



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

Кафедра метеорологии, экологии и природопользования

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)
по направлению подготовки 05.03.05 Прикладная гидрометеорология
(квалификация – бакалавр)

На тему: «Атмосферная турбулентность и ее влияние на полеты воздушных судов»

Исполнитель Нестерова Анна Михайловна

Руководитель к.ф. м.н., доцент, Дымов – Иванов Виктор Васильевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Цай Светлана Николаевна

« 21 » Июль 2025г.

Туапсе
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Турбулентность, ее влияние на полеты воздушных судов	5
1.1 Условия возникновения турбулентности	5
1.2 Влияние атмосферной турбулентности на полеты воздушных судов ...	13
2 Методы прогноза атмосферной турбулентности	21
2.1 Синоптические методы прогноза атмосферной турбулентности	21
2.2 Физико-статистические методы прогноза турбулентности при ясном небе.....	33
3 Анализ случаев возникновения атмосферной турбулентности в Московском регионе.....	39
3.1 Организация авиаметеорологического обеспечения Московского центра единой системы авиаметеорологического обеспечения	39
3.2 Анализ случаев атмосферной турбулентности в районе аэродромов Москвы по данным АМИС–РФ и на основе индекса BRN.....	45
Заключение	57
Список использованной литературы.....	59

Введение

Главная задача авиационной метеорологической службы - обеспечение безопасности полетов воздушных судов.

На сегодняшний день, статистика говорит о том, что наибольшее количество летных происшествий в мировой практике регистрируется на небольших высотах, при этом, аварии чаще всего происходят при взлете или посадке воздушного судна.

Наибольшей изменчивостью метеорологические условия обладают в слоях атмосферы у поверхности земли, что в немалой степени обусловлено влиянием местных условий и деятельной поверхности. Именно изменчивостью метеорологических условий в нижних слоях атмосферы обусловлен более высокий риск возникновения аварий при посадке и взлете.

К особенностям развития мезомасштабных процессов, в том числе циркуляционного характера, являются большие скорости вертикальных движений и большие вертикальные и горизонтальные градиенты ветра, обуславливающих его сдвиг. Также при этих процессах возникающая турбулентность характеризуется большой интенсивностью, что в свою очередь сказывается на безопасности полетов воздушных судов.

Турбулентность – неустойчивое состояние атмосферы, при котором образуется большое количество хаотично движущихся разномасштабных вихрей.

Атмосферная турбулентность приводит к образованию больших вертикальных градиентов скорости ветра, и обуславливает быстрый перенос в верхние слои атмосферы тепла и влаги, осуществляя обмен между различными слоями атмосферы. Стоит отметить, что явление турбулентность, входит в число особых явлений погоды, отмечаемых Гидрометцентром, для которых строится карта особых явлений погоды России.

Московский центр единой системы авиаметеорологического обеспечения осуществляет свою деятельность на территории Москвы, Московской,

Липецкой, Курской, Воронежской, Тамбовской, Калужской, Тверской, Рязанской, Белгородской, Брянской областей и включает в себя территорию площадью более 732 272 кв. км на интервале высот до 16150 м, при этом в данном районе осуществляется наибольшее количество полетных вылетов, что обуславливает повышенные требования к качеству прогнозов турбулентности.

Следовательно, тема исследования является актуальной, т.к., изучение процессов, обуславливающих возникновение турбулентности, изменение ее динамики и анализ ее особенностей, необходимы для более точного прогнозирования возникновения атмосферной турбулентности. Повышение точности прогнозов способствует не только повышению безопасности полетов, но и снижает риски и финансовые затраты на производство полетов.

Объект исследования – атмосферная турбулентность.

Предмет исследования – процессы, обуславливающие возникновение атмосферной турбулентности.

Цель работы – исследование методов прогноза атмосферной турбулентности и анализ случаев атмосферной турбулентности в зоне ответственности Московского района полетной информации.

Для реализации поставленной цели решаются следующие задачи:

- изучить процессы, обуславливающие возникновение и развитие атмосферной турбулентности;
- рассмотреть влияние турбулентности на полеты воздушных судов;
- рассмотреть методы прогноза атмосферной турбулентности;
- рассмотреть организацию авиаметеорологического обеспечения Московского центра единой системы авиаметеорологического обеспечения;
- провести анализ случаев атмосферной турбулентности в зоне ответственности Московского района полетной информации.

1 Турбулентность, ее влияние на полеты воздушных судов

1.1 Условия возникновения турбулентности

Одним из механизмов, регулирующих протекание атмосферных процессов является процесс турбулентности, благодаря которому в приземном слое атмосфере и в тропосфере менее выражены температурные различия и происходит сглаживание контрастов в значениях температуры, скорости ветра.

Для возникновения процесса турбулентности одним из основных условий является неустойчивость воздушных потоков, возникающая в результате наличия температурных различий на подстилающей поверхности и развития облаков конвективного происхождения. Для развития турбулентности благоприятным является наличие на подстилающей поверхности различных неоднородностей [8, с.208].

Также на активизацию турбулентности оказывают влияние интенсивность протекающих в атмосфере процессов, скорости перемещения воздушных масс, размеры имеющихся в атмосфере различных возмущений и другие их параметры.

Для оценки движения воздушных масс и их перемещения, в том числе момента преобразования их устойчивого движения в неустойчивое, благоприятного для образования турбулентности, применяют число Рейнольдса. Число Рейнольдса (Re) является величиной, определяющей отношение инерционных сил к силе вязкого трения, при этом, представляет собой безразмерную величину, характеризующую размер потока и описывающий характерную для него скорость с учетом коэффициента кинематической вязкости:

$$Re = uL/\nu \quad (1)$$

Где, Re - число Рейнольдса;

U - скорость потока;

L - размер потока;

ν - коэффициент кинематической вязкости.

В случае, если значение числа Рейнольдса мало, можно говорить о том, что преобладающими являются вязкие силы, благодаря которым в жидкости скорости движения в соседних точках равны, и течение характеризуется как устойчивое.

В случае, если значение числа Рейнольдса значительно, можно говорить о том, что преобладающими являются силы инерции, благодаря которым в жидкости находятся объемы с различными скоростями движения, которые, сближаясь, обуславливают возникновение больших градиентов, при этом, течение становится хаотичным, и далее по мере достижения числа Рейнольдса критических значений, движение турбулизируется и возникает турбулентность.

Средние критические значения числа Рейнольдса, полученные экспериментальным путем составляют порядка 3000 – 5000 [5, с.103].

Для оценки движения воздушного потока целесообразно применение числа Рейнольдса, в следующих случаях:

- стратификация атмосферы безразлична;
- силы плавучести ничтожно малы;
- незначительная толщина слоя атмосферы.

Следовательно, можно сделать вывод о нецелесообразности применения числа Рейнольдса для авиационных служб в оценке риска возникновения турбулентности.

Еще одним критерием, применяемым для оценки риска возникновения турбулентности, является число Ричардсона, который характеризует отношение работы архимедовых сил к работе сил инерции [5, с.105]:

$$Ri = g(dQ/dz)/Q(dV/dz)^2 \quad (2)$$

Где, Ri - число Ричардсона;

dQ/dz - изменение потенциальной температуры в слое;

dV/dz - вертикальный градиент горизонтальной скорости потока (м/с/100м).

В результате преобразований уравнение принимает вид [5, с.108]:

$$dQ/Qdz=(\gamma\alpha - \gamma)/T, \quad (3)$$

Где, dQ/dz - изменение потенциальной температуры в слое;

$\gamma\alpha$ и γ - адиабатический и действительный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/100\text{м}$) в слое.

T - средняя температура слоя в градусах Кельвина (К);

Следовательно, уравнение можно записать:

$$Ri=g(\gamma\alpha - \gamma)/T(dV/dz)^2 \quad (4)$$

Где, T - средняя температура слоя в градусах Кельвина (К);

$\gamma\alpha$ и γ - адиабатический и действительный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/100\text{м}$) в слое.

dV/dz - вертикальный градиент горизонтальной скорости потока (м/с на 100м).

Следовательно, можно отметить следующее [2, с.121]:

Состояние $dQ/dz > 0$ характерно для устойчивой термической стратификации, при которой архимедовы силы противодействуют развитию турбулентности.

Состояние $dQ/dz=0$ характерно для безразличной стратификации, когда благоприятные условия для развития турбулентности отсутствуют.

Состояние $dQ/dz<0$ характерно для неустойчивой термической стратификации, при которой складываются наиболее благоприятные условия для развития турбулентности. При этом, в случае, если вертикальные градиенты горизонтальной скорости потока dV/dz достигают значительных величин и отмечается динамическая неустойчивость потока, повышается риск

возникновения турбулентности с критериями сильная.

Сложности в применении числа Ричардсона для метеорологического обеспечения авиации связаны с большой погрешностью при вычислении этого критерия. Например, погрешность, при вычислении числа R_i в реальных условиях по данным, полученным в результате зондирования атмосферы может достигать более 100% [3, с.76].

Следовательно, с целью уменьшения погрешности при вычислении числа R_i при составлении прогноза возникновения турбулентности требуются точные данные о вертикальном распределении температуры и изменения скорости и направления ветра с высотой.

Для своевременного прогнозирования турбулентности и проведения оценки условий, благоприятствующих ее развитию в тропосфере, применяют немало индексов. Наиболее целесообразно такие индексы применять для прогноза развития турбулентности ясного неба на основе данных, полученных при вертикальном зондировании атмосферы и при условии однотипной синоптической ситуации.

Однако, несмотря на большое количество разработанных на сегодняшний день индексов, не многие из них имеют достаточную оправдываемость прогнозов турбулентности ясного неба, или при применении индексов их критические значения невозможно определить.

Одним из таких индексов является критерий R_T , применение которого опирается на данные об относительной влажности воздуха. Данный индекс может быть описан следующим уравнением [6, с.143]:

$$R_T = R_T / (1 + 0.1R) \quad (5)$$

Где, R_T – критерий;

R -относительная влажность воздуха, %.

Для оценки развития турбулентности в стратосфере и стратопause, представляющим наибольший интерес для авиации наибольший интерес

представляет индекс К:

$$K=1/\beta-8g^2 \quad (6)$$

Где, β – вертикальный сдвиг вектора ветра;

$g=\gamma_n-\gamma_v$ (γ_n , γ_v – вертикальные градиенты температуры в слоях соответственно на 1 км ниже и на 1 км выше эшелона полета).

Условно, за пороговое значение индекса К принимают величину 1,2.

При этом, можно отметить следующее:

В случае, если для исследуемого слоя атмосферы значение индекса К >1,2 риск возникновения турбулентности сводится к 0.

В случае, если для исследуемого слоя атмосферы значение индекса К <1,2 риск возникновения турбулентности велик [9, с.208].

Так как возникновение турбулентности зависит многих метеорологических факторов, применяют классификацию, предназначенную для более детального ее изучения.

В зависимости от факторов, обуславливающих ее возникновение турбулентность подразделяется на [15, с.215]:

- механическая турбулентность;
- термическая (конвективная) турбулентность;
- орографическая турбулентность;
- турбулентность, обусловленная кучево-дождевыми облаками;
- турбулентность в ясном небе.

Механическая турбулентность возникает вследствие воздействия силы трения на деятельной поверхности, влияет на характеристики ветрового потока, в том числе на его скорость и направление и обуславливает развитие различных вихрей, отличающихся по размерам.

Необходимо отметить, что на скорость развития турбулентности механического типа в большей степени влияют свойства подстилающей поверхности, в том числе ее шероховатость, т.к., скорость ветрового потока

находится в прямой зависимости от шероховатости земной поверхности.

Следует, что, чем больше шероховатость, тем сильнее скорость потока, и как следствие развитие турбулентности будет происходить более интенсивно.

На развитие термической турбулентности конвективного типа оказывают большое влияние конвективные движения воздуха, которые наблюдаются при неустойчивом состоянии атмосферы. Вследствие сильного прогрева земной поверхности термическая конвекция усиливается и образуется большое количество хаотично расположенных термик. Форма термик может быть двух видов – в виде струи воздуха и так называемого пузыря воздуха, в зависимости от характера подстилающей поверхности и стратификации атмосферы [16, с.271].

На образование конвективных струй, являющихся источниками тепла, благоприятное влияние оказывает слабый приземный ветер, при этом, нередко распространение таких струй в вертикальном направлении может достигать несколько сотен метров.

Если при этом наблюдается неустойчивое состояние атмосферы значительной степени, конвективные струи начинают дополнительно вращаться, усиливая тепловой поток. Такая форма струй, в случае ее возникновения в пустынях и полупустынях является причиной образования песчаных и пыльных бурь. В дальнейшем, если наблюдается увеличение скорости ветрового потока, струи начинают перемещаться вслед за ним и далее образуется перегретый воздушный пузырь, который быстро переносится в горизонтальном направлении, но при попадании в слои неустойчивой стратификации может быстро перемещаться вверх.

Для термической стратификации характерным является хорошо выраженный суточный ход, что обусловлено температурными изменениями. В теплое время года при антициклонической погоде турбулентность начинает развиваться в пограничном слое атмосферы практически сразу после восхода Солнца.

При этом, ранним утром приблизительно до 9 час конвекция

представляет собой отдельные небольшие возмущения, которые по мере прогрева поверхности земли быстро увеличиваются и распространяются в вертикальном и горизонтальном направлении. Поэтому в утренние часы болтанка воздушных судов практически не проявляется [10, с.77].

К полудню термическая турбулентность в умеренных широтах распространяется на высоту свыше 1,5 км, в нижних широтах свыше 2 км.

Максимальное развитие термической турбулентности отмечается около 15 час, при этом под действие конвекции охвачен слой атмосферы вертикальной протяженностью около 3 км [18, с.105].

В районе 17 час наблюдается постепенное снижение интенсивности турбулентности и ее прекращение, причем затухание турбулентности на различных высотах происходит с разными скоростями, что обуславливает в это время суток слабую болтанку самолета. В отличие от суши, над большими водоемами термическая турбулентность может развиваться в ночное время суток [18, с.107].

Если термическая турбулентность развивается в условиях высокой влажности воздуха, что характерно для прибрежных территорий, наблюдается активное развитие конвективных облаков кучевой формы.

При этом, развитие конвективных облаков активизирует развитие термической турбулентности, для которых наиболее благоприятным является развитие облачности малой вертикальной протяженности, не более 1000 м и не закрывающей более половины неба. При таких условиях на земную поверхность поступает большое количества солнечной радиации, усиливающей прогревание земной поверхности. Воздушные суда, пролетая под такими облаками, могут ощущать болтанку умеренного характера.

В случае роста облачности более 6-7 баллов, приток солнечной радиации снижается и интенсивность развития термической турбулентности падает, как следствие, риск возникновения воздушной болтанки для судов также снижается. Если при развитии термической турбулентности конвективные облака приобретают кучево-дождевую форму, могут наблюдаться сильные

нисходящие потоки воздуха, сдвиги ветра и выпадение сильных осадков, в том числе града. При этом, в районе основания кучево-дождевого облака, в приземном слое нередко образуется зона шквала, характеризующаяся большими сдвигами ветра и резкими изменениями его скорости.

Зона шквала является следствием нисходящих движений воздуха к основанию кучево-дождевого облака, обусловленная поступлением дополнительных порций менее прогретых воздушных масс, охлажденных осадками [7, с.238].

Ближе к земной поверхности более холодный воздух образует зону сильной турбулентности с большими скоростями ветра и температурными контрастами (рисунок 1.1).

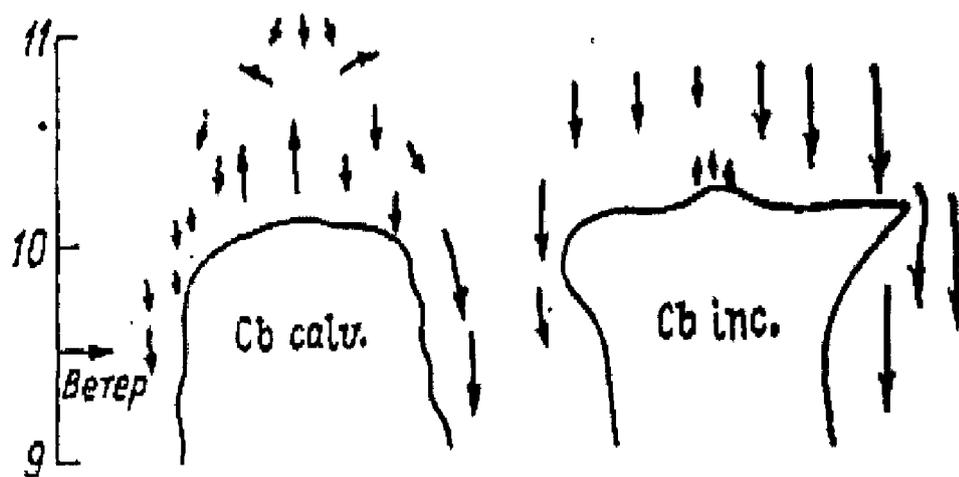


Рисунок 1.1 – Схема воздушных движений в районе вершины кучево-дождевых облаков [7, с.238]

В более высоких слоях тропосферы, развитые мощные кучевые облака наиболее опасны для воздушных судов, т.к., сильно развитые конвективные движения приводят к возникновению мощных атмосферных вихрей турбулентного характера значительной силы.

При этом, воздушное судно, попадая в район атмосферных вихрей, может резко подбросить на несколько десятков метров, и соответственно, судно при пересечении зоны с интенсивной турбулентностью ощущает большую перегрузку.

1.2 Влияние атмосферной турбулентности на полеты воздушных судов

Главная задача авиационной метеорологической службы - обеспечение безопасности полетов воздушных судов. На сегодняшний день, статистика говорит о том, что наибольшее количество летных происшествий в мировой практике регистрируется на небольших высотах, при этом, аварии чаще всего происходят при взлете или посадке воздушного судна.

Чаще других, причинами аварий становилось непрогнозируемое изменение характера движения воздушных потоков вблизи земной поверхности, при этом, чаще всего явление имело локальный характер.

Основной проблемой при прогнозировании таких изменений является недостаток информации об изменении характера движения и большое количество дополнительных факторов, оказывающих влияние на мезомасштабные процессы и явления [4, с.34].

Явлениями мезомасштабного класса являются конвективные явления, смерчи, сильно развитые облака вертикального развития, шквалы и сильные ветры. Нередко такие явления и процессы развиваются в системе глобальных воздушных течений и на атмосферных фронтах,

Обязательно при оценке локального состояния атмосферы необходимо учитывать состояние подстилающей поверхности, сезонность года, а также местные климатические условия.

В целом, процессы локального уровня нельзя недооценивать, т.к., их влияние нередко распространяется на большие площади, при этом время их существования может составлять от нескольких минут до несколько часов.

Наибольшей изменчивостью метеорологические условия обладают в слоях атмосферы у поверхности земли, что в немалой степени обусловлено влиянием местных условий и деятельной поверхности, ее неоднородным строением. Именно изменчивостью метеорологических условий в нижних слоях атмосферы обусловлен более высокий риск возникновения аварий при посадке и взлете.

Наибольшее влияние мезомасштабные явления на воздушные массы оказывают в слое атмосферы от поверхности земли до высоты 1-1,5 км, называемом пограничным слоем, в котором изменение метеорологических величин нередко носит скачкообразный характер [25, с.38].

Также влияние местных условий вносит свой определенный вклад в изменение характера движения воздушных масс, например, местная циркуляция бризового характера, нарушает движение ветра в данном районе, обуславливая его сдвиг и нарушая устойчивость его движения.

Также, на изменение движения воздушных масс оказывают влияние естественные неровности поверхности земли, такие как горы, холмы, массивы леса и антропогенные неровности - здания различной этажности,

К особенностям развития мезомасштабных процессов, в том числе циркуляционного характера, являются большие скорости вертикальных движений и большие вертикальные и горизонтальные градиенты ветра, обуславливающих его сдвиг. Также в этих процессах чаще всего турбулентность характеризуется большой интенсивностью, что в свою очередь сказывается на безопасности полетов воздушных судов.

Важность знаний о метеорологических условиях нижних слоев атмосферы для авиации обусловлена не только взлетами и посадками воздушных судов, но и обслуживанием самолетов и других летательных аппаратов специальной техникой [17, с.58].

Турбулентность оказывает наибольшее влияние на полеты воздушных судов. При попадании в зону турбулентности воздушного судна и пересечении им атмосферных вихрей на подъемную силу судна оказывается давление, при этом изменяется угол атаки крыла самолета и судно подвергается большим перегрузкам, связанные с резкими неупорядоченными бросками и его вибрацией. Т.е, наблюдается болтанка воздушного судна, которая представляет собой резкое вертикальное перемещение самолета, сопровождающееся беспорядочными колебаниями [17, с.65].

Термин болтанка введен из сложности оценивания воздействия

турбулентности на воздушное судно, поэтому при проведении оценивания воздействия турбулентности на судно, вводится понятие болтанка судна.

Болтанка воздушного судна сильной степени наблюдается относительно редко, но, даже незначительная болтанка может быть опасна для самолета и привести к различным происшествиям.

Наиболее опасна болтанка при взлете и посадке воздушного судна. При посадке во время интенсивной турбулентности, при броске самолета вниз увеличивается опасность столкновения судна с земной поверхностью, а при взлете при бросках вверх судно может превысить критические значения угла атаки и воздушное судно испытывает значительные перегрузки.

Во время самого полета судна, при попадании в зону сильной турбулентности нарушается его устойчивость и управляемость, судно подбрасывает и вибрирует, при этом, может резко измениться курс и высота полета судна, а также скорость. Вследствие более резкого движения самолета пассажиры испытывают дискомфорт, а для самого судна повышается риск износа определенных деталей.

Стоит отметить, что в зависимости от моделей воздушных судов, изменяется чувствительность и устойчивость воздушных судов к воздействию турбулентности.

Причем, чем легче воздушное судно, тем более чувствительно оно к воздействию турбулентности. Одномоторные самолеты испытывают болтанку уже при слабой турбулентности. Наибольшей устойчивостью к воздействию турбулентности, даже сильной степени развития обладают реактивные военные самолеты.

При этом, если самолеты дозвукового типа, то на их устойчивость и управляемость оказывают влияние атмосферные вихри среднего масштаба, протяженностью до нескольких сотен метров, а сверхзвуковые самолеты к таким вихрям устойчивы.

Для сверхзвуковых самолетов опасность представляют крупномасштабные вихри, имеющие размеры несколько тысяч километров и

оказывающие значительное давление на воздушное судно и, замедляя скорость его полета, что может привести к потере устойчивости судна.

Поэтому одним из важных критериев, характеризующих турбулентность является ее интенсивность.

Интенсивность представляет собой количественный показатель уровня развития турбулентности.

Для авиационных прогнозов и для составления сводок ИКАО применяет следующие четыре критерия интенсивности турбулентности и болтанки судна (таблица 1.1):

Таблица 1.1 – Критерии интенсивности турбулентности и болтанки судна

степень критерия	интенсивность	признаки
I	слабая	Отмечается покачивание ВС с крыла на крыло, но режим полета судна сохраняется. пассажиры испытывают неприятные ощущения
II	умеренная	наблюдается контролируемое изменение высоты и положения ВС, судно находится под контролем. Пассажиры испытывают перегрузки. Привязные ремни натянуты
III	сильная	резкое изменение высоты и положения ВС. Временно судно выходит из-под контроля. Пассажиры испытывают давление привязных ремней. Незакрепленные предметы падают
IV	чрезвычайная	резкое изменение высоты и положения ВС, временная потеря скорости судна, Судно выходит из-под контроля на более длительное время. Пассажиры испытывают сильное давление привязных ремней. Незакрепленные предметы швыряет

Для оценки интенсивности турбулентности применяют как качественный способ ее оценки, составленный по описанию и ощущениям экипажа, так и инструментальный.

В случае болтанки слабой интенсивности отмечается достаточно частая череда толчков самолета и его покачивание на крыльях, при этом сохраняется заданный курс воздушного судна, и его скорость. Пассажиры испытывают слабые неприятные ощущения.

В случае болтанки умеренной интенсивности отмечается отдельные броски самолета, с большим креном судна, сопровождающиеся вибрацией судна. Пассажиры вовремя броска судна вверх может прижимать к креслу, а при броске судна вниз пассажиры испытывают состояние близкое к невесомости.

В случае болтанки сильной интенсивности отмечаются резкие броски самолета достаточно большой силы, с креном судна, сопровождающиеся вибрацией судна. При этом нарушается управляемость судна и режим полета.

Болтанка, возникающая при попадании в зону с сильной турбулентностью может привести к возникновению на борту самолета внештатной ситуации.

Рассмотрим основные методы оценки турбулентности. Существуют классификация слоев атмосферы, в зависимости от частоты проявления болтанки (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация слоев атмосферы, в зависимости от частоты проявления болтанки

Слой атмосферы	Периодичность повторения	Основные причины возникновения
от 0 до 1 км	25%	влияние подстилающей поверхности и местных особенностей рельефа
от 1 до 6 км	15%	представляет собой переходную зону, на которую уже не влияет земная поверхность, и еще не влияют струйные течения и градиенты скорости ветра.
от 6 до 11 км	25%	влияние струйных течений и больших градиентов скорости ветра

Необходимо отметить, что частота проявления болтанки во многом зависит от высоты эшелона, характера полета, т.к., по статистике, воздушные суда, полет которых проходит на малых высотах и на небольших расстояниях, чаще попадают в зону турбулентности и испытывают болтанку, чем, те суда, полет которых осуществляется на больших высотах.

При изучении турбулентности необходимо учитывать, что на воздушное судно оказывают влияние только те атмосферные вихри, которые сопоставимы с размерами воздушного судна. При этом, вихри имеющие малый масштаб, чаще всего на возникновение болтанки воздушного судна любого типа не оказывают ощутимого влияния [19, с.88].

Также, наиболее часто турбулентность возникает в переходном слое тропопаузы и в районах со струйными течениями, при этом, наиболее часто там возникает турбулентность ясного неба. При этом, такая турбулентность нередко имеет большую горизонтальную протяженность, представляя собой слой с различными по масштабу струями воздуха, слитыми в единое целое. В вертикальном развитии по своим размерам такая турбулентность менее развита.

По своей структуре турбулентность подразделяется на три вида:

- непрерывные турбулентные зоны
- прерывистые турбулентные зоны.
- единичные броски самолета.

Турбулентные зоны также характеризуются продолжительностью существования.

Вычисление времени существования турбулентности представляет собой довольно сложный процесс, т.к., состоит из двух этапов.

- осуществление специальных полетов ВС между определенными точками, характерными для турбулентности;
- проведение анализа зафиксированных во время полета перегрузок.

Также для составления прогноза возникновения и развития турбулентности необходимо проведение анализа облачности.

На сегодняшний день выявлено следующая взаимосвязь между наличием

облаков и возникновением турбулентности.

Наиболее часто турбулентность возникает при облаках, конвективного происхождения, т.е., вертикального развития при этом, турбулентность может быть сильно развитой, а болтанка самолета достигать сильной степени интенсивности. При этом, наибольшей интенсивности болтанка достигает при входе в облачность и при выходе из нее [23, с.278].

В слоистообразных облаках развивается слабая турбулентность, достигающая своих максимальных значений на верхней границе, поэтому болтанка самолета при попадании в зону с такой турбулентностью отмечается как слабая.

В качестве инструментальных методов, применяемых для оценки болтанки воздушного судна чаще всего, применяют следующие методы:

- доплеровский метод;
- перегрузочный метод;
- метод измерения радиационной температуры.

Доплеровский метод основан на измерении значений средней и мгновенной скорости воздушного судна и направления его движения относительно воздушного потока, при этом данные получают с помощью ультразвукового оборудования на основе эффекта Доплера, установленных на воздушном судне.

Перегрузочный метод основан на измерении перегрузки, которую испытывает воздушное судно, пролетая турбулентную зону. Для этого, в самолете устанавливаются акселерометры, которые измеряют значение ускорения воздушного судна или акселерографы, предназначенные для измерения и записи изменения ускорения самолета.

Принцип действия акселерометра основан на применении определенного груза, связанного с указателем силы и уравновешенного пружинами, при этом, при перегрузке груз испытывает давление, и указатель в зависимости от перегруза перемещается в одну из сторон.

На сегодняшний день, третий, современный метод измерения

радиационной температуры основан на использование инфракрасного радиометра, позволяющего обнаружить турбулентность ясного неба в режиме реального времени.

Данный метод базируется на законах излучения тел, при этом, сама атмосфера, представляющая собой физическую смесь газов, практически не излучает [21, с.78].

Следовательно, прибор, установленный на воздушном судне, при измерении радиационных температур, может обнаружить изменение горизонтального градиента температуры в окружающем и встречном потоке воздуха.

Заблаговременность обнаружения зоны турбулентности обусловлено высотой полета самолета и точности применяемого оборудования - инфракрасного фильтра. При этом, время оповещения в большей степени зависящее от высоты, с ее увеличением, увеличивается, т.к., атмосферное поглощение, определяющее горизонтальный вес, уменьшается.

2 Методы прогноза атмосферной турбулентности

2.1 Синоптические методы прогноза атмосферной турбулентности

Основными показателями, которые включают в прогноз о возможном возникновении турбулентности являются следующие [3, с.143]:

- возможное пространственное положение турбулентных зон вдоль трассы полета;
- возможное пространственное положение турбулентных зон на аэродроме;
- ожидаемая интенсивность возможной болтанки.

На возникновении турбулентности и на ее развитие большое влияние оказывают синоптические процессы, при этом, в зависимости от характера синоптических условий и интенсивности атмосферных процессов зоны турбулентности могут образовываться на различных высотах тропосферы, тропопаузы и нижних слоев стратосферы.

К основным физическим факторам, влияющим на возникновение и развитие турбулентности, относятся трение воздушного потока о слой деятельной поверхности, характер подстилающей поверхности, ее температурный режим, обусловленный неравномерностью нагревания различных участков суши и воды.

При этом, в процессах, благоприятствующих развитию турбулентных процессов, может принимать участие как несколько факторов, так и один. Поэтому, при составлении прогноза возникновения турбулентности основываются на сложившейся синоптической ситуации предшествующей прогнозу и учитываются дополнительные факторы, такие как состояние подстилающей поверхности, в данный момент времени, рельефные особенности, показатели облачности, особенно ее форма и высота развития, термодинамические характеристики воздушной массы.

На сегодняшний день, существуют следующие методы прогноза атмосферной турбулентности, возникающих на малых высотах. Данные методы применяют при проведении качественной и количественной оценке

интенсивность болтанки воздушных судов.

Прогноз механической турбулентности, которая возникает вследствие воздействия силы трения на деятельной поверхности основывается на данных о скорости ветра в слое трения и величины ветровых вертикальных порывов.

Первоначально необходимо рассчитать значения вертикальных порывов, которые вызывают болтанку воздушного судна. Порывы зависят от величины скорости ветра в приземном слое атмосферы, вертикальной протяженностью около 500 м наиболее подверженному трению.

Математически эта зависимость имеет вид [14, с.367]:

$$\omega = \kappa V, \quad (7)$$

Где, ω - значение вертикальных порывов;

V - скорость ветра у поверхности Земли;

κ - коэффициент, характеризующий земную поверхность.

В среднем, при прогнозировании, коэффициент κ принимается равным значению 0,4.

В таблице 2.1 приведены средние значения коэффициента κ характеризующего земную поверхность в приземном слое атмосферы, вертикальной протяженностью около 500 м, при влиянии различных условий местности.

Таблица 2.1 – Изменение коэффициента κ при влиянии различных условий местности в теплое время года [14, с.372]

Характерные условия местности	Значение коэффициента κ
Ровный луг	0,13
Слабопересеченная местность	0,15
Степь с отдельными лесными полосами	0,29
Осушенное болото	0,33
Полупустыня	0,35
Лесостепные полосы	0,54

На основании полученных в результате расчета значений вертикальных порывов рассчитываем возможную интенсивность болтанки воздушного судна.

Интенсивность болтанки оценивается по формуле [22, с.78]:

$$\Delta n = 0,06KV, \quad (8)$$

Где, Δn - приращение перегрузки самолета в долях g ;

0,06 - коэффициент, характеризующий приращение перегрузки современных самолетов при вертикальном порыве ветра 1 м/с;

V - скорость ветра у поверхности Земли;

K - коэффициент, характеризующий земную поверхность.

На развитие термической турбулентности конвективного типа оказывают большое влияние конвективные движения воздуха, которые наблюдаются при неустойчивом состоянии атмосферы. Поэтому, при прогнозе возникновения и развития термической болтанки обязательно учитываются следующие факторы:

- особенности рельефа. От характера рельефа зависит интенсивность развития термиков или конвективных струй, в условиях пересеченной местности термики развиваются значительно интенсивнее, чем в условиях равнинного рельефа.
- особенности растительного покрова. Более интенсивное развитие термиков наблюдается при многообразии растительности, т.е., при чередовании лесной и кустарниковой растительности с полями и лугами.
- отражательная способность подстилающей поверхности. Развитие термиков протекает только над поверхностью, имеющей малую отражательную способность. Над поверхностью льда и снега термики практически не образуются.
- влажностный режим почвы. Термики более интенсивно развиваются над сухой перегретой поверхностью. При выпадении осадков развитие термиков приостанавливается или имеют очень слабую интенсивность, т.к., тепло деятельной поверхности растрачивается на испарение.

- ветровой режим у поверхности земли. Малые скорости ветра, не превышающие 5-6 м/с благоприятны для развития термиков.
- адвекция. Развитие термиков усиливается при адвекции холодных потоков воздуха, при адвекции тепла, процессы замедляются.
- антропогенные источники тепла, такие как трубы промышленных предприятий значительно усиливают развитие термиков.

К наиболее благоприятным для возникновения и развития термической турбулентности относятся следующие синоптические условия [13, с.42]:

- тыловая часть циклона;
- антициклоническая кривизна изобар;
- размытое барическое поле;
- отсутствие близкорасположенных облачных систем фронтального типа.

Стоит отметить, что по своей сути прогноз термической болтанки практически соответствует прогнозу развития конвективной облачности вне фронтальных разделов.

Но, в условиях малой влажности воздуха, конвективные струи, которые приводят к образованию турбулентности и, следовательно, болтанки, могут образовываться и при отсутствии предпосылок для развития конвективных облаков.

Рассмотрим метод прогнозирования термической турбулентности, возникающей в зоне атмосферных фронтов.

Развитие турбулентности вдоль холодного фронта в большей степени зависит от силы сопротивления, которое оказывает теплая воздушная масса перед холодным фронтом и величины силы, поднимающей воздушные потоки.

Сила сопротивления теплой воздушной массы обозначается, как F_c и обусловлена значениями вертикальных градиентов температуры в этой воздушной массе. Математически силу сопротивления F_c можно определить, как разность температур на уровне подстилающей поверхности и на высотах 850 гПа.

Величина поднимающей силы зависит от первоначальной скорости

движения холодной массы воздуха относительно теплой и определяется по формуле [14, с.377]:

$$F_u = V_{x.f} - U_x, \quad (9)$$

Где, F_u – скорость движения холодной воздушной массы;

$V_{x.f}$ – скорость движения холодного фронта;

U_x – величина градиента ветра в теплом воздухе, расположенного перпендикулярно холодного фронта.

Следующим этапом вычисляется связь этих двух факторов – силы сопротивления теплой воздушной массы F_c и поднимающей силы F_u с возникновением болтанки в зоне фронтов и ее интенсивностью.

Для этого необходимо произвести следующие расчеты:

- рассчитать величину скорости движения холодного фронта по кольцевым картам двух последовательных сроков с разностью 6 час.
- рассчитать величину градиента ветра в теплом воздухе, граничащим с холодным фронтом по кольцевой карте последнего срока;
- рассчитать скорость движения холодной воздушной массы, используя полученные данные скорости движения холодного фронта и величину градиента ветра в теплом воздухе;
- рассчитать значение силы сопротивления теплой воздушной массы, используя значения вертикальных градиентов температуры, т.е., перепад температуры в слое атмосферы от земной поверхности до слоя 850гПа. Для этого используем данные зондирования атмосферы в теплой воздушной массе, полученные с ближайшей аэрологической станции и прогнозные данные температуры;
- построить график по полученным данным величин силы сопротивления теплой воздушной массы и скорости движения холодной воздушной массы. В зависимости от расположения нанесенной точки можно оценить интенсивность болтанки. Расположение точки между кривыми 1 и 2

говорит о риске возникновения болтанки умеренного типа.

Рассмотрим метод прогнозирования орографической турбулентности, возникающей вследствие влияния неоднородностей земной поверхности.

Земные неоднородности, в зависимости от их размеров, в разной степени деформируют конвективные движения воздуха, при этом, на степень деформации воздушного потока оказывают влияние не только высота гор, но и распределение температуры и ветра в вертикальном направлении. На вертикальное распределение температуры и ветра влияют синоптические процессы, поэтому, при оценке орографической турбулентности также учитывается синоптическая ситуация [24, с.42].

Рассмотрим синоптические ситуации, при которых складываются наиболее благоприятные условия для развития горных волн воздуха и турбулентности над подветренной стороной горных хребтов:

- струйные течения тропосферного типа, пересекающие горный хребет обуславливают развитие так называемого роторно-волнового течения, и приводит к образованию сильной турбулентности. Причем, зона турбулентности может простираться от вершины гор до верхней тропосферы, и даже проникать в верхние слои стратосферы;
- наличие в нижнем слое тропосферы слоя инверсии или изотермии при стационарном фронте, расположенном параллельно изобарам;
- наличие в нижнем слое тропосферы слоя инверсии или изотермии на периферии антициклона с антициклонической кривизной изобар. При этом наблюдается градиентный ветер со скоростью более 10м/с;
- пересечения горного хребта струйным течением. Наиболее благоприятные условия для развития роторно-волнового течения и сильной турбулентности существует от нижних уровней до верхней тропосферы и нижней стратосферы;
- расположение тыла холодного фронта на расстоянии до 300 м от его приземного положения, при этом, в нижнем слое атмосферы отмечается высокая скорость ветра, благоприятная для развития роторного течения.

На образование орографической турбулентности оказывают влияние другие метеорологические факторы, такие как, радиационное ночное охлаждение деятельной поверхности, обуславливающее образование инверсий, которые усиливают на подветренных склонах гор волновые движения.

Еще важным для авиационной службы является прогнозирование турбулентности в ясном небе. Прогнозирования турбулентности в ясном небе применяется для высоких слоев атмосферы, т.к., такой тип турбулентности характерен для верхних слоев тропосферы, тропопаузы и стратосферы.

Такие прогнозы являются достаточно трудоемкими и сложными, и при этом, на сегодняшний день, имеются определенные трудности с определением зон турбулентности на высотах. Поэтому, прогноз основывается на проведении анализа зон, в которых возникают турбулентности в ясном небе, а также анализа синоптической ситуации, наблюдавшейся в то время. Также применяют статистические метеорологические данные о ветровом и температурном полях на различных высотах [4, с.35].

Поэтому, можно отметить, что существует два основных метода определения турбулентности в ясном небе - синоптический и физико-статистический.

В целом, можно сказать, что принцип применения синоптического метода прогноза атмосферной турбулентности, основывается не только на анализе приземных карт погоды, но и на привлечение дополнительных инструментов, таких как топографические карты различных видов.

Для анализа и прогноза облачности применяют кольцевые и синоптические карты, высотные карты позволяют определить расположение барических образований, градиенты ветра, сходимости и расходимости воздушных потоков и адвекции воздушных масс.

Точность прогноза возникновения турбулентности и его интенсивности повышается при использовании данных, полученных с воздушных судов, которые позволяют провести анализ и синхронизировать время возникновения болтанки с особенностями атмосферных слоев и процессов.

При этом, особое внимание уделяется характеристикам барического поля, поверхностей раздела, струйных течений и высоте полета самолета.

Рассмотрим основные типы характерных барических полей, при которых наблюдалась наибольшей повторяемостью интенсивной турбулентности.

К первому типу барического поля относится частный циклон, для которого характерна глубокая высотная ложбина (рисунок 2.1).

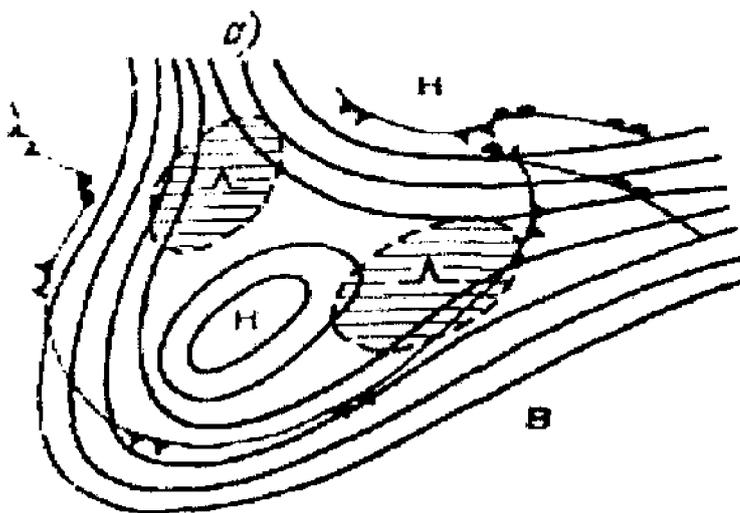


Рисунок 2.1 – Схема расположения зон турбулентности в барическом поле с глубокой ложбиной [14, с.377]

Как видно из схемы, зоны наиболее интенсивной турбулентности располагаются в районе сильной конвергенции и дивергенции изогипс, при которых скорость чаще всего составляет от 100 до 150 км/ч, и характеризуются сильным боковым сдвигом ветра.

При этом, в районах конвергенции изогипс благоприятны для образования болтанки умеренного типа, а районы с дивергенцией изогипс обуславливают возникновение болтанки сильного типа. При этом, резкие боковые сдвиги ветра значительно повышают риск возникновения сильных болтанок.

Ко второму типу барического поля относится высотный циклон, который обуславливает формирование двух зон турбулентности, при этом, именно при таком типе барического поля болтанки образуются чаще всего, что повышает риск встречи воздушного судна с ней (рисунок 2.2).

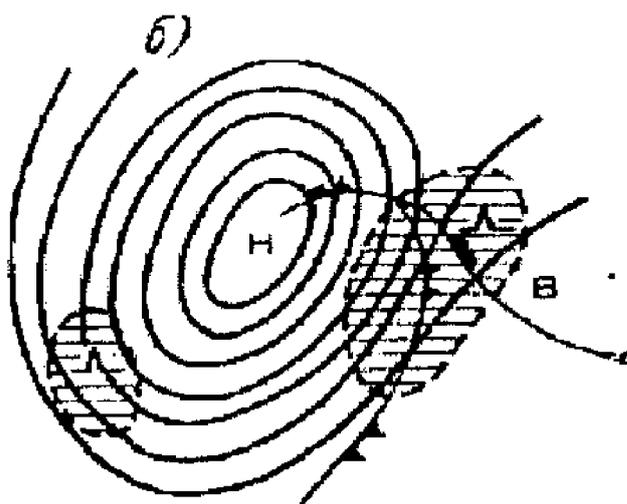


Рисунок 2.2 – Схема расположения зон турбулентности в барическом поле в высотном циклоне [14, с.378]

При такой синоптической ситуации, в тыловой части циклона образуется турбулентность умеренного и слабого типа, сходимость и расходимость изогипс выражена слабо. Скорость ветрового потока чуть выше 100 км/час.

Более сильной интенсивности турбулентность образуется в передней части циклона, характеризующейся сильной расходимостью изогипс и большими сдвигами ветра. Также отмечаются более высокие скорости ветра, превышающие 130 км/час.

К третьему типу барического поля относится ложбина, при которой зона турбулентности может образовываться в передней части ложбины, в районе дивергенции изогипс. При такой ситуации ветер редко превышает 80 км/час, а боковые сдвиги ветра могут быть значительными и достигать 100 км/час.

При этом, турбулентность при такой синоптической ситуации редко превышает умеренную степень развития, соответственно имеется риск образования болтанки, который значительно повышается, если до образования ложбины, в данном районе располагался гребень.

Особенно большая вероятность болтанки имеет место тогда, когда ложбине на картах барической топографии предшествовал гребень (рисунок 2.3).

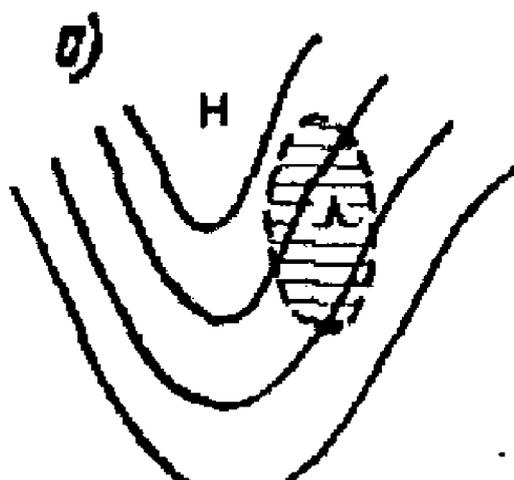


Рисунок 2.3 – Схема расположения зон турбулентности в барическом поле в передней части ложбины [14, с.379]

К четвертому типу барического поля относится ложбина, при которой зона турбулентности может образовываться в тыловой части ложбины, в районе конвергенции изогипс (рисунок 2.4).

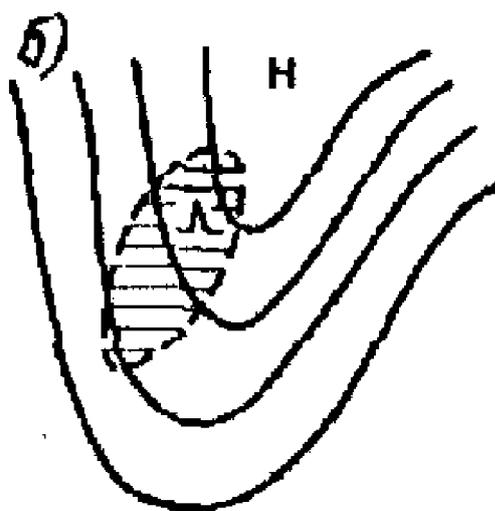


Рисунок 2.4 – Схема расположения зон турбулентности в барическом поле в тыловой части ложбины [14, с.382]

При данной синоптической ситуации скорость ветра также не превышает 80 км/час, а боковые сдвиги значительны, что обуславливает образование турбулентности умеренного и сильного типа. К пятому типу барического поля относится высотный гребень. При таком типе барического поля могут отмечаться болтанки слабой или реже, умеренной степени, причем, риск

встречи самолета с болтанкой значительно повышается в тыловой части гребня (рисунок 2.5).

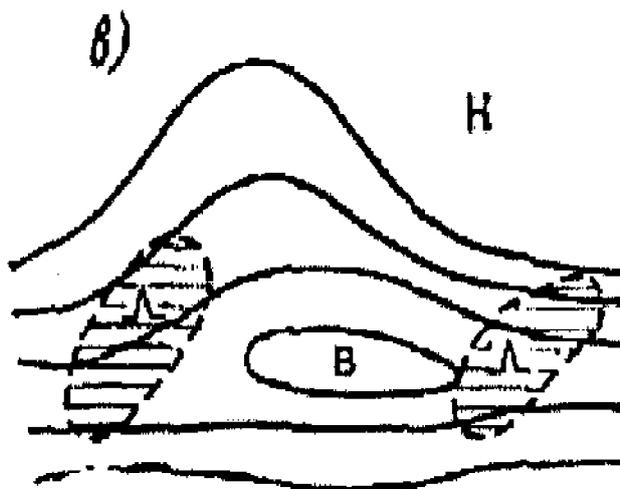


Рисунок 2.5 – Схема расположения зон турбулентности в барическом поле высотного гребня [14, с.386]

Можно сделать вывод, что наиболее благоприятными условиями для образования турбулентности складываются при барических полях, обусловленных глубокими барическими ложбинами. Также, стоит отметить роль облачности в образовании зон турбулентности (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Повторяемость болтанки самолетов в облаках различных форм, % (по С.М. Шметеру) [22, с.78]

Основная форма облаков				Наличие облачности всех видов форм
Слоистая форма облаков, в точности St, Sc	Слоисто-дождевая форма, в точности Ns	Высоко-слоистая форма облаков As	Облака верхнего яруса Cs, Cc	
33	32	29	33	40

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что повторяемость болтанки на высоте полета воздушных судов значительно возрастает при наличии облачности, при этом, риск образования турбулентности значительно повышается при конвективной облачности вертикального развития.

Группировка основных типов синоптических ситуаций, обуславливающих риск вероятности возникновения болтанки приведена в таблице 2.3 [3, с.281].

Таблица 2.3 – Вероятность возникновения болтанки воздушных судов различной интенсивности в зависимости от типа синоптической ситуации

Тип синоптической ситуации	Вероятность возникновения болтанки	
	Первая группа	Вторая группа
1 тип синоптической ситуации		
Скорость ветра более 90 км/ч	54	26
Циклоническая часть струи	61	33
Антициклоническая часть струи	51	23
Осевая часть струи	28	7
Гребень в струе	75	41
Ложбина в струе	51	26
Прямолинейная струя	50	23
2 тип синоптической ситуации		
Скорость ветра менее 90 км/ч	35	12
Гребень	39	11
Ложбина	43	20
Прямолинейный поток	31	10
3 тип синоптической ситуации		
Вне зависимости от скорости ветра	41	16
Сильная конвергенция и дивергенция изогипс	51	21
Конвергенция и дивергенция изогипс отсутствует	37	15

В таблице в первую группу включены случаи болтанки, независимо от ее интенсивности, во вторую группу включены случаи болтанки умеренной и сильной интенсивности. Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что вероятность любой, умеренной или сильной болтанки самолетов при указанных выше типах синоптических ситуаций составляет соответственно 31 - 64%.

2.2 Физико-статистические методы прогноза турбулентности при ясном небе

Помимо синоптического метода прогноза образования турбулентности и, следовательно, болтанки воздушного судна, на практике широкое применение имеют физико – статистические методы прогноза, которые базируются на применении сразу несколько количественных признаков.

В основу физико – статистического метода положены данные зондирования атмосферы, полученные с аэрологических станций, при этом наибольший интерес представляют данные о вертикальном распределении температуры и ветрового потока [7, с.458].

При этом, одним из методов является метод сопоставления данных о температурно-ветровом режиме слоев атмосферы и возникновением или, наоборот, отсутствием турбулентности любого типа. При этом, физико – статистические методы наибольший интерес представляют при оценке турбулентности ясного неба [2, с.20].

Метод физико-статистического прогноза основывается на определении графическим способом критических величин, т.е., неких пороговых значений температуры и ветра, при которых возможно образование турбулентности.

На сегодняшний день, этот метод находит широкое применение при прогнозе турбулентности ясного неба и разнообразными подходами расчета и графического представления результатов, в том числе эмпирических зависимостей и номограмм.

Наиболее часто применяются так называемые диагностические методы, на основе фактических данных температурно-ветрового зондирования, при этом прогноз составляется как графическим способом, так и на основе применения различных критериев.

При графическом методе за основу принимаются утверждения о происхождении турбулентности, а также, анализе основных факторов, обуславливающих ее образование и развитие. Для анализа принимаются

вертикальные профили атмосферы, построенными на основе показателей ветра, в том числе скорости и направления и температуры воздуха.

Основными утверждениями, обосновывающими оправданность этого метода, являются мировых исследований о первостепенном применении данных вертикальных профилей температуры и влажности для прогноза турбулентности и болтанки воздушного судна.

Рассмотрим основные принципы графического метода составления прогнозов [7, с.489].

Вертикальный профиль строится путем нанесения на график точек вертикального изменения полученных данных температуры воздуха и показателей ветра, при этом, для каждого слоя воздуха на участках профиля изменение наносимых значений метеорологических параметров будут хорошо прослеживаться вертикальные градиенты температуры и скорости ветра, которые будут иметь наклон в сторону горизонтальной оси.

Применяемы при прогнозе диагностическим методом критерии оценки опираются на пороговые значения вертикальных градиентов. Проведение практических исследований выявило, что на высоте 1000 м критические значения для температуры воздуха находятся в районе 7°C для, изменения значений скорости ветра соответствуют 10 м/с. Для отклонения ветра от первоначального направления пороговые значения составляют 15° .

Методика выделения зон болтанки самолетов сводится к тому, что по построенным профилям ветра и температуры воздуха для каждого линейного участка определяется угол наклона вертикального профиля к горизонтальной оси; угол наклона сравнивается с критическим значением.

На полученный график накладывается эталонная сетка с нанесенными пороговыми значениями вертикальных градиентов, нанесенных наклонно и далее проводится сопоставление эталонной сетки с построенным вертикальным профилем, тем же способом, что и при определении стратификации атмосферы на аэрологической диаграмме.

Отличительной особенностью данного сопоставления является

проведение анализа для каждой метеорологической величины отдельно, т.е., каждый построенный профиль анализируется отдельно. Это обусловлено тем, что на образование турбулентности может оказывать влияние, как комплекс метеорологических величин, так и каждая величина отдельно.

Если при проведении анализа выявлена неустойчивость в характеристике хотя бы одного из вертикальных профилей, то можно говорить о возможном риске образования турбулентности и болтанки. При этом, на интенсивность турбулентности указывает количество неустойчивых профилей, чем их больше, тем сильнее будет проявляться турбулентность и тем сильнее ожидаемая болтанка.

На рисунке 2.6 представлено схематичное изображение графического метода прогноза возникновения турбулентности и болтанки воздушных судов.

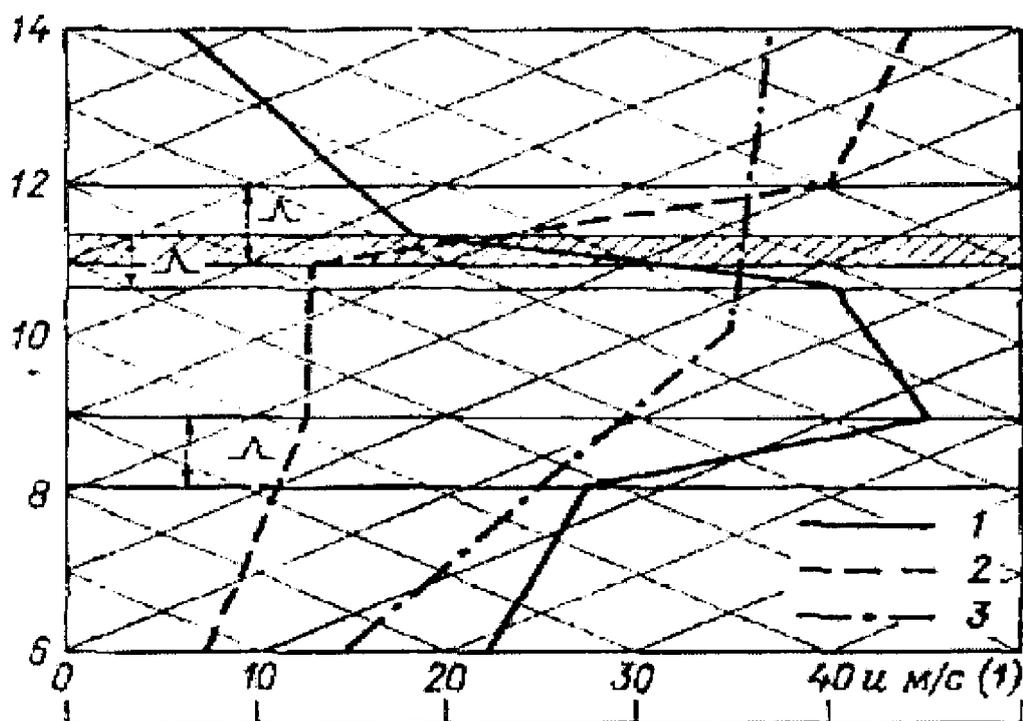


Рисунок 2.6 – Схематичное изображение графического метода прогноза турбулентности и болтанки воздушных судов [7, с.489]

На рисунке схематично отмечены вертикальные профили метеорологических величин. Под цифрой 1 нанесен профиль скорости ветра, под цифрой 2 – профиль направления ветра, под цифрой 3 – профиль температуры.

Далее, полученные данные позволяют отметить на графике слои с возможной турбулентностью.

Анализируя вертикальный профиль, построенный по данным вертикальных градиентов скорости ветра, можно отметить два слоя атмосферы с наиболее соответствующими условиями для образования турбулентности: на высоте от 8 000 м до 9 000 м и на высоте 10 700 м до 11 400 м.

Анализируя вертикальный профиль, построенный по данным направления ветра можно отметить слой с вероятностью возникновения турбулентности на высоте от 11 000 до 12 000 м.

При этом, в слое от 11000 до 11400 м выявлено совпадение неустойчивости двух показателей – скорости и направления ветра, что говорит о большой неустойчивости ветра, с боковыми отклонениями и для воздушных судов в этом районе повышается риск попадания в слой турбулентности и болтанки. Анализ вертикального профиля температуры неустойчивого состояния не выявил [7, с.489].

К основным достоинствам графического метода относится его высокая оперативность построения и охватывание прогнозом практически всей толщи тропосферы и верхнего слоя стратосферы. Поэтому, данный метод находит большое применение при составлении авиационных прогнозов турбулентности и болтанки над определенными районами земной поверхности, когда запрашивают прогноз для большой толщи атмосферы.

Данный метод позволяет провести анализ вертикального распределения основных метеорологических величин, а также проследить за их распределением, входящими в число Ричардсона.

К недостаткам графического метода, позволяющего получать непрерывные данные о характеристиках слоев с возможной турбулентностью и болтанкой воздушных судов, а также их развития относится то, что в расчет не принимаются горизонтальные градиенты температуры и влажности, что повышает погрешность при составлении прогноза и значительно сокращает горизонтальную площадь исследуемого района.

Поэтому, для более точного прогноза применяют комплексный метод, основанный на применении комплекса шести критериев [7, с.493].

Для этого метода также применяют данные температурно-ветрового распределения, полученных на основе аэрологического зондирования атмосферы, при этом, как и при графическом методе применяют данные вертикальных градиентов скорости ветра не менее 10 м/с на 1000 м, вертикальный сдвиг направления ветра не менее 15° на 1 км.

Также дополнительно применяют следующие данные зондирования атмосферы: данные скорости ветра более 25 м/с, данные горизонтальных градиентов скорости ветра, при достижении значений не менее 5 м/с на 100 км, значения горизонтальных градиентов температуры воздуха, при достижении значений не менее 2°С на 100 км.

Также учитывают увеличение скорости ветра на заданной высоте более, чем на 10 м/с за шестичасовой период времени. При этом, за критическое значение, позволяющее ожидать турбулентность и болтанку принимают ситуации, при которых совпадают не менее трех критериев, участвующих в оценке.

При проведении данного анализа шести критериев, целесообразно расстояние, которое должно преодолеть воздушное судно разделить на сравнительно небольшие участки, не превышающие 300 км. Затем для выделенных участков берутся данные аэрологического зондирования, и проводится анализ всех шести критериев [3, с.288].

Уже, на основе полученного анализа, для каждого исследуемого участка трассы можно составлять прогноз возможного образования турбулентности и болтанки.

Также, для прогноза возможной болтанки хорошо подходит графическое представление вертикального распределения температуры и влажности. На данном графике на горизонтальной оси откладываются значения вертикальных градиентов ветра, на вертикальной оси – значения вертикальных градиентов температуры (рисунок 2.7).

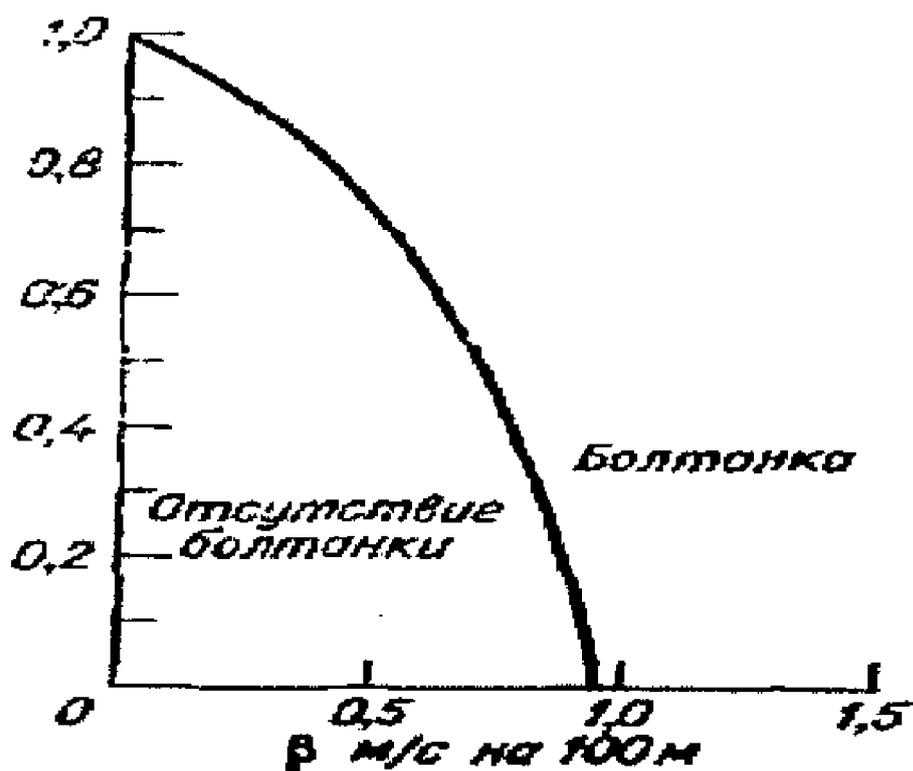


Рисунок 2.7 – Пример графика прогноза болтанки, построенного по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы [3, с.289]

Кривая, соединяющая пороговые значения двух критериев делит график на две части: зону, характерную для образования болтанки и зону без болтанки, далее по фактическим данным температуры и ветра, полученным в результате зондирования атмосферы можно составить прогноз ситуации с образованием и развитием болтанки.

Стоит отметить, что явление турбулентность при ясном небе, входит в число особых явлений погоды, отмечаемых Гидрометцентром и включенным в перечень явлений, для которых строится карта особых явлений погоды России.

3 Анализ случаев возникновения атмосферной турбулентности в Московском регионе

3.1 Организация авиаметеорологического обеспечения Московского центра единой системы авиаметеорологического обеспечения

Московский центр единой системы авиаметеорологического обеспечения (АМЦ Москва) осуществляет свою деятельность в зоне ответственности филиала «МЦ АУВД» и ГЦ ЕС ОрВД ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», а также на территории Москвы, Московской, Липецкой, Курской, Воронежской, Тамбовской, Калужской, Тверской, Рязанской, Белгородской, Брянской областей через свои обособленные подразделения. Зона ответственности синоптической группы АМЦ Москва представлена на рисунке 3.1.

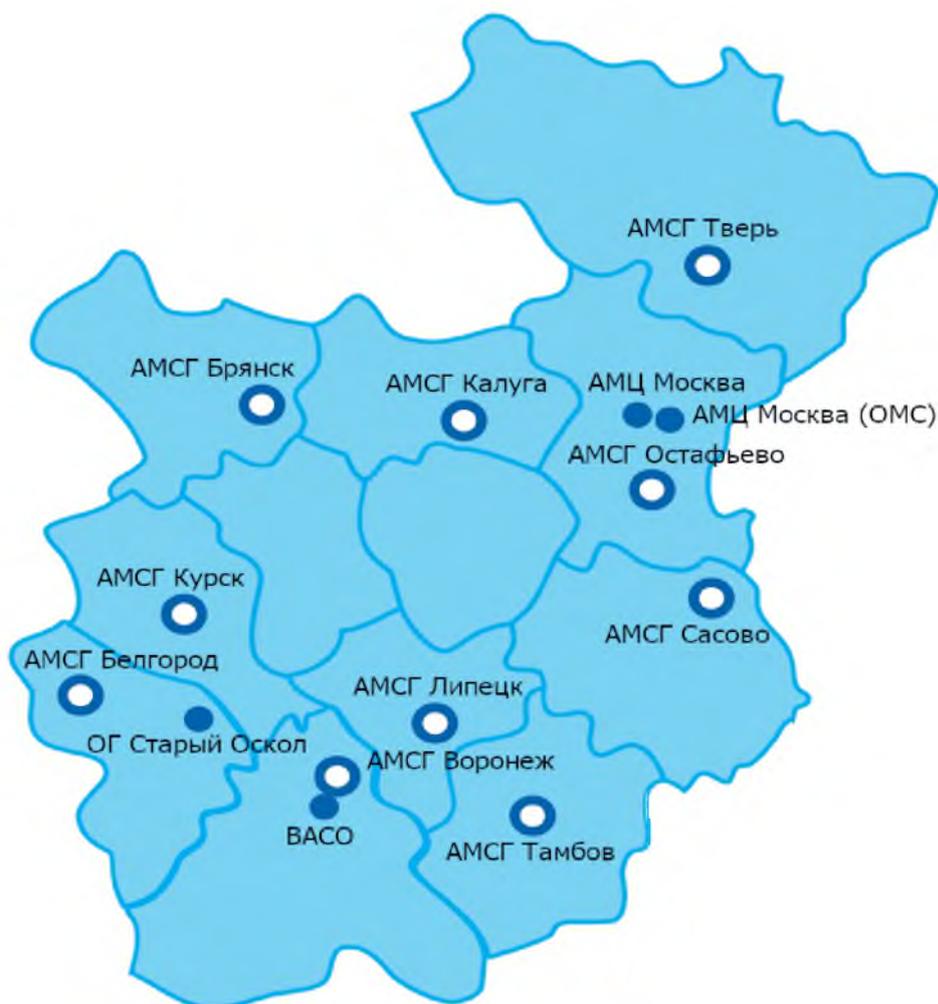


Рисунок 3.1 –Зона ответственности Московского центра единой системы авиаметеорологического обеспечения

Синоптическая группа АМЦ Москва обслуживает практически всю центральную часть России и предоставляет авиаметеорологическую информацию в формате GAMET непосредственно потребителям каждые 3 час. Прогноз GAMET является зональным и предоставляется для полетов воздушных судов на малых высотах, т.е., ниже эшелона полета FL100 [3, с.286].

Метеорологическая часть прогноза GAMET состоит из двух разделов. Прогностические данные об атмосферной турбулентности в прогнозе GAMET указываются в первом разделе, содержащем информацию о явлениях погоды, представляющих опасность для полета в слое от земли до FL100 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Критерий качественной и количественной оценки интенсивности турбулентности

Интенсивность болтанки	Значение приращения вертикальной перегрузки Δn ВС в долях g^*	Вертикальные порывы ветра	Качественная оценка интенсивности болтанки
Слабая (FBL)	$ \Delta n < 0.5g$	менее 10 м/с	Отмечается покачивание ВС с крыла на крыло, но режим полета судна сохраняется. пассажиры испытывают неприятные ощущения
Умеренная (MOD)	$0.5g \leq \Delta n \leq 1.0g$	10-15 м/с	наблюдается контролируемое изменение высоты и положения ВС, Судно находится под контролем. Пассажиры испытывают перегрузки. Привязные ремни натянуты
Сильная (SEV)	$ \Delta n > 1,0g$	более 15 м/с	резкое изменение высоты и положения ВС. Временно судно выходит из-под контроля Пассажиры испытывают давление привязных ремней. Незакрепленные предметы падают

В прогнозах 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).

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 эшелонов полета (до FL650) и в пределах границ РПИ.

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.

Основными источниками информации о турбулентности являются сообщения пилотов (в терминах ВМО – информация AIREP), а также автоматически измеренные и автоматически переданные метеорологические параметры (система AMDAR) [3, с.284].

AMDAR- автоматизированная система передачи наблюдений с бортов воздушных судов, причем независимо от их принадлежности - коммерческих, военных, частных. Информация AMDAR передается с бортов ВС, имеющих специальное оборудование и программное обеспечение, на всех этапах полета.

Система AMDAR позволяет получать в режиме близкому к реальному

времени информацию о местонахождении воздушных судов, направление и скорость ветра, температуру воздуха, а также данные о влажности, турбулентности и обледенении.

Частота передачи данных: от 3 до 60 сек. на этапе подъема воздушного судна, от 1 до 60 мин. на эшелоне полета и от 20 до 300 сек при снижении. Время поступления информации: примерно через 10 минут от момента наблюдения. Информация об интенсивности турбулентности, поступающая от пилотов, в значительной степени субъективна.

Информация AIREP (Air Report) - это система обмена информацией между воздушными судами и наземными службами посредством радиосвязи (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Формат сообщений AIREP Special [11, с.8]

Элемент сообщения	Формат	Пример
Условное обозначение специального сообщения	ARS	ARS
Идентификация воздушного судна	идентификатор	VA812 JNA006
Наблюдаемое явление	TS	SEV TURB VA CLD VA MT SHEVELUCH
	TSGR	
	SEV TURB	
	SEV ICE	
	SEV MTW	
	MOD TURB	
	MOD ICE	
	HVY SS	
	VA CLD	
VA [MT nnnnnnnnnn]		
Время наблюдения явления (UTC)	OBS AT nnnnZ	OBS AT 1216Z
Местоположение ВС по широте и долготе	NnnnnEnnnnn NnnnnWnnnnn	N5606E16356
Эшелон полета или высота	FLnnn или FLnnn/nnn или nnnnM	FL230
		FL 180/230
		8100M

Система AIREP предназначена для передачи метеорологических наблюдений и отчетов о погодных условиях, которые могут быть важны для безопасности полетов. Данные наблюдений с борта ВС передаются через органы ОВД органам метеорологического слежения (ОМС), аэродромным метеорологическим органам.

Информация из отчетов AIREP используется в метеорологических прогнозах и для принятия решений о маршруте полета, выборе высоты и других мероприятиях, связанных с безопасностью полетов [11, с.6].

Важно отметить, что информация AIREP является оперативной и ее актуальность ограничена временем наблюдений. Сообщение в виде AIREP Special (ARS) состоит из следующих составляющих:

Наземные данные. Для анализа метеорологической ситуации, и выявления благоприятных условий погоды для возникновения атмосферной турбулентности и для составления прогноза используют метеорологические данные, полученные с помощью автоматической аэродромной метеорологической измерительной системы АМИС-РФ.

С помощью данной системы можно в автоматическом режиме получать информацию о данных всех метеорологических показателей, причем, система также в автоматическом режиме их обрабатывает и далее формирует сводки погоды – сообщения в кодах METAR (SPECI), SINOP (КН-01), ATIS, VOLMET.

Также система в автоматическом режиме составляет и отправляет предупреждения о возникновении опасных явлений погоды.

Синоптические данные. В основе лежат синоптические карты, которые позволяют рассмотреть синоптическую обстановку над областями Центральной России и выявить барические образования, определяющие погодные условия в данном районе.

Аэрологические данные. Аэрологические данные предоставляют информацию о вертикальной структуре атмосферы, которая может быть связана с возникновением атмосферной турбулентности.

Для определения термодинамических условий формирования зон

атмосферной турбулентности над областями Центральной России используется индекс неустойчивости – Bulk Richardson Number (BRN). Индекс BRN является показателем атмосферной турбулентности, который оценивает отношение между устойчивостью атмосферы и сдвигами ветра, возникающими из-за горизонтального градиента скорости ветра и вертикального градиента температуры.

Индекс BRN используется для определения условий, способствующих возникновению или поддержанию турбулентности в атмосфере [3, с.289]:

$$RB = (gTv)\Delta\theta v\Delta z /(\Delta U)^2+(\Delta V)^2 \quad (10)$$

Где, g – ускорение свободного падения;

Tv – абсолютная виртуальная температура;

$\Delta\theta v$ – разность виртуальных потенциальных температур в слое толщиной Δz ;

ΔU и ΔV – изменения горизонтальных составляющих ветра в том же слое.

BRN является безразмерным показателем. Критические значения BRN указывают на различные условия атмосферной турбулентности:

BRN > 0: Когда BRN больше нуля, атмосфера обычно является неустойчивой. Более высокие значения BRN указывают на более неустойчивую атмосферу, где вертикальные перемещения воздуха и развитие конвекции могут быть более вероятными.

BRN < 0: В этом случае, когда BRN меньше нуля, атмосфера является стабильной и подвержена инверсии. Турбулентность обычно ограничена или подавлена, и вертикальные перемещения воздуха ослаблены.

Стоит отметить, что в пределе уменьшения толщины слоя объемное число Ричардсона приближается к градиентному числу Ричардсона, для которого критическое число Ричардсона примерно равно $Ric = 0,25$. Числа, больше этого критического значения, являются динамически нестабильными и, вероятно, станут или останутся турбулентными.

3.2 Анализ случаев атмосферной турбулентности в районе аэродромов Москвы по данным АМИС–РФ и на основе индекса BRN

При планировании полетов воздушных судов любого типа и обеспечения их метеорологической информацией во время полета воздушных судов, необходимо учитывать мезомасштабные процессы и явления, в том числе конвективного характера.

В данной работе для проведения анализа использовались приземные карты погоды и карты барической топографии для высот 1,5 км - 850 гПа; 3,0 км - 700 гПа; 5,5 км - 500 гПа, предоставленные Московским центром единой системы авиаметеорологического обеспечения.

Помимо этого, были использованы наземные данные, полученные с помощью автоматической аэродромной метеорологической измерительной системы АМИС-РФ, установленных на аэродромах Москвы.

Данные о числе дней с турбулентностью, в районе аэродромов Москвы предоставленные Московским центром единой системы авиаметеорологического обеспечения за период с 2014 по 2023 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.3 – Число дней с турбулентностью в районе аэродромов Москвы за период 2014 – 2023гг

год	месяцы												сумма
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2014	1	-	7	7	11	1	2	1	2	-	3	3	38
2015	6	6	5	5	6	1	2	-	1	1	1	8	42
2016	2	-	15	6	6	-	-	1	2	5	3	8	48
2017	4	-	-	2	4	3	-	-	3	2	3	3	24
2018	3	-	3	-	1	1	1	-	-	-	2	12	23
2019	6	8	4	6	5	-	-	2	3	-	1	3	38
2020	1	-	4	6	3	-	-	-	-	5	1	-	20
2021	-	-	1	1	5	3	-	-	3	2	-	-	18
2022	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	1	1	7
2023	1	1	3	-	1	-	-	1	-	-	1	1	9
среднее	3	2	5	4	5	1	1	1	2	2	2	5	38
сумма	24	18	44	33	42	9	5	5	14	15	16	42	267

За период с 2014г по 2023г, годовое число дней с турбулентностью составило 267 дней, при этом максимальное число дней отмечалось в 2016 г и составило 48 дней.

Минимальное количество дней с турбулентностью за исследуемый период наблюдались в 2022 г и 2023 г и составило менее 10 дней (рисунок 3.2).

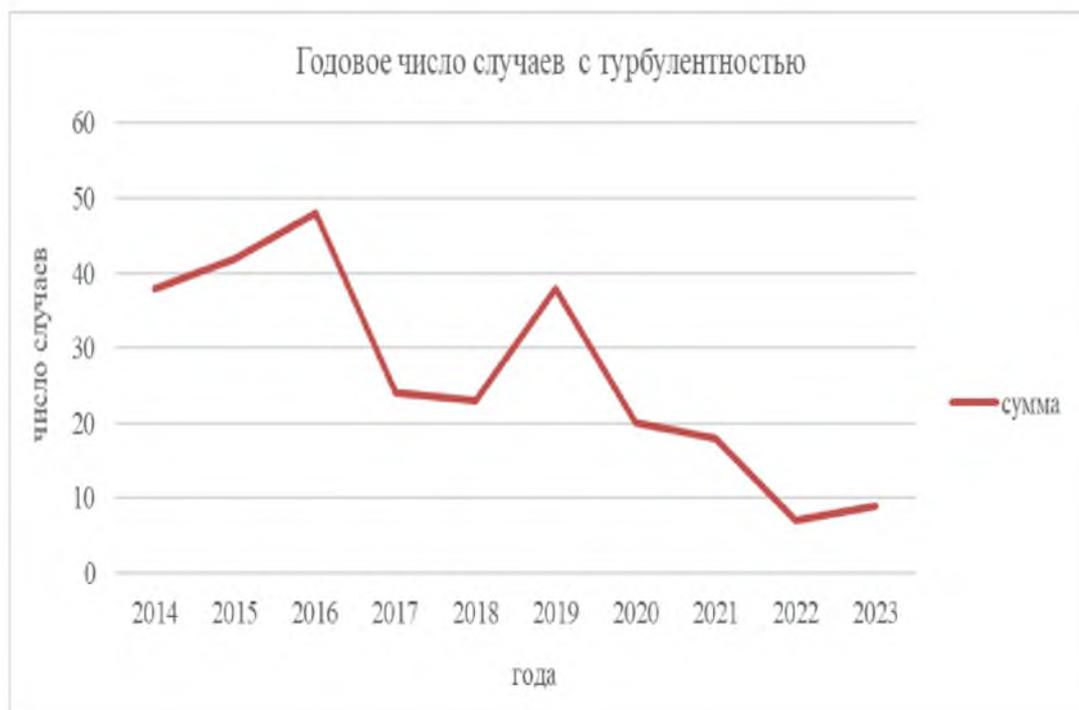


Рисунок 3.2 – Число случаев с турбулентностью в районе аэродромов Москвы период 2014 – 2023гг.

В годовой доле максимальное число дней с турбулентностью отмечается в весенний период с марта по май включительно и составляет 44 дня в марте, 33 в апреле и 42 дня в мае.

Увеличение активности турбулентности в весеннее время года связано с изменением барического поля и увеличением конвективных процессов. При этом, над центральными районами России в это время увеличивается меридиональный перенос.

Также увеличение числа дней с турбулентностью отмечается в зимние месяцы, в декабре и январе, что связано с высокими значениями температурных градиентов и градиентов скорости ветра и сдвигов ветра на высотах.

Минимальное число дней отмечается в летние месяцы с июня по август включительно и не составляет менее 10 дней (рисунок 3.3).

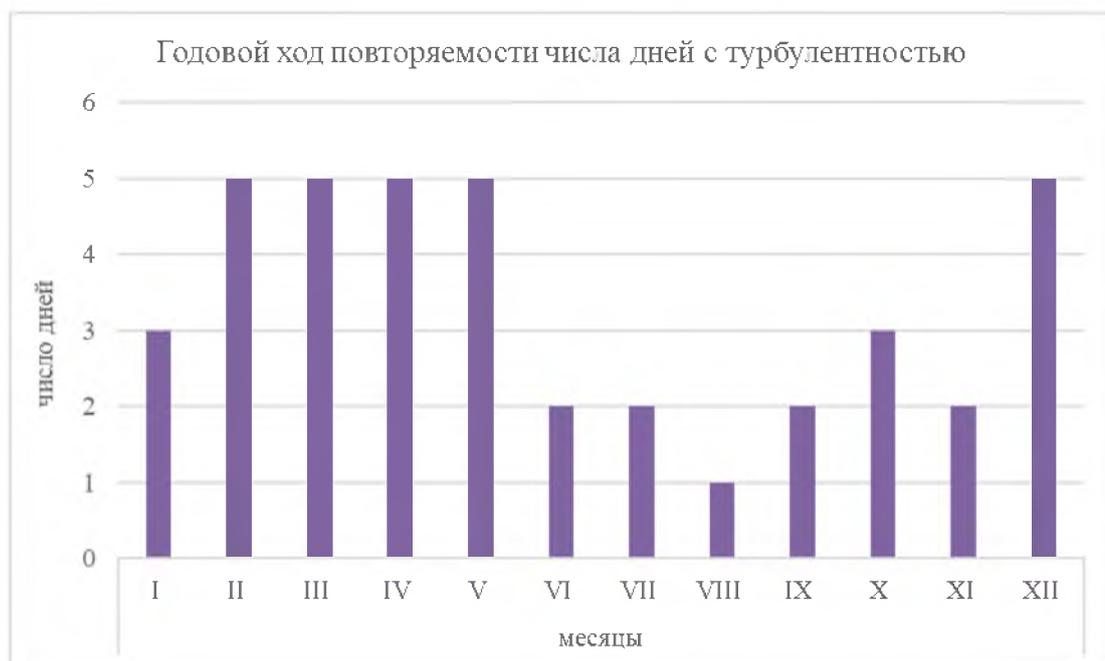


Рисунок 3.3 – Годовой ход числа дней с турбулентностью в районе аэродромов Москвы за период 2014 – 2023гг

Анализ повторяемости случаев турбулентности различной интенсивности за период с 2019 – 2023 гг. представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Повторяемость случаев турбулентности и болтанки воздушного судна различной интенсивности в период 2019-2023 гг, %

	месяцы												Всего случаев
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Слабая интенсивность (FBL)													
Повторяемость	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Умеренная интенсивность (MOD)													
Повторяемость	3	12	17	3	16	10	-	3	10	3	6	16	31
Сильная интенсивность (SEV)													
Повторяемость	-	-	-	-	50	-	-	-	-	50	-	-	2
Всего, %	3	12	18	3	18	9	-	3	9	6	6	15	34

Необходимо пояснить, что представленные в таблице 3.2 данные о

повторяемости турбулентности и случаев болтанки получены с бортов воздушных судов.

В случае встречи воздушного судна с турбулентностью и возникновением болтанки слабой интенсивности информация передается в наземный центр погоды по решению экипажа самолета, при этом, в связи с тем, что турбулентность такой интенсивности не относится к опасным явлениям погоды, информацию о ее возникновении практически не передают. Следовательно, представленные в таблице данные о турбулентности слабой интенсивности могут не соответствовать.

Проведенный анализ выявил, что за исследуемый период всего было отмечено 34 случая турбулентности различной интенсивности, при этом, число случаев турбулентности умеренной интенсивности составило 31 день, со слабой интенсивностью отмечен всего 1 случай (март) (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Число случаев с турбулентностью различной интенсивности по данным полученным с борта ВС за период 2019-2023 гг.

При этом, наибольшая повторяемость дней с умеренной турбулентностью наблюдалась в марте и мае и составило по 18% от всего числа случаев, в декабре - 15%.

Увеличение повторяемости случаев с турбулентностью объясняется большими градиентами температуры между слоем, примыкающим к земной поверхности и в атмосфере.

Турбулентность сильной интенсивности за три исследуемых года составила всего 2 случая, при этом, такая турбулентность отмечалась в мае и октябре, когда наблюдалась сильно развитая кучево-дождевая облачность с ливневыми осадками сильной интенсивности. Поэтому, можно сказать, что турбулентность сильной интенсивности возникает довольно редко.

В работе проведен анализ повторяемости турбулентности с учетом значений температуры воздуха у земной поверхности (таблица 3.5, рисунок 3.5).

Таблица 3.5 – Повторяемость случаев турбулентности в зависимости от температуры воздуха у земной поверхности за период 2019-2023 гг.

градация температуры, °С	от -10 до -5	от - 5 до 0	от 0 до 5	от 5 до 10	от 10 до 15	≥15
Число случаев	2	4	5	7	7	9
повторяемость	6	12	15	21	21	26

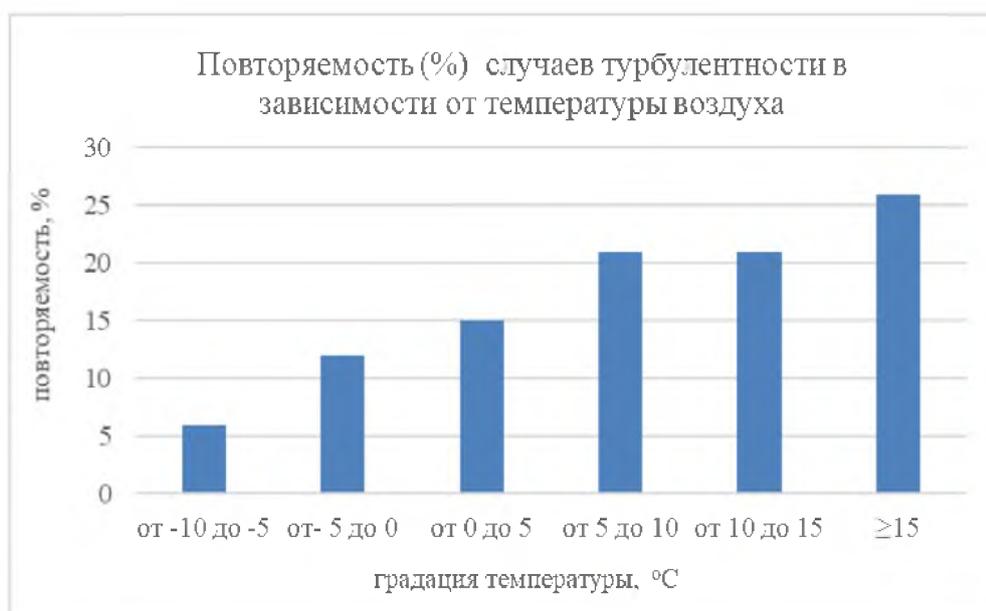


Рисунок 3.5 – Повторяемость случаев турбулентности в зависимости от температуры воздуха за период 2019 – 2023 гг, %

Проведенный анализ показал, что наибольшая повторяемость случаев турбулентности отмечалась при условиях, когда температура воздуха у земной поверхности находилась в пределах от - 3°C до +18°C.

Также в работе исследованы данные о повторяемости турбулентности в зависимости от вертикальной протяженности турбулентного слоя (таблица 3.6, рисунок 3.6).

Таблица 3.6 – Повторяемость случаев турбулентности в зависимости от толщины турбулентного слоя, за период 2019-2023 гг %

Толщина слоя, км	0 - 0,5	0,5 - 1	1 - 1,5	1,5 - 2	2 - 2,5	2,5 - 3	3 - 3,5	3,5 - 4	≥4
Число случаев	5	13	7	2	2	1	2	1	1
повторяемость	15	38	20	6	6	3	6	3	3



Рисунок 3.6 – Повторяемость случаев турбулентности в зависимости от толщины слоя за период 2019-2023 гг, %

Вертикальный анализ атмосферы показал, что наиболее часто турбулентность наблюдалась в толщине слоя от 0,5 до 1 км.

Минимальная повторяемость болтанки фиксируется выше толщины слоя 1,5 км. Максимальное значение высоты нижней границы слоя составило 4,8 км.

Также стоит отметить, что случаи с сильной болтанкой были

зафиксированы в толщине слоя не выше 500 метров.

В работе проведен анализ влияния кучевообразных облаков на развитие турбулентности. Данные представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Повторяемость (%) болтанки ВС в зависимости от формы облаков в период 2019 – 2023гг.

Кучевообразные	Нижний ярус	Средний ярус	Верхний ярус
65	28	6	1

Можно сделать вывод, что при турбулентности и сопровождающейся ей болтанке воздушного судна в районе аэродрома преимущественно развиты кучевообразные облака и составляют 65%, также они имеют наибольшую повторяемость болтанки ВС (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Повторяемость (%) случаев турбулентности в зависимости от формы облаков в период 2019 – 2023гг

Стоит отметить и то, что облака нижнего яруса также способствуют возникновению атмосферной турбулентности и составляют 28%.

Также было выявлено, что в 90% случаев в нижнем ярусе присутствуют слоистые облака, которые в свою очередь за счет своих физических свойств часто могут вызывать атмосферную турбулентность.

Барические образования в результате своих физических свойств, способствуют формированию вертикальных и горизонтальных движений воздуха, которые влекут за собой появление турбулентности в атмосфере.

В таблице 3.8 представлена повторяемость болтанки в зависимости от синоптической ситуации в районе аэродромов Москвы в период 2019 – 2023гг. Таблица 3.8 – Повторяемость (%) случаев турбулентности в зависимости от синоптической ситуации в период 2019 – 2023гг.

Циклон	Холодный фронт	Теплый фронт	Фронт окклюзии
24	46	24	7

Исследование показало, что максимальное число случаев с болтанкой фиксировалось именно с прохождением холодного фронта, что составляет 46% (12 случаев) (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Повторяемость (%) случаев турбулентности в зависимости от синоптической ситуации в период 2019 – 2023гг

Как правило, холодный фронт связан с кучево-дождевой облачностью, которая может повлечь за собой возникновение болтанки воздушного судна.

Наименьшая повторяемость случаев турбулентности связана с фронтами окклюзии – 7%. Зона фронта окклюзии может быть связана с атмосферной турбулентностью, которая проявляется в виде вихрей, турбулентных потоков и

других нестабильных явлений в атмосфере. Помимо этого, турбулентность может привести к образованию кучевых облаков и грозовых облаков в районах фронта окклюзии

В таблице 3.9 представлена оценка повторяемости случаев с турбулентностью в зависимости от суточного хода в период с 2019 – 2023 гг

Таблица 3.9 – Повторяемость случаев с турбулентностью в зависимости от суточного хода в период 2019-2023 гг, %

Время ВСВ	0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24
Число случаев	4	0	0	0	0	10	6	14
повторяемость	11	0	0	0	0	30	17	42

Оценивая суточный ход, стоит отметить, что болтанка ВС наиболее часто отмечается в первую половину дня (с 00 до 03ч ВСВ) и в ночное время суток – с 15 до 24ч ВСВ (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Повторяемость случаев турбулентности в суточном ходе по данным АМИС-РФ за 2019-2023 гг.

Наибольшая повторяемость фиксируется в период с 21ч до 24ч ВСВ (04:00 – 07:00 по местному времени), что составляет 42% от общего 34 числа

случаев. Повышенная повторяемость в утренние и ночные часы связана, главным образом, с графиком полетов ВС в данном районе.

Также в ходе исследования была выявлена максимальная продолжительность болтанки воздушного суда, которая составила 3ч 49 мин в период с 4:42 6 февраля до 8:31 местного времени 6 февраля 2021 г, данный случай сопровождался кучево-дождевыми облаками и соответствующими ей осадками, а именно слабым ливневым снегом и снежным поземком.

В таблице 3.10 представлено число дней с турбулентностью в зависимости от значений индекса неустойчивости BRN по аэрологическим данным на станциях Долгопрудный и Сухиничи в период с 2019 по 2023 гг.

Стоит отметить, что аэрологические станции выбраны неслучайно, а за счет того, что данные станции расположены не превышающие 250 км от аэродромов Москвы, т.е. являются близлежащими к нему.

Таблица 3.10 – Число случаев с турбулентностью в зависимости от значений индекса BRN за период 2019-2023 гг.

Аэрологическая станция	$BRN \leq 0$	$BRN > 0$	$BRN > 0,25$	Σ , число дней
Долгопрудный	8	8	18	34
Сухиничи	6	7	21	34

За весь период было рассмотрено по 34 случая на обеих станциях. Исследование показало, чем больше значение индекса BRN, тем больше неустойчивость атмосферы и соответственно интенсивность атмосферной турбулентности.

В результате было выявлено, что наибольшее число случаев с высоким значением индекса BRN отмечается на станции Колпашево – 21 день.

На станции Долгопрудный зафиксировано 18 случаев с высоким коэффициентом индекса.

Большие значения индекса BRN говорят о неустойчивости атмосферы, вследствие чего развивается конвекция и вертикальные перемещения воздуха,

которые играют огромную роль в образовании атмосферной турбулентности (рисунок 3.10).

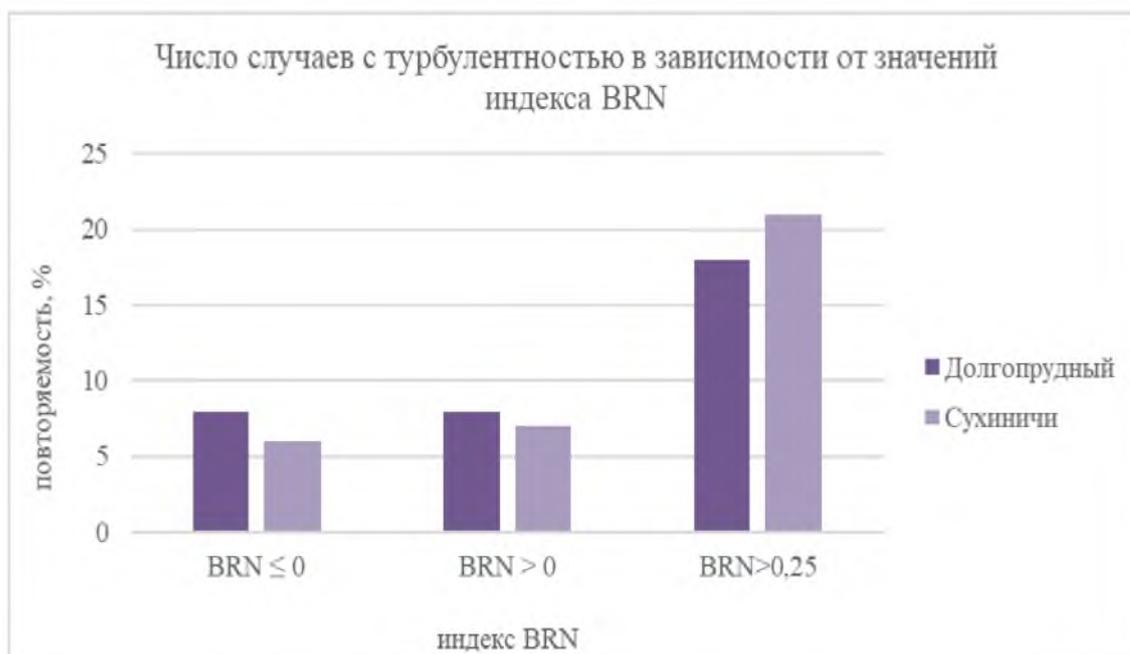


Рисунок 3.10 – Число случаев с турбулентностью в зависимости от значений индекса BRN за 2019-2023 гг.

Также стоит отметить, что при сильной интенсивности болтанки ВС, индекс BRN на станции Сухиничи составил 0,96, а на станции Долгопрудный – 0,55.

В случае, когда индекс неустойчивости не превышает критического значения 0,25, можно говорить о том, что в образовании атмосферной турбулентности участвуют горизонтальный градиент скорости ветра и вертикальный градиент температуры. Было зафиксировано 8 случаев на станции Долгопрудный и 7 случаев на станции Сухиничи, когда индекс BRN не превышал значения 0,25.

Также отмечались случаи, где индекс равен нулю, что говорит о том, что в тропосфере может наблюдаться слой инверсии, где вертикальные движения ослаблены, в результате этого атмосферная турбулентность может быть подавлена или сильно ограничена.

На рисунке 3.11 представлена повторяемость случаев с атмосферной

турбулентностью в зависимости от значений индекса неустойчивости BRN в период 2019 – 2023гг.

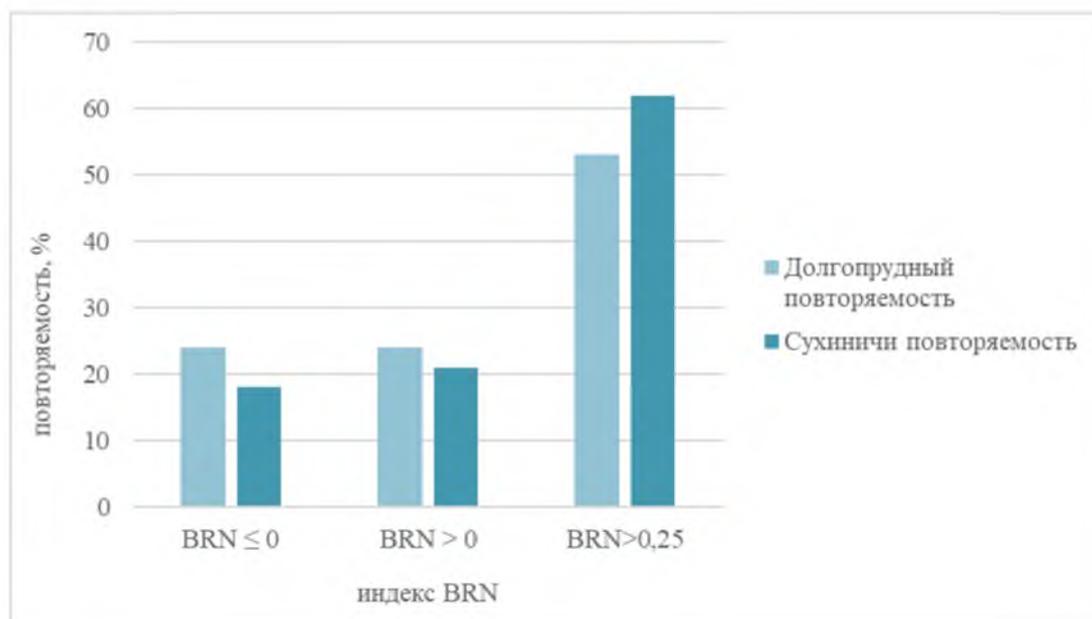


Рисунок 3.11 – Повторяемость (%) случаев с атмосферной турбулентностью в зависимости от значений индекса неустойчивости BRN в период 2019 – 2021гг

За рассмотренный период повторяемость значений, превышающих критические, отмечалась на станции Сухиничи, что составило 62%, на станции Долгопрудный – 53%. Стоит отметить, что при рассмотрении числа дней, также наибольшие значения были зафиксированы на станции Сухиничи.

Повторяемость индекса со значениями равных или приближенных к нулю на станции Долгопрудный составляет 24%, на станции Сухиничи – 18%.

Заключение

Для возникновения процесса турбулентности одним из основных условий является неустойчивость воздушных потоков, возникающая в результате наличия температурных различий на подстилающей поверхности и развития облаков конвективного происхождения. Для развития турбулентности благоприятным является наличие на подстилающей поверхности различных неоднородностей.

В зависимости от факторов, обуславливающих ее возникновение, турбулентность подразделяется на: механическую, термическую, связанную с кучево-дождевыми облаками, в ясном небе и орографическую турбулентность.

Основными показателями, которые включают в прогноз о возможном возникновении турбулентности являются следующие: пространственное положение турбулентных зон вдоль трассы полета и на аэродроме и ожидаемая интенсивность возможной болтанки.

На основании проделанной работы сделаны следующие выводы:

1. По данным, предоставленным Московским РППИ за исследуемый период с 2014г по 2023г турбулентность наблюдалась в течение 267 дней,

2. Максимальное количество дней с турбулентностью наблюдалось в 2016 году и составило 48 дней.

3. Атмосферная турбулентность наиболее выражена в холодный период года и в переходной сезон, а именно весной. Максимальное количество дней с болтанкой наблюдалось в марте – 44 дней (16%), а также в декабре – 42 -30 дней, что также соответствует 16% в среднем за 10 лет.

4. Наибольшее количество дней с умеренной болтанкой наблюдалась в марте и мае (18%), а также в декабре (15%), что обусловлено большими различиями в температуре между поверхностью земли и верхними слоями атмосферы в это время года.

5. Максимальное число дней было зафиксировано при возникновении атмосферной турбулентности с умеренной интенсивностью – 31 дней.

6. Атмосферная турбулентность с умеренной интенсивностью является редким явлением, и составляет около 2% всех случаев.

7. Оценивая суточный ход, стоит отметить, что болтанка ВС наиболее часто отмечается в первую половину дня (с 00 до 03ч ВСВ) и в ночное время суток – с 15 до 24ч ВСВ.

8. Наибольшая повторяемость фиксируется в период с 21ч до 24ч ВСВ (04:00 –07:00 по местному времени), что составляет 41% от общего 32 числа случаев. Максимальная продолжительность болтанки воздушного судна, составила 3ч 49 минут в период с 4:42 6 февраля до 8:31 местного времени 6 февраля 2021 года.

9. При анализе влияния на возникновение турбулентности толщины турбулентного слоя выявлено, что наиболее часто болтанка наблюдалась в толщине от 0,5 до 1 км.

10. Минимальная повторяемость болтанки фиксируется выше толщины слоя 1,5 км. Максимальное значение высоты нижней границы слоя составило 4,8 км.

11. Случаи с сильной болтанкой были зафиксированы в толщине слоя не выше 500 м.

12. Выявлено, что при турбулентности и сопровождающейся ей болтанке воздушного судна в районе аэродрома преимущественно развиты кучевообразные облака (65%), также они имеют наибольшую повторяемость болтанки ВС.

13. Анализ повторяемости болтанки в зависимости от синоптической ситуации в районе аэродрома показал, что в 46% случаев с болтанкой связано с прохождением холодного фронта.

14. Исследование показало, чем больше значение индекса BRN, тем больше неустойчивость атмосферы и соответственно интенсивность атмосферной турбулентности

Список использованной литературы

1. Авиаметтелеком Росгидромета [Электронный ресурс]: Климатическое описание аэродромов URL: <http://zsf.aviamettelecom.ru> (дата обращения 09.11.24).
2. Баранов, А.М., Солонин, С.В. Авиационная метеорология – Л.: Гидрометиздат, 1981. – 262с.
3. Богаткин, О. Г. Авиационная метеорология / Богаткин О. Г. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2005. – 327 с.
4. Блохина, В.И Авиационные прогнозы погоды / Блохина В.И. – Владивосток Изд. ДВУ, 2000. – 67 с.
5. Бызова, Н.Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы / Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е.К. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 262с.
6. Винниченко, Н.К. Турбулентность в свободной атмосфере / Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шмистер С.М., Шур Г.Н. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 287 с.
7. Воробьев, В.И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616с.
8. Дроздов, О.А. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 493 с.
9. Зилитинкевич, С.С. Атмосферная турбулентность и пограничные слои. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.
10. Зубашенко, Е.М. Климаты Земли. Ч.1. – М.: Изд. МГУ, 2007. – 183 с.
11. Инструктивный материал по специальным сообщениям AIREP. – М: 2017. – 9 с.
12. Лещенко, Г.П. Метеорологическое обеспечение полетов / Лещенко Г.П., Перцель Г. В., Лещенко Е. Г. – Кировград: Изд. ГЛАУ, 2010. – 184 с.
13. Локащенко, М.В. Динамика термической турбулентности в нижней атмосфере Москвы по данным лидарного зондирования. //Метеорология и гидрология// 2003г, №12, С. 35-46.
14. Матвеев, Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Матвеев

- Л.Т. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 752с.
15. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – 380 с.
 16. Метеорология и климатология: Учеб. пособие / Г.И. Пиловец. – М.: НИЦ Нов. знание, 2013. –399 с.
 17. Пинус, Н.З., Шметер, С.М. Атмосферная турбулентность, вызывающая болтанку самолетов / Пинус Н.З., Шметер С.М. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 166 с.
 18. Переведенцев, Ю.П. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Ю.П. Переведенцев, И.И. Мохов, А.В. Елисеев и др.; науч. ред. Э.П. Наумов. – Казань: Изд. Казан. ун-т, 2013. – 224 с.
 19. Позднякова, В.А. Практическая авиационная метеорология. Учебное пособие для летного и диспетчерского состава ГА. – Е.: Изд. Уральский УТЦ ГА, 2010. – 113 с.
 20. Пчелко, И. Г. Аэросиноптические условия болтанки самолетов в верхних слоях тропосферы и нижней стратосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 94 с.
 21. Сафонова, Т.В. Авиационная метеорология / Сафонова Т.В. – Ульяновск: Изд. УВАУ ГА, 2005. – 215 с.
 22. Солонин, С.В., Богаткин, О.Г., Метеорологические условия болтанки самолетов в атмосфере и условия ее прогноза. Труды ЛГМИ, 1968г. вып.34. С. 71-83.
 23. Турбулентность в свободной атмосфере / Отв.ред Л.С. Гандин. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 336 с.
 24. Шакина, Н.П. Механизмы образования орографической турбулентности и ее прогнозирования / Шакина Н.П.// Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – №1. – С.25-47.
 25. Шметер, С.М., Постнов, А.А., Безрукова, Н.А. Влияние мезометеорологических процессов в нижней тропосфере на условия полетов воздушных судов на малых и средних высотах. – Л.: Гидрометиздат, 1988г. –52 с.