y}{\partial \alpha} U_y V \frac{\rho}{2G} \quad (1.11)$$

Так становится очевидным, что перегрузка ВС зависит от типа борта воздушного судна, высоты полета и скоростей горизонтальной и

вертикальной. Следовательно, для разных бортов ВС значения болтанки и ее интенсивности будут существенно изменяться даже при встрече с одним и тем же случаем [9].

Установлено, что интенсивность болтанки характеризуется определенными вертикальными порывами и значениями перегрузки воздушного судна (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристика интенсивности болтанки по значению перегрузки и вертикальным порывам

Вертикальные порывы	Перегрузка ВС	Интенсивность болтанки
до 10 м/с	$ \Delta n \leq 0,5$	слабая
10-15 м/с.	$0,5 \leq \Delta n \leq 1,0$	умеренная
более 15 м/с	$ \Delta n > 1,0$.	сильная

При заходе воздушного судна на посадку, за счет конструкции самолета (закрылки, предкрылки крыла) выделяются следующие значения перегрузки: до $\pm 0,3$ слабая, от $0,3$ до $\pm 0,4$ – умеренная и выше $\pm 0,4$ сильная.

При слабой интенсивности отмечаются легкие толчки самолета, слабое раскачивание на крыльях самолета и незначительное изменение высоты полета. Условия полета сохраняются.

При умеренной интенсивности регистрируются значительные отдельные вертикальные броски самолета с большими кренами. Условия полета нарушается, затруднение руления по высоте и курсу.

Сильная интенсивность выражается очень сильными бросками самолета, с большими перегрузками. Полет переведен на ручной, управление и контроль ВС затруднены, иногда и временно невозможны[10].

1.2. Типы турбулентности

Различают орографическую (механическую) турбулентность – вклад орографии, тепловую (конвективную) турбулентность - вклад неравномерного нагрева различных участков земной поверхности и динамическую турбулентность – вклад деформации потока воздуха препятствиями.

1.2.1. Термическая турбулентность

Термическая турбулентность, чаще наблюдается в антициклонах, малоградиентных полях, при хорошо выраженном суточном ходе, а также в заполняющихся депрессиях.

Интенсивность термической турбулентности можно определить, используя зависимость температур между кривыми состояния и стратификации (таблица 1.2).

Таблица 1.2 Определение интенсивности турбулентности

Максимальная разность температур между кривыми состояния и стратификации	Интенсивность турбулентности
0-3	Слабая
4-6	Умеренная
*7	Сильная

1.2.2. Механическая турбулентность

Значительный вклад в образование механической турбулентности вносит характер подстилающей поверхности и скорость ветра у поверхности земли. Чем больше скорость ветра, тем сильнее турбулентность, чем больше шероховатость, тем также интенсивнее турбулентность. Также, чем менее устойчива стратификация, тем больше интенсивность турбулентности.

1.2.3. Орографическая турбулентность

Орографическая турбулентность образуется под влиянием неровностей подстилающей поверхности, что способствует изменению (деформации) воздушного потока. Чем больше неровность (холмы, горы и т.д.), тем интенсивнее может развиваться турбулентность.

2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

2.1 Турбулентность в струйном течении

Болтанка самолета в верхней тропосфере, особенно умеренная или сильная, обычно вызвана формированием либо кучево-дождевых облаков (которые предупреждают пилотов о попадании борта воздушного судна в зону интенсивной турбулентности), либо струйных течений, что чаще происходит при ясном небе.

В зонах, где градиенты ветра велики (например, периферии струйных течений) как правило наблюдаются очаги очень интенсивной турбулентности.

Последовательные исследования показали пространственно-временную изменчивость зон атмосферной турбулентности в районе струйных течений. Так полет в струйном течении в одних и тех же условиях, а именно в том же секторе и том же эшелоне через короткий промежуток времени для разных бортов может сопровождаться как интенсивной болтанкой, так и спокойным режимом полета.

Относительно оси струйного течения, болтанка может возникать на разных его участках. Так, на циклонической стороне, болтанка возникает ниже оси струйного течения, а на антициклонической стороне - выше. Это происходит из-за разницы вертикальных и горизонтальных градиентов ветра. Причем на холодной (циклонической) стороне струйного течения градиенты ветра в 1,5 раза больше, чем на теплой (антициклонической) стороне и повторяемость болтанки там выше.

Чаще возникновение болтанки обусловлено горизонтальными градиентами ветра.

2.2 Синоптический метод прогноза атмосферной турбулентности

Синоптический метод прогноза атмосферной турбулентности, заключающийся в совокупном анализе приземных карт погоды и карт барической топографии.

Анализ приземных карт дает представление о расположении и перемещении фронтов, их перемещении и состоянии метеорологических параметров у земной поверхности, мощности барических образований, их смещении. Высотные карты позволяют проанализировать высотное барическое поле, его изменение, струйные течения, их мощность и толщину.

Производя оценку синоптической ситуации в комплексе со всеми остальными предикторами, в том числе и статистическими, необходимо не исключать и особенности физических процессов в атмосфере.

На рисунке 2.1 представлены типовые синоптические ситуации, при которых возможно образование болтанки.

Данные схемы также применимы к различным высотам, т.е. они не меняют свою структуру и могут быть использованы для разных изобарических поверхностей.

1-й тип: высотная ложбина, в которой образовался самостоятельный циклон. Максимальная зона турбулентности (выделенная область) находится в районе сильного схождения/расхождения изобар (рисунок 2.4а). При этом в области схождения изобар преобладает умеренная болтанка, а в области расхождения изобар - сильная болтанка. Скорость ветра может достигать значений 100-150 км/ч.

2-й тип: высотный циклон (рисунок 2.4б). В этом типе барического поля турбулентность возникает в тыловой части циклона, скорость ветра составляет 100-120 м/ч, и при схождении изобар болтанка является умеренной. В данном типе барического поля присутствует еще одна ярко выраженная зона турбулентности, которая расположена во фронтальной зоне, а точнее в теплом секторе циклона и на расстоянии 100-200 км перед теплым и за холодным фронтами. Болтанка возможна до сильной.

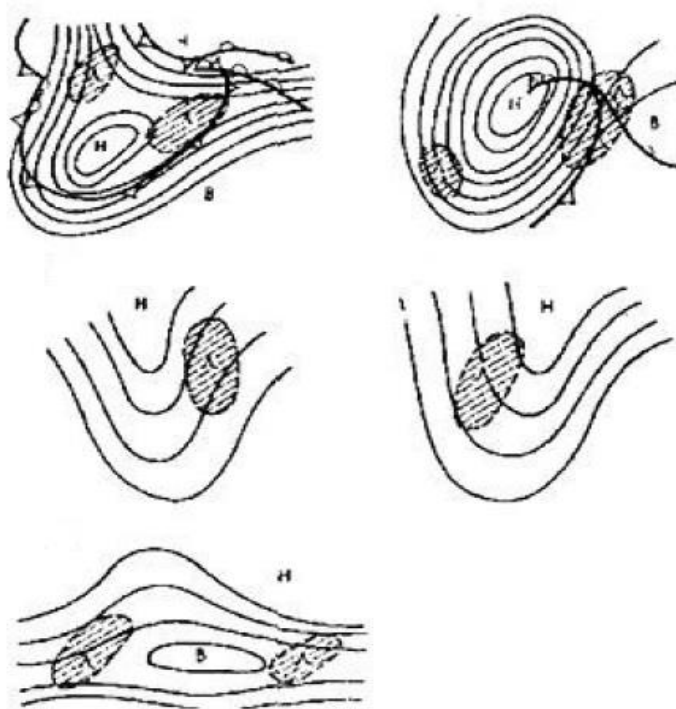


Рисунок 2.1 - Типовые синоптические ситуации, при которых возможно образование болтанки: а-высотная ложбина, б-высотный циклон, в-передняя часть ложбины, г-тыловая часть ложбины, д-высотный гребень

3-й тип: ложбина. При третьем типе болтанка наблюдается в передней части ложбины, в области расхождения изобар (рис. 2.4в). Интенсивность возможна умеренная. Скорость ветра чаще всего не более не превышает 100 км/ч.

4-й тип: ложбина. При четвертом типе барическое поле представляет собой тыловую часть ложбины, область схождения изобар (рис. 2.4г). Скорость ветра составляет 80-100 км/ч. Болтанка возможна до сильной.

5-й тип: высотный гребень (рис. 2.4д). В этом типе присутствует две области турбулентности. Первая располагается перед высотным гребнем, вторая за ним. Скорость ветра достигает небольших значений: 40-60 км/ч. Интенсивность турбулентности в этих зонах не достигает сильных значений, за исключением случаев при более высокой скорости ветра [5].

Существуют также дополнительные признаки зон турбулентности, среди которых можно выделить:

1. Холодные фронты 1-го и 2-го рода. На холодных фронтах болтанка происходит чаще, при этом горизонтальный градиент температуры во фронтальной зоне меньше $2^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, а горизонтальном градиенте скорости ветра менее $20\text{ км/ч}/100\text{ км}$.
2. Теплый фронт или фронт окклюзии (при наличии струйных течений). Горизонтальные градиенты скорости ветра более $20\text{ км/ч}/100\text{ км}$, температуры - более $2^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$.
3. Высокотропосферные или стратосферные струйные течения. При скорости ветра более 25 м/с , вертикальные градиенты скорости ветра более $10\text{ м/с}/1\text{ км}$, горизонтальные градиенты - более $5\text{ м/с}/100\text{ км}$ и изменения направления ветра более $15\text{ градусов}/1\text{ км}$.
4. Периферии циклона, а также ложбины и гребня. Особенно часто турбулентность возникает на перифериях глубоких ложбин. Если анализировать различные периферии циклонов, то можно заметить, что на западных и юго-западных перифериях болтанка возникает чаще.
5. Облачность. При наличии облаков, болтанка возникает чаще.
6. Турбулентность, как уже было сказано выше, чаще возникает при адвекции холода.
7. Увеличение скорости ветра в течение определенного промежутка времени. Например, при увеличении ветра на $\geq 10\text{ м/с}/6\text{ час}$ болтанка

наблюдается приблизительно в 70 % случаев, а при увеличении ветра на ≥ 20 м/с/6 час - 75% случаев [5].

2.3 Графический метод прогноза атмосферной турбулентности

Принцип метода основан на построении вертикальных профилей скорости, направления ветра и температуры воздуха, угол наклона каждого участка которых сравнивается с критическими значениями вертикальных градиентов, полученных эмпирическим путем. (рис. 2.2)

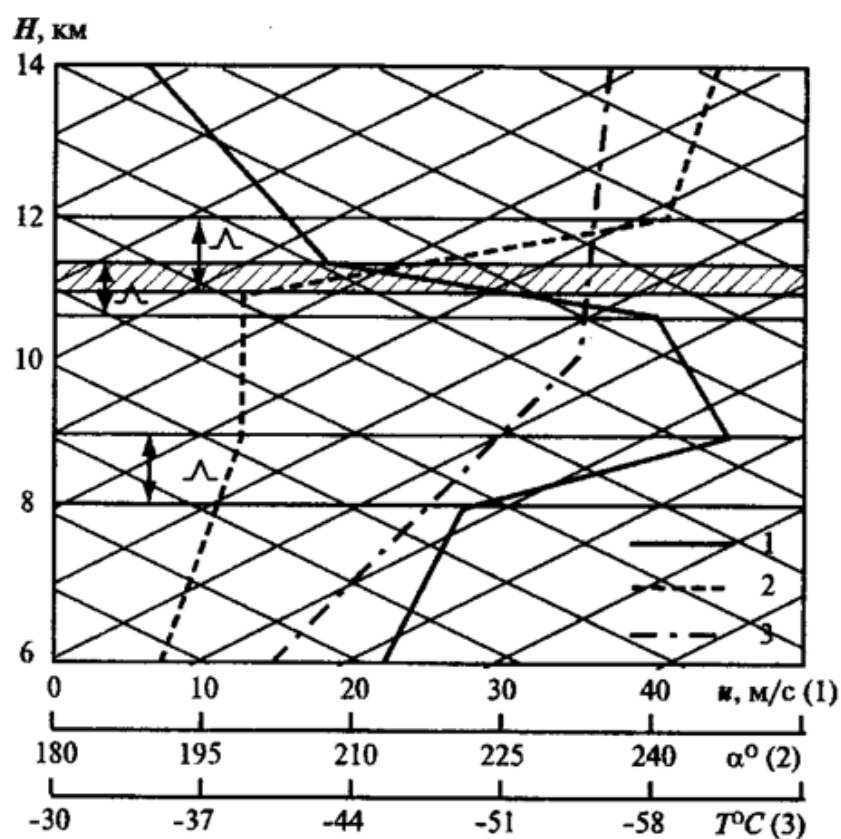


Рисунок 2.2 – Прогноз болтанки графическим методом

То есть на 1 км высоты для скорости ветра определен параметр в 10 м/с, для направления ветра – 5 градусов, а для температуры - 7 °C.

Если по какому-либо параметру обнаруживается неустойчивость, то предполагается, что в этой зоне возможно возникновение болтанки. Чем больше метеорологических параметров показывают неустойчивость, тем вероятность болтанки выше [6].

3. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО МОСКОВСКОМУ РПИ

В оперативной работе синоптик каждый срок сталкивается с необходимостью прогнозирования наличия или отсутствия атмосферной турбулентности, с указанием ее интенсивности и предполагаемой высоты. На данный момент на сети АМЦ/АМСГ отсутствуют достаточно точные методы и модели прогнозирования, что вынуждает опираться синоптика на собственный опыт, который также не может отличаться высокой точностью. Вследствие указанной проблемы, в данной работе будет исследован подбор оптимального, комплексного метода прогнозирования атмосферной турбулентности для Московского района полетной информации (РПИ).

3.1 Прогнозы GAMET

Синоптики АМЦ Москва предоставляют метеорологическую информацию в формате GAMET по МДП Тверь и Калуга в банк данных и непосредственно потребителям каждые 6 часов. Данный прогноз погоды выпускается для полетов воздушных судов ниже эшелона полета FL100.

Метеорологическая часть прогноза GAMET состоит из двух разделов. Прогностические данные атмосферной турбулентности указываются в первом разделе, содержащем информацию о явлениях погоды, представляющих опасность для полета в слое от земли до FL100. В данном

разделе указывается интенсивность турбулентности (умеренная или сильная), высота, выраженная в эшелоне, для уточнения также можно указывать сектор(а) и время, на которые распространяется прогноз (за исключением турбулентности, вызванной вследствие конвективной облачности).

3.2 Прогнозы SIGMET

Другим прогнозом, который включает информацию об атмосферной турбулентности, выпускаемым синоптиками, является прогноз SIGMET. Он содержит в себе информацию о фактическом или прогнозируемом явлении по маршруту полета. Именно сообщения SIGMET имеют наивысший приоритет среди остальных ОРМЕТ данных, передаваемых потребителям, которые передаются пилотам через органы ОВД.

В прогнозе SIGMET синоптик указывает только сильную (SEV) турбулентность, как наблюдаемую, так и ожидаемую на высотах от земли до верхних эшелонах полета (до FL650) и в пределах границ РПИ. Зона ответственности синоптика АМЦ Москва представлена на рисунке 3.1.

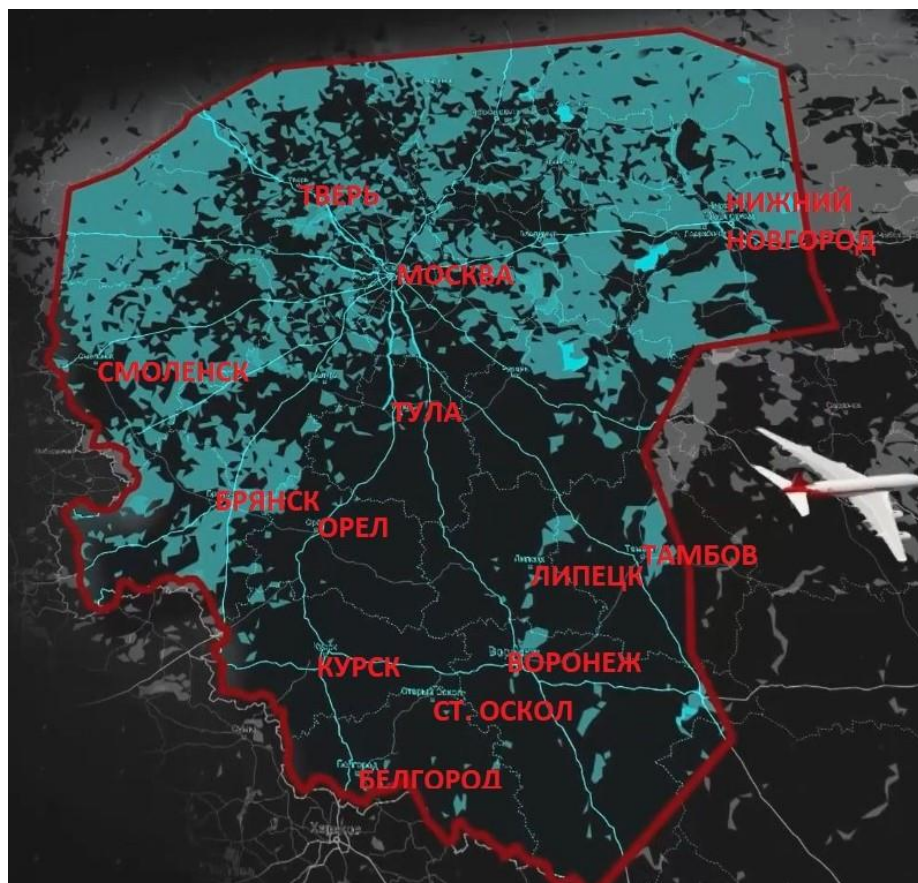


Рисунок 3.1 - Зона Московского РПИ, обслуживаемая синоптиком
АМЦ Москва

Для составления вышеперечисленных прогнозов (GAMET и SIGMET) используются данные карт барической топографии, данные радиозондирования, авиационных карт погоды, SIGMET сообщений смежных районов полетной информации, а также сообщения экипажей воздушных судов, отмечающих те или иные неблагоприятные погодные условия по маршруту полета, в зонах взлета и посадки, т.е. так называемой бортовой погоды.

3.3 Исследование методов прогнозирования атмосферной турбулентности

Целью данной работы является исследование методов прогноза атмосферной турбулентности применительно к Московскому району полетной информации.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- создать архив случаев атмосферной турбулентности за период 2018-2021 гг. (всего 15 093 случая);
- провести анализ повторяемости случаев атмосферной турбулентности по различным критериям, таким, как интенсивность, сезонная изменчивость, распределение по эшелонам;
- проанализировать типовые синоптические ситуаций, при которых возникает турбулентность;
- апробировать методы прогноза атмосферной турбулентности и выбрать оптимальные методы с учетом особенностей территории исследования.

Для выполнения работы были проанализированы данные журнала бортовой погоды за период с 2018 по 2021 гг. по Московскому РПИ (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Фрагмент архива бортовой погоды за 2018-2021 гг.

Дата	Интенсивность	Явление	Время	Координаты	Высота/эшелон
10.10.2018	MOD	TURB	0901Z	N5536E04347	FL350
10.10.2018	MOD	TURB	0913Z	N5614E04347	0700M
10.10.2018	MOD	TURB	1038Z	N5614E04347	0700M
10.10.2018	MOD	TURB	1420Z	N4932E04028	FL330/350
10.10.2018	MOD	TURB	1436Z	N5047E04036	FL360
13.10.2018	MOD	TURB	1613Z	N5602E03938	FL260/300
14.10.2018	MOD	TURB	0431Z	N5600E04502	FL320

15.10.2018	MOD	TURB	1106Z	N5400E04000	FL430
15.10.2018	MOD	TURB	1801Z	N5813E04128	FL350
20.10.2018	MOD	TURB	0707Z	N5345E03830	FL350
21.10.2018	MOD	TURB	2014Z	N5513E03722	FL190/230
22.10.2018	MOD	TURB	0405Z	N5421E03814	FL250
24.10.2018	MOD	TURB	0713Z	N5558E03725	FL080
25.10.2018	SEV	TURB	0510Z	N5209E03816	FL220
25.10.2018	MOD	TURB	0715Z	N5342E04101	FL270
27.10.2018	MOD	TURB	1129Z	N5550E03310	FL360
27.10.2018	MOD	TURB	2043Z	N5533E04001	FL250/340
27.10.2018	MOD	TURB	2248Z	N5536E03753	FL160/190
28.10.2018	MOD	TURB	0424Z	N5414E03854	FL360
28.10.2018	MOD	TURB	0613Z	N5559E03648	FL220/250
28.10.2018	MOD	TURB	0614Z	N5558E03725	FL050/070
28.10.2018	MOD	TURB	1243Z	N5451E04636	FL360
28.10.2018	MOD	TURB	1554Z	N5534E04455	FL350
28.10.2018	SEV	TURB	1727Z	N5556E03622	FL160/180
28.10.2018	MOD	TURB	1729Z	N5552E04146	FL370
29.10.2018	MOD	TURB	0558Z	N5721E03908	FL360/340

После анализа случаев с атмосферной турбулентностью был сформирован архив, содержащий 15 093 зафиксированных случаев за период с 2018 по 2021 гг.

Как правило, чаще всего данные о турбулентности сообщаются экипажами воздушных судов на этапе посадки, взлета или снижения и набора высоты.

Поэтому следующим этапом исследований является получение распределения зафиксированных случаев атмосферной турбулентности по эшелонам (рисунок 3.2).

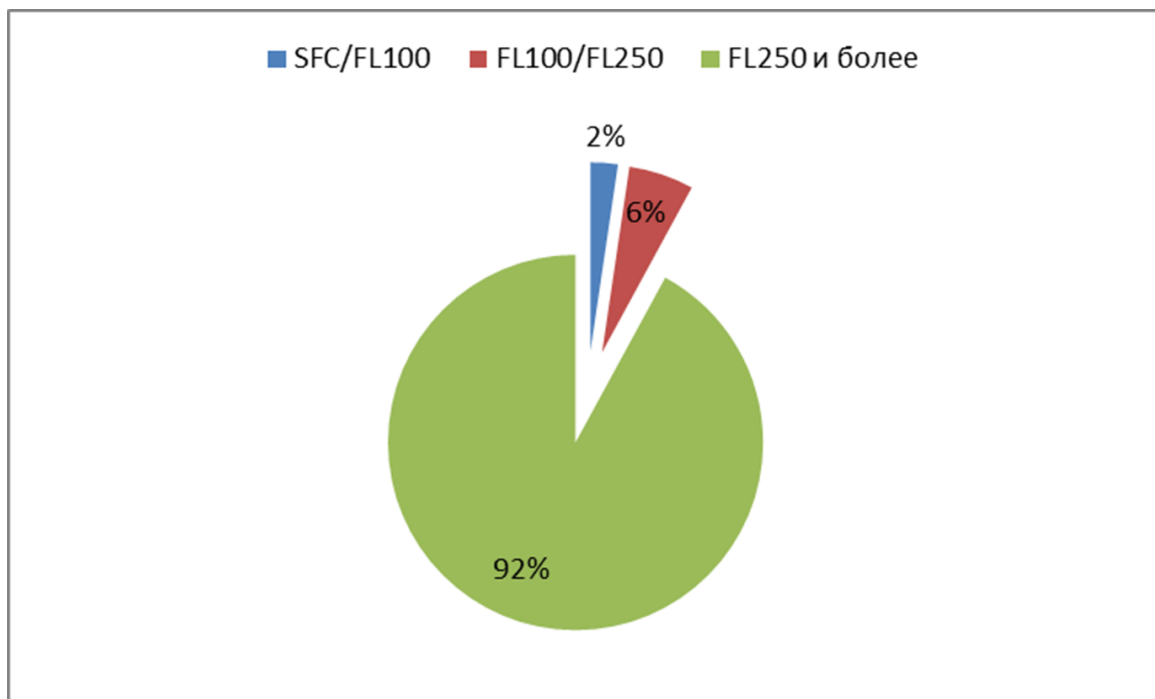


Рисунок 3.2 - Распределение зафиксированных случаев атмосферной турбулентности по эшелонам по Московскому РПИ за период 2018-2021 гг.

Так, выявлено, что в 92 % случаев турбулентность наблюдалась на эшелоне FL250 и более (7500 м и выше).

В 6 % случаев в слое между FL100 и FL250 (3000 м и 7500 м).

И только в 2 % зафиксированных случаев борты отмечали турбулентность в слое от земли до FL100 (3000 м).

Однако для дальнейшего исследования был выбран именно архив данных от земли до 3000 м, который является самым опасным для воздушных судов. Этапы взлета и посадки происходят в данном слое атмосферы, и в нем же происходило наибольшее количество авиакатастроф.

Выделив архив данных до эшелона FL100, в таблицу 3.1 также был добавлен анализ синоптических ситуаций (таблица 3.2), при которых возникала турбулентность.

Таблица 3.2 - Фрагмент архива случаев атмосферной турбулентности до эшелона FL100

Дата	Интенсивность	Явление	Время	Координаты	Эшелон	Синоптическая ситуация
31.03.2021	MOD	TURB	1843	N5614E04342	FL000/020	ложбина
02.04.2021	MOD	TURB	0418	N5514E03739	FL060/120	тыловая часть циклона
02.04.2021	SEV	TURB	0455	N5513E03812	FL040	тыловая часть циклона
02.04.2021	MOD	TURB	0625	N5521E03742	FL070	тыловая часть циклона
03.04.2021	MOD	TURB	1223	N5454E03754	FL080	размытое поле давления
04.04.2021	MOD	TURB	0934	N5535E03731	FL070/090	размытое поле давления
05.04.2021	MOD	TURB	0814	N5457E03823	FL050	передняя часть циклона
05.04.2021	MOD	TURB	1226	N5538E03714	FL070	передняя часть циклона
06.04.2021	MOD	TURB	0838	N5534E03753	FL040	ложбина
06.04.2021	MOD	TURB	1255	N5527E03739	FL070	ложбина
07.04.2021	MOD	TURB	1329	N5520E03723	FL050	ложбина
07.04.2021	MOD	TURB	1417	N5538E03754	FL100	ложбина

Для этого были использованы приземные карты погоды с сайта Гидрометцентра России за сроки, близкие к времени, когда по данным экипажей воздушных судов наблюдалась турбулентность (рисунок 3.3-3.6).

Так 31.01.2021 (рисунок 3.3) зона Московского РПИ находилась под влиянием ложбины циклона, где возникновение атмосферной турбулентности встречается наиболее часто.

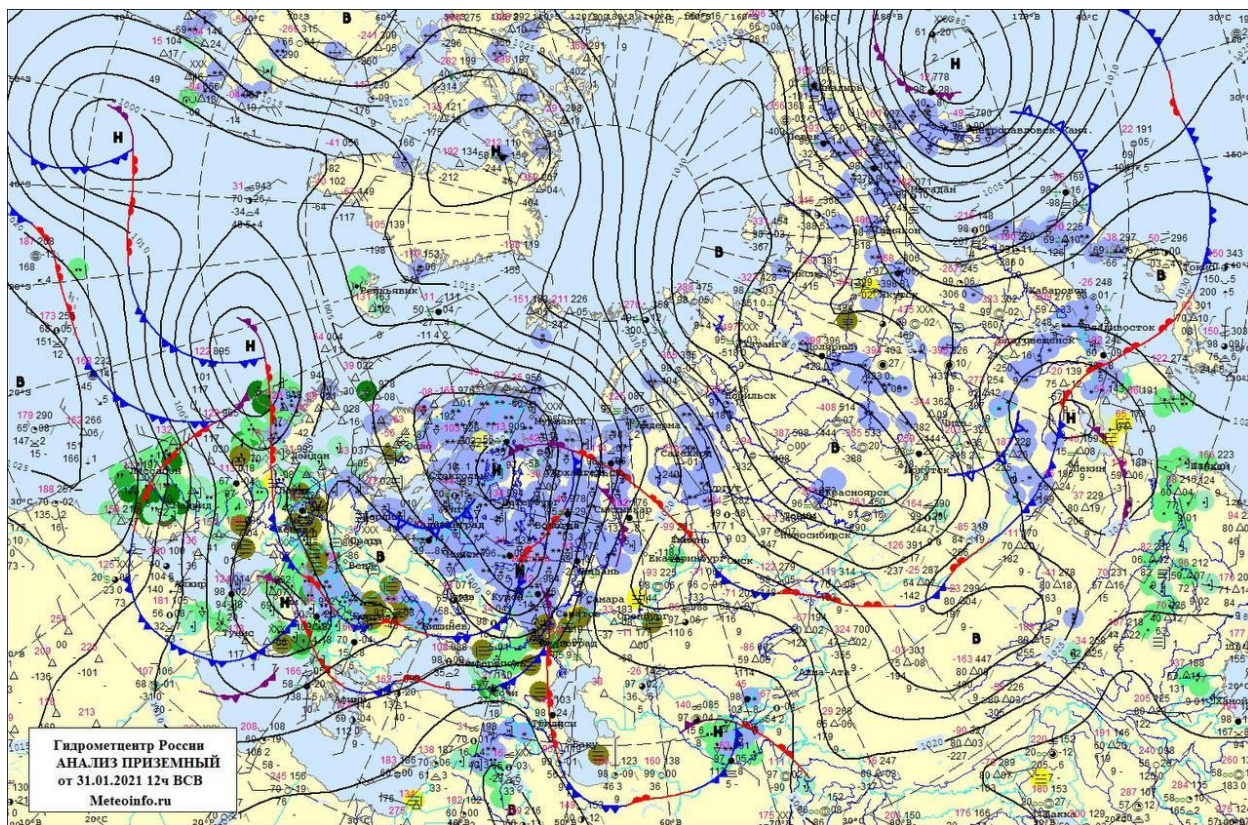


Рисунок 3.3 - Приземная карта за 31.01.2021 12.00 UTC

На рисунке 3.4 (приземная карта за 09.04.2021) влияние на Московскую зону оказывает седловина, в которой турбулентность встречается значительно реже и только на высоких эшелонах.

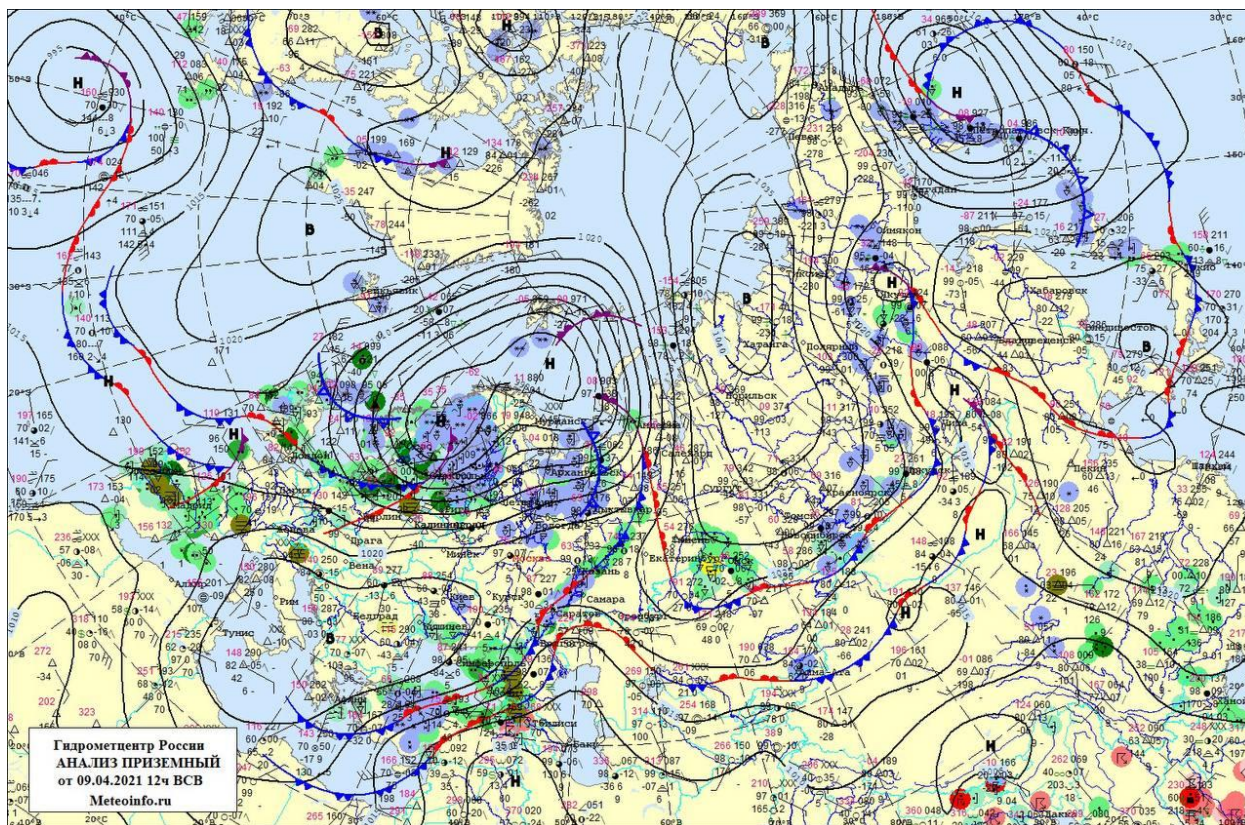


Рисунок 3.4 - Приземная карта за 09.04.2021 12.00 UTC

На рисунке 3.5 отображена приземная карта за 26.07.2021, где на зону Московского РПИ влияет антициклон.

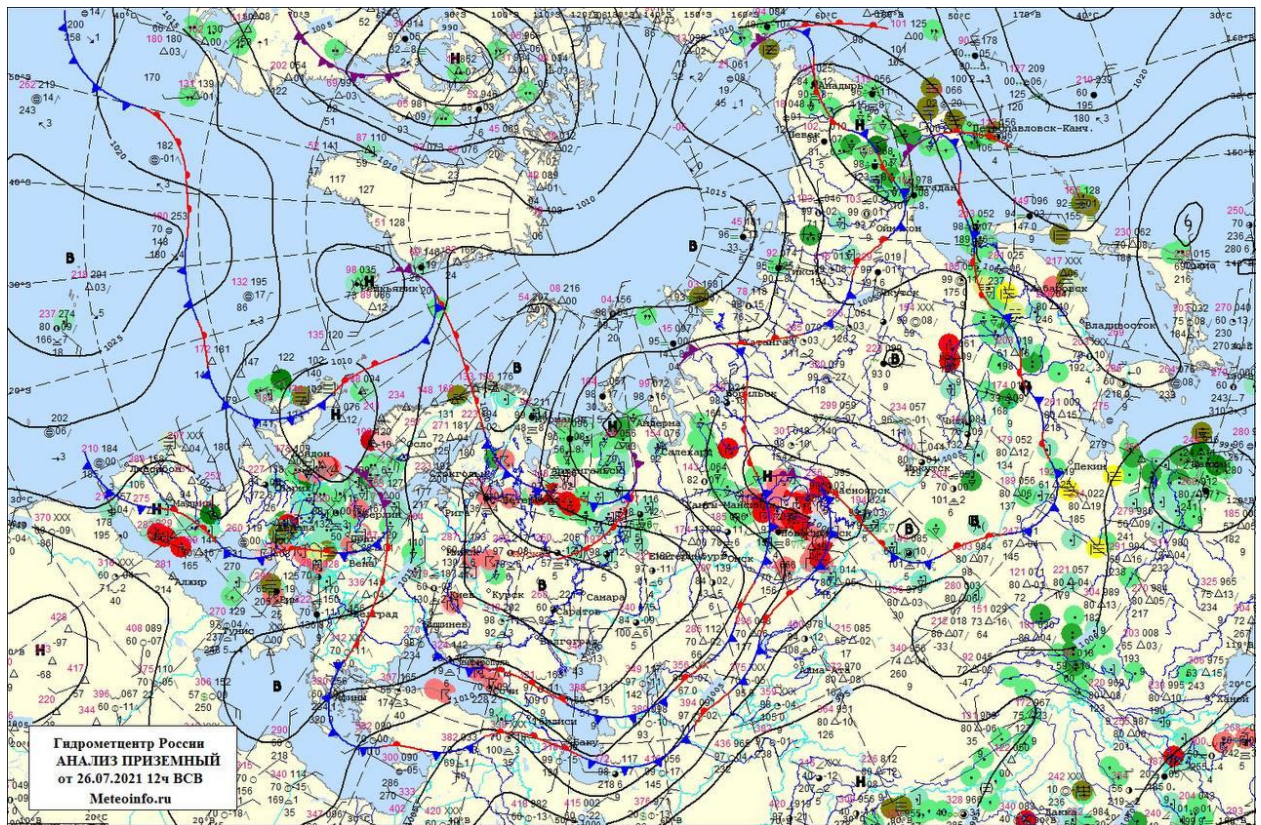


Рисунок 3.5 - Приземная карта за 26.07.2021 12.00 UTC

05.09.2021 (рисунок 3.6) Московский РПИ находился в тыловой части циклона, западнее которого располагается антициклон. За счет сгущения изобар, возможно возникновение атмосферной турбулентности, связанной с

параметрами ветра (направление, скорость).

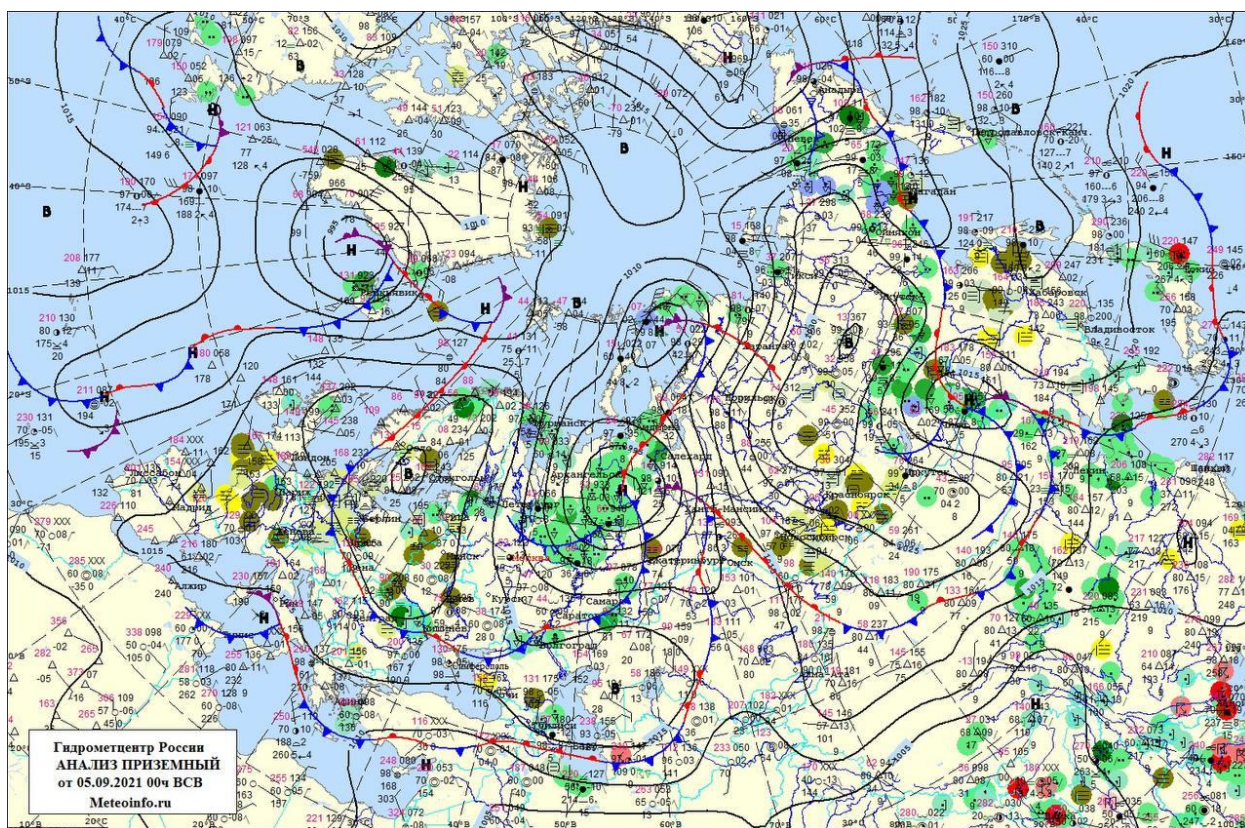


Рисунок 3.6 - Приземная карта за 05.09.2021 12.00 UTC

Данные об интенсивности, как и о самих случаях турбулентности сообщают экипажи воздушных судов. Достаточно часто данные о слабой турбулентности не сообщаются и не фиксируются экипажем, т.к. влияние на воздушное судно слабой интенсивности практически сводится к нулю.

Проведя анализ случаев турбулентности, выяснилось, что из всех зафиксированных случаев турбулентности до эшелона FL100 только 6% (466 случаев) была зарегистрирована сильная (SEV) турбулентность (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 - Повторяемость атмосферной турбулентности по интенсивности по Московскому РПИ за период 2018-2021 гг.

Далее был проведен анализ годового хода турбулентности за 2019 г. (таблица 3.3, рисунок 3.8), 2020 г. (таблица 3.4, рисунок 3.9) и 2021 г. (таблица 3.5, рисунок 3.10).

Таблица 3.3 - Количество зафиксированных случаев атмосферной турбулентности по Московскому РПИ за 2019 г.

2019	Количество случаев	SEV	MOD
Январь	34	2	32
Февраль	51	8	43
Март	51	3	48
Апрель	28	0	28
Май	133	6	127
Июнь	47	1	46

Июль	258	12	246
Август	1118	30	1088
Сентябрь	334	7	327
Октябрь	1717	74	1643
Ноябрь	777	23	754
Декабрь	550	12	538

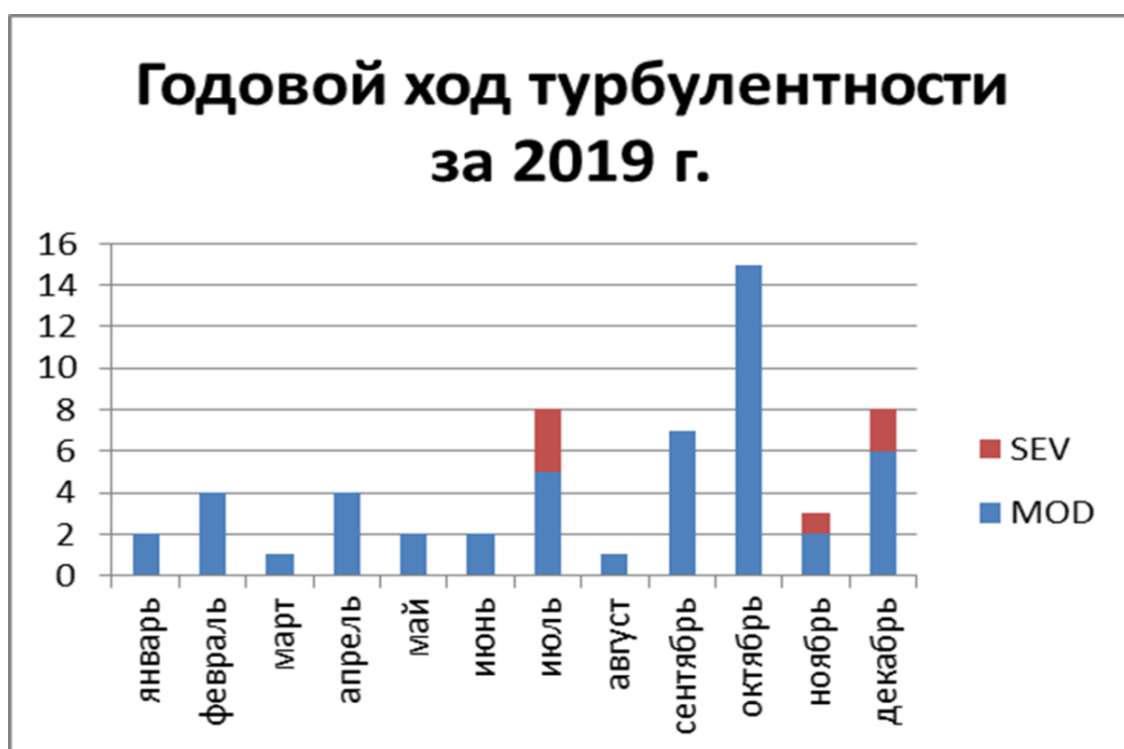


Рисунок 3.8 - Годовой ход турбулентности по Московскому РПИ
за 2019 г.

Анализируя таблицу 3.3. и рисунок 3.8, заметно, что в 2019 году, максимум случаев турбулентности наблюдался в октябре, однако наибольшее количество сильной турбулентности в июле и декабре.

Таблица 3.4 - Количество зафиксированных случаев атмосферной турбулентности по Московскому РПИ за 2020 г.

2020	Количество случаев	SEV	MOD
Январь	631	13	618
Февраль	468	12	456
Март	568	10	558
Апрель	49	2	47
Май	254	7	247
Июнь	327	5	322
Июль	320	6	314
Август	361	12	349
Сентябрь	557	18	539
Октябрь	447	7	440
Ноябрь	546	21	525
Декабрь	254	3	251



Рисунок 3.9 - Годовой ход турбулентности по Московскому РПИ
за 2020 г.

В 2020 году максимум случаев турбулентности приходится на март, наибольшее количество сильной турбулентности в этом году распределилось между апрелем и сентябрем.

Таблица 3.5 - Количество зафиксированных случаев атмосферной турбулентности по Московскому РПИ за 2021 г.

2021	Количество случаев	SEV	MOD
Январь	594	19	575
Февраль	300	7	293
Март	328	6	322
Апрель	243	6	237
Май	913	37	876
Июнь	400	14	386
Июль	248	6	242
Август	897	33	864
Сентябрь	414	7	407
Октябрь	276	3	273
Ноябрь	633	35	598
Декабрь	2	0	2



Рисунок 3.10 - Годовой ход турбулентности по Московскому РПИ за 2021 г.

2021 год можно назвать классическим или эталонным, здесь максимальное количество случаев отмечается в апреле-мае и декабре, что связано с переходными ВЛП (весенне-летним периодом) и ОЗП (осенне-зимним периодом). Наибольшее количество сильной турбулентности отмечалось также в мае и августе.

Сравнивая годовой ход трех исследуемых лет, можно предположить, что нет четкой взаимосвязи между наличием случаев атмосферной турбулентности и годового хода.

Отходя от статистического анализа, и переходя к прогнозированию атмосферной турбулентности, рассмотрим метод анализа синоптического положения.

Как уже говорилось в Главе 2, наиболее благоприятными барическими зонами для возникновения турбулентности являются: ложбина (ее передняя и тыловая части), циклон и гребень.

Анализируя полученные данные, отраженные на рисунке 3.8, можно

сделать вывод о наиболее частой встречаемости атмосферной турбулентности при определенных синоптических условиях для Московского РПИ.

Преимущественно атмосферная турбулентность отмечалась бортами в ложбинах циклонов, однако в передней и тыловой части они наблюдались значительно реже. Максимальная повторяемость сильной турбулентности приходится также на ложбину и размытое барическое поле, где из-за сильного расхождения изобар увеличивается как скорость ветра, так и его сдвиги.



Рисунок 3.11 - Количество случаев турбулентности в различных синоптических ситуациях

Следующим методом для расчета атмосферной турбулентности для Московского РПИ является графический метод, схема которого была представлена на рис. 2.2.

Для проведения расчетов был получен архив данных зондирования атмосферы по станциям, входящим в Московский РПИ (Белгород, Смоленск, Нижний Новгород, Москва, Сухиничи, Рязань, Курск, Воронеж, Калач). Данные радиозондов нанесены на сетку, построенную на основе графического метода (рисунки 3.12-3.14).

Так, на рисунке 3.12 построены вертикальные профили ветра (скорости и направления) и температуры за 00 UTC 21 января 2021 года.

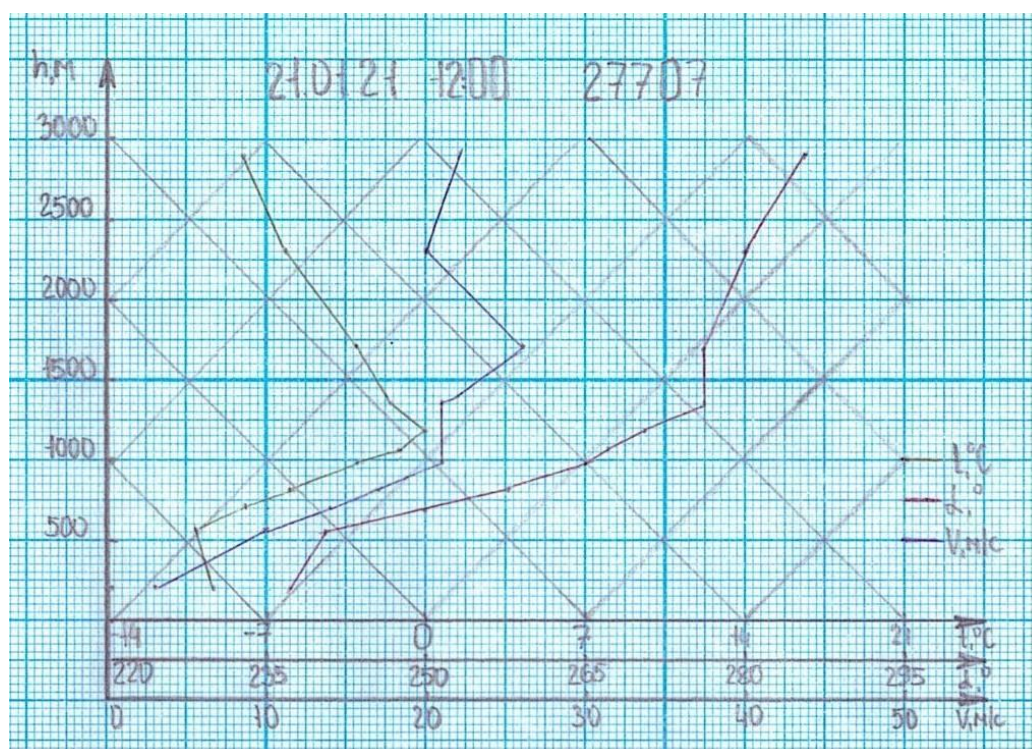


Рисунок 3.12 – Вертикальный профиль за 21.01.21 12.00 UTC

В соответствии с распределением метеопараметров по вертикали, согласно графику на рисунке 3.12 за 21.01.2021 12.00 UTC, можно сделать вывод, что атмосферная турбулентность прогнозируется по скорости и направлению ветра от 600 метров (FL020). Фактически, борт зарегистрировал наличие умеренной турбулентности на 1800 м (FL060) под влиянием ложбины циклона.

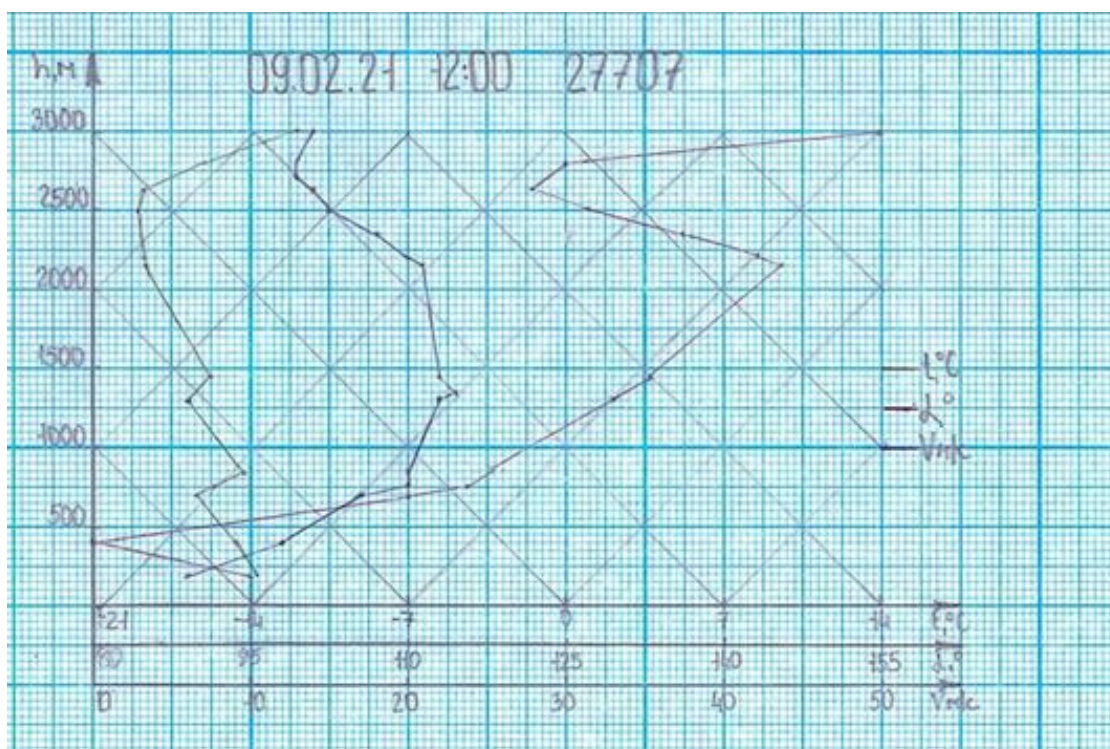


Рисунок 3.13 – Вертикальный профиль за 09.02.21 12.00 UTC

09.02.2021 г (рисунок 3.13) наблюдалась умеренная турбулентность дважды – на эшелоне 90 (2700 метров) и в слое от FL040 и выше (от 1200 м) в ложбине циклона. Из построенного графика видно, что по направлению ветра турбулентность прогнозируется от земли до 2300 метров, а выше 2300 метров прогнозируется турбулентность по скорости ветра, выше 2600 метров также ожидается термическая турбулентность.

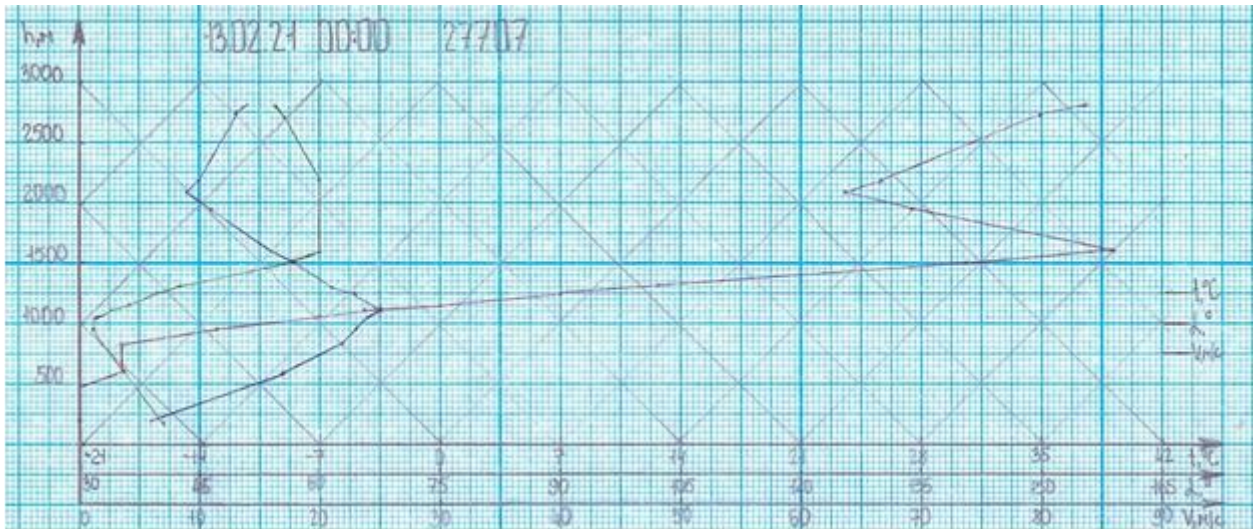


Рисунок 3.14 – Вертикальный профиль за 13.02.21 00.00 UTC.

Интересным оказывается вертикальный профиль за 13.02.2021 00.00 UTC, на котором ярко представлено участие всех параметров распределения в возникновении атмосферной турбулентности. Здесь турбулентность фактически регистрировалась на 1500 метров (FL050) в тыловой части циклона.

Из полученных данных графического метода следует, что в 97 % случаев турбулентность прогнозируется по какому-либо из критериев, и только в 3 % случаев метод оказался неточным (не прогнозировал наличие турбулентности при ее фактическом наблюдении) (рисунок 3.15).

Чаще всего атмосферная турбулентность прогнозировалась по параметрам ветра – скорости (41 %) и направлению (33 %), термическая турбулентность прогнозировалась реже (рисунок 3.16).

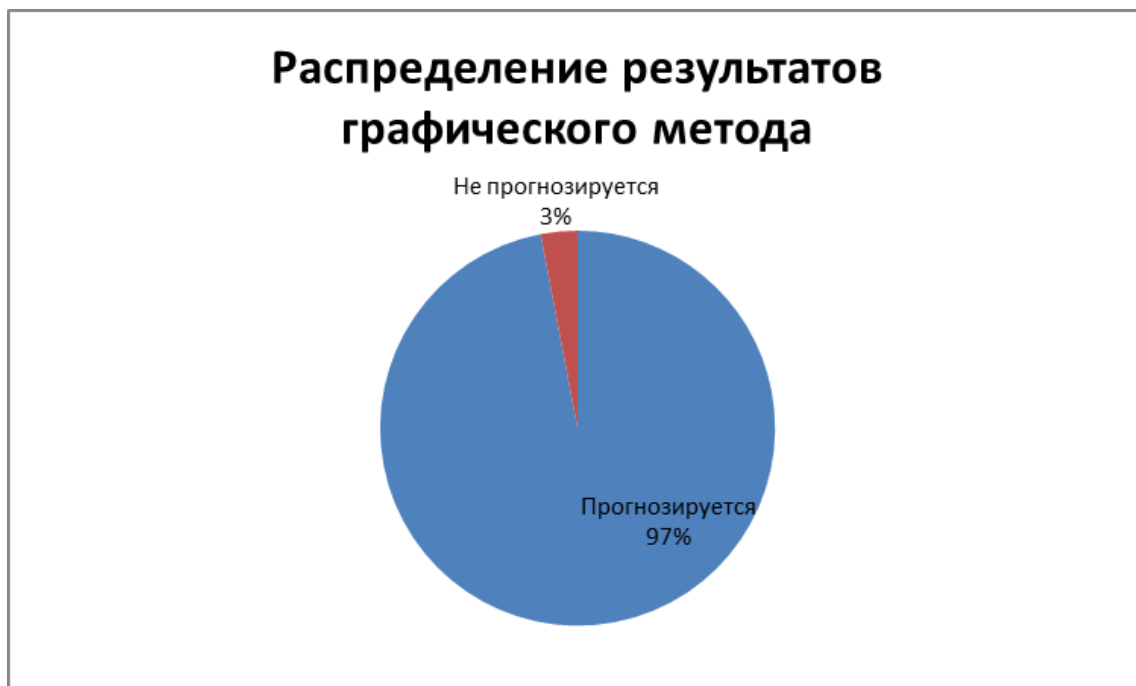


Рисунок 3.15 - Распределение результатов графического метода

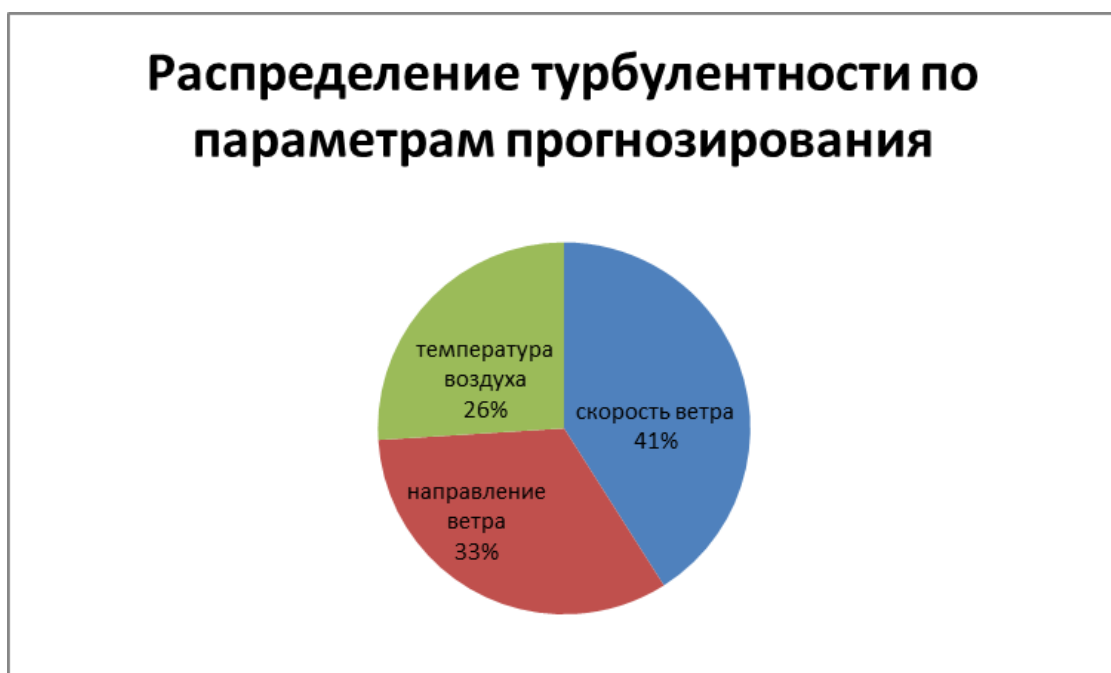


Рисунок 3.16 - Распределение турбулентности по параметрам прогнозирования (температура, скорость ветра, направление ветра)

На основе рассчитанных данных была создана итоговая таблица (таблица 3.6), в которой представлены результаты синоптического и графического методов для каждого исследуемого зафиксированного случая атмосферной турбулентности.

Таблица 3.6 - Результаты синоптического и графического методов прогноза турбулентности

Дата	Интенсивность	Явление	Время	Координаты	Эшелон	Синоптическая ситуация	Скорость ветра	Направление ветра	Температура
26.02.2021	SEV	TURB	0949	N5542E03756	FL020	ложбина			
02.03.2021	MOD	TURB	0853	N5525E03749	FL070	размытое поле давления			
02.03.2021	SEV	TURB	1028	N5538E03726	FL070	размытое поле давления			
03.03.2021	MOD	TURB	1935	N5614E04340	2100M	размытое поле давления			
04.03.2021	MOD	TURB	1823	N5513E03720	FL080/140	передняя часть циклона			
05.03.2021	MOD	TURB	1045	N5516E03722	FL060	передняя часть циклона			
05.03.2021	MOD	TURB	1047	N5523E03724	FL060	передняя часть циклона			
05.03.2021	MOD	TURB	1217	N5538E03745	FL070	передняя часть циклона			
07.03.2021	MOD	TURB	0614	N5535E03747	FL030/040	тыловая часть циклона			
07.03.2021	MOD	TURB	0717	N5532E03736	FL020/040	тыловая часть циклона			
07.03.2021	MOD	TURB	1423	N5506E03741	FL100	тыловая часть циклона			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оперативной работе синоптикам АМЦ/АМСГ необходимо прогнозировать наличие или отсутствие атмосферной турбулентности, ее интенсивность и высоту слоя. На данный момент для Московского РПИ не существует точных методов прогнозирования, вследствие чего синоптикам приходится предоставлять прогностическую информацию, основываясь на личном опыте, что также не гарантирует точность прогноза. Целью данного исследования является анализ, подбор и апробация комплексного метода прогнозирования атмосферной турбулентности для Московского РПИ.

В ходе исследования был создан архив случаев атмосферной турбулентности за период с ноября 2018 г. по 2021 г. Из всех случаев зафиксированной турбулентности в 92% наблюдалась выше 250 эшелона, в 6% от 100 до 250 эшелона и в 2% от земли до 100 эшелона. В 6% от всех случаев наблюдалась сильная турбулентность. Было выявлено, что количество случаев турбулентности не зависит от годового хода. Наиболее часто турбулентность наблюдается в ложбине и размытом барическом поле, редко в тыловой части циклона. Наиболее точными прогностическими параметрами являются скорость и направление ветра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.britannica.com/science/atmospheric-turbulence> 20.04.2022
2. Сафонова Т.В. Авиационная метеорология: учеб. пособие / Т.В. Сафонова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005 – 215 с.
3. State of flight safety in the world. International Civil Aviation Organization. 999 University Street, Montreal, Quebec, Canada. H3C 5H7. 2013. – 54p.
4. <https://www.vesti.ru/doc.html?id=2883532> 20.04.2022
5. Блохина В.И. Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие. –2004. –67р.
6. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. –СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. –339р.
7. Luke N. Storer, Paul D. Williams, Philip G. Gill. Aviation Turbulence: Dynamics, Forecasting, and Response to Climate Change. Pure and Applied Geophysics. –2018. –15p.
8. Atmospheric Turbulence Relative to Aviation, Missile, and Space Programs. NASA Conference Publication 2468. Langley Research Center. Hampton, Virginia. 1986. –255p.
9. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. Москва: Триада лтд, 2016. — 312 с.