



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

Кафедра метеорологических прогнозов
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Типовые синоптические ситуации для прогноза турбулентности ясного неба»

Исполнитель Голубева Мария Андреевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

28 мая 2023г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Сокращения.....	3
Введение.....	4
1.ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ЯСНОГО НЕБА (ТЯН).....	6
1.1 Атмосферная турбулентность.....	6
1.2 Классификация турбулентности по шкале ICAO.....	12
1.3 Влияние турбулентности на полет воздушного судна.....	13
1.4 Турбулентность ясного неба.....	16
2. ПРОГНОЗ ТЯН.....	21
Методы прогноза ТЯН.....	21
2.1 Синоптический метод.....	22
2.2 Физико-статистический метод.....	28
2.3 Метод прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе.....	34
3. РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗА ТЯН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭТАЛОНОВ.....	41
3.1 Исходные данные.....	41
3.2 Методология.....	45
3.3 Выбор эталонных полей.....	47
Заключение.....	51
Список литературы.....	53

Сокращения

ТЯН - турбулентность ясного неба

ВС - воздушное судно

ИКАО – международная организация гражданской авиации

UTC – coordinated universal time (всемирное координированное время)

ЧПП-численный прогноз погоды

Введение

Турбулентность ясного неба - это неустойчивые перемещения воздуха в атмосфере без облачности, которые могут приводить к резким изменениям скорости и направления ветра, давления и температуры. Турбулентность ясного неба может возникать в различных метеорологических условиях, таких как высокое атмосферное давление, солнечная радиация, наличие горных хребтов и т.д.

Турбулентность ясного неба является одним из наиболее опасных факторов, влияющих на безопасность авиаперевозок. Она может приводить к неожиданным изменениям скорости и направления ветра, что оказывает негативное влияние на управление воздушным судном. Кроме того, турбулентность ясного неба может приводить к повреждению воздушных судов, если скорость воздушного потока превысит допустимые значения.

Одним из примеров катастроф, связанных с турбулентностью ясного неба, является катастрофа рейса United Airlines 826, произошедшая в 1960 году. Этот рейс, выполнявший маршрут между Нью-Йорком и Сан-Франциско, столкнулся с сильной турбулентностью над штатом Невада, что привело к потере контроля над самолетом. В результате катастрофы погибли 47 человек, включая пассажиров и членов экипажа. Причиной катастрофы стали сильные вертикальные вихри, образующиеся на границе между холодным и теплым воздухом, которые вызывали резкие изменения скорости и направления ветра, создавая опасные условия для полета. Этот инцидент также подчеркивает значимость прогнозирования турбулентности ясного неба. В работе будет описано, какие методы используются для прогнозирования турбулентности ясного неба, какие данные необходимы для этого и какие сложности могут возникать при прогнозировании. Важным аспектом также является описание метеорологических условий, при которых возникает турбулентность ясного неба, и методов их анализа.

Целью данной работы является проверка возможности использования метода объективного отбора типовых полей геопотенциала на высоте АТ-300

гПа для прогноза турбулентности ясного неба (ТЯН). Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить способы идентификации ТЯН на основе современных продуктов, включающих результаты гидродинамического моделирования и спутниковую информацию
2. Выбрать наиболее вероятные регионы для возникновения ТЯН
3. Собрать архив случаев ТЯН для данного региона.
4. Выявить связь между полями геопотенциала на уровне АТ-300 гПа и ТЯН с помощью метода эталонов на основе обучающей выборки
5. Проверить объективность отбора на контрольной выборке

Работа состоит из трех глав. Первая глава посвящена основной информации о ТЯН, включая физическую природу и особенности данного явления. Вторая глава описывает методы прогнозирования ТЯН. Третья глава содержит данные о наличии ТЯН, результаты прогнозов, основанных на методах Гидрометцентра РФ, а также описание проведенных экспериментов. В заключении данной работы описывается проделанная работа и формулируются выводы.

1.ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ЯСНОГО НЕБА (ТЯН)

1.1 Атмосферная турбулентность

Атмосферная турбулентность - это неупорядоченное движение воздуха в атмосфере, которое проявляется в виде колебаний скорости и давления, неоднородности концентрации и температуры воздуха, вихревых движений и других процессов. Физические процессы, лежащие в основе атмосферной турбулентности, связаны с нелинейными взаимодействиями между воздушными массами разной плотности и температуры, а также между воздухом и поверхностью Земли. Такие изменения в потоке воздуха могут приводить к непредсказуемым изменениям скорости и направления ветра, создавать резкие перепады давления и вызывать сильные вибрации и тряску для летательных аппаратов.

Причиной атмосферной турбулентности могут быть различные факторы, такие как неровности рельефа, солнечное излучение, ветер, атмосферные фронты, термические и конвективные процессы и другие. Например, при взлете или посадке самолета воздух, пропеллеры и крылья создают турбулентность в воздушном потоке, которая может повлиять на стабильность полета. Она может возникать как вблизи земной поверхности, так и в высоких слоях атмосферы, и может быть вызвана различными причинами, включая солнечное излучение, термические эффекты, географические особенности, изменения скорости и направления ветра и т.д.

Атмосферная турбулентность является сложным и многомерным явлением, которое трудно предсказывать и моделировать. Однако, различные методы измерения и анализа, такие как лазерная доплеровская velocиметрия, акустические технологии и другие, позволяют более точно определять и оценивать турбулентность в атмосфере. Лазерная доплеровская velocиметрия (ЛДВ) - это метод измерения скорости движущихся объектов с использованием принципа Доплера. Он основан на явлении изменения частоты света при отражении от движущегося объекта. ЛДВ использует лазерный луч, который направляется на объект, и отраженный от него свет анализируется для

определения скорости движения объекта. В метеорологии лазерная доплеровская velocиметрия (ЛДВ) используется для измерения скорости и направления движения атмосферных объектов, таких как воздушные потоки, облака и аэрозоли. Этот метод предоставляет информацию о движении воздушных масс и турбулентности в атмосфере. С помощью ЛДВ можно измерять горизонтальные и вертикальные составляющие скорости ветра, что позволяет получить данные о скорости и направлении движения воздушных потоков на разных высотах. Это имеет важное значение для авиации, так как позволяет прогнозировать возможные турбулентные зоны и предупреждать экипажи об опасности.

Осборн Рейнольдс был первым, кто заметил, что при увеличении скорости движения потока воздуха или воды появляются хаотические образования в виде волн и вихрей. Это явление было установлено им и получило название турбулентности.

Главное различие между ламинарным и турбулентным движениями заключается в том, что в турбулентном движении значения различных физических величин являются не постоянными. Например, скорость потока, наличие неоднородностей и вихрей, которые в свою очередь, приводят к перемешиванию. Существует безразмерный параметр, называемый числом Рейнольдса, который используется для описания турбулентных потоков.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1.1)$$

Где L -характерный размер потока вязкой жидкости, U - характерная скорость течения, ν -кинематическая вязкость жидкости.

Когда значение числа Рейнольдса превышает определенный критический порог, обозначаемый как $Re_{кр}$, то движение среды, которое ранее было ламинарным, переходит в состояние турбулентности. По результатам экспериментов было установлено, что ламинарное движение переходит в

турбулентное при числе Рейнольдса (Re) равном 2500- 5000. Число Рейнольдса для атмосферы определить достаточно сложно, так как трудно определить масштаб потока в целом. [1] Число Рейнольдса учитывает только динамический фактор формирования турбулентности.

Турбулизация воздушных течений чаще всего возникает из-за контрастов температуры, скорости и направления ветра. Они в свою очередь образуются благодаря следующим факторам, а именно:

- Трение воздушных потоков о землю и, как следствие, формирование ветра с большими градиентами скорости;
- Неравномерный прогрев подстилающей поверхности земли, следовательно, формирование термической конвекции;
- Процессы облакообразования, при которых происходит выделение тепла конденсации и кристаллизации;
- Взаимодействие воздушных масс с различными характеристиками вблизи атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон;
- Потеря устойчивости волнами, которые образовались в слоях инверсии, на тропопаузе и вблизи иных атмосферных поверхностей раздела;
- Изменение воздушных течений горными препятствиями и возникновение волновых возмущений роторных движений на их подветренной стороне. [1]

Множество процессов могут действовать совместно, взаимодействуя друг с другом и влияя на интенсивность турбулентности. Л.Ф. Ричардсон исследовал проблему возникновения турбулентности, учитывая не только динамические, но и термические факторы.

Число Ричардсона:

$$Ri = \frac{g(\gamma\alpha - \gamma)}{T\left(\frac{du}{dz}\right)} \quad (1.2)$$

Где γ_a – адиабатический вертикальный градиент температуры; γ – действительный вертикальный градиент температуры; $\frac{du}{dz}$ – вертикальный градиент средней скорости ветра; g – ускорение силы тяжести; T – температура
Динамическое число Ричардсона:

$$Rf = \alpha \frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T \left(\frac{du}{dz}\right)^2} \quad (1.3)$$

где

$$\alpha = \frac{K_T}{K} \quad (1.4)$$

где K – коэффициент турбулентного обмена количества движения; K_T – коэффициент турбулентного обмена.

Динамическое число Ричардсона (Rf) характеризует вклад термической конвекции в создание турбулентной энергии, а число Ri показывает соотношение между архимедовыми силами и силами инерции. Стационарное турбулентное движение возможно только при $Rf=1$, а при учете диссипации энергии турбулентности - при $Rf < 1$.

Воздействие сил Архимеда на турбулентность зависит от вертикального градиента потенциальной температуры. В условиях устойчивой стратификации, когда вертикальный градиент потенциальной температуры положительный, сила Архимеда препятствует развитию турбулентности, а в неустойчивых условиях, когда вертикальный градиент потенциальной температуры отрицателен, силы Архимеда способствуют появлению и развитию конвективных движений. В облаках и на малых высотах в безоблачной тропосфере термическая неустойчивость играет существенную роль. Сдвиг ветра способствует образованию турбулентности в средних и верхних слоях тропосферы, вне облаков. В безразличной термической стратификации вертикальный градиент

потенциальной температуры близок к нулю, поэтому силы Архимеда не оказывают влияния на возникновение турбулентных движений. В безоблачные дни, при сильном повышении температуры подстилающей поверхности, наблюдаются сверхадиабатические градиенты температуры от поверхности до 500-1000 м, и такие градиенты могут наблюдаться на больших высотах, но только в тонких слоях толщиной несколько десятков или сотен метров.

В атмосфере с вертикальным градиентом температуры, турбулентность может возникнуть, если значение динамического числа Ричардсона меньше критического значения $Ri_{кр}$. Критическое значение определяет условия затухания или развития турбулентных движений в неоднородной термической атмосфере. Если неравенство $Ri < Ri_{кр}$ выполняется, то турбулентность развивается, и чем меньше значение числа Ричардсона, тем больше турбулентной энергии может накопиться в данных условиях. [1]

В атмосфере наблюдаются турбулентные вихри во всех ее слоях, и для их классификации используют параметр, называемый "особенность развития". Этот параметр позволяет разделить турбулентность на три типа: орографическую, термическую и динамическую.

1. Орографическая турбулентность, также известная как механическая турбулентность, возникает из-за неровностей земной поверхности. Когда поток воздуха движется над гористой местностью, неровности поверхности вызывают возмущения в потоке, которые могут приводить к образованию восходящих и нисходящих вертикальных движений в атмосфере.

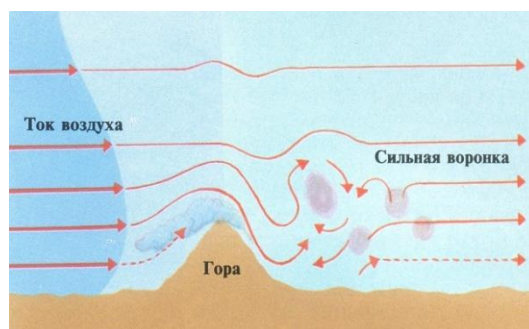


Рисунок 1.1 – орографическая турбулентность

2. Термическая турбулентность, также известная как конвективная турбулентность, возникает из-за неравномерного нагрева подстилающей поверхности или при переносе холодного воздуха на теплую подстилающую поверхность. При этом возникают горизонтальные различия в температуре, которые могут вызвать восходящие течения воздуха и образование вихрей.

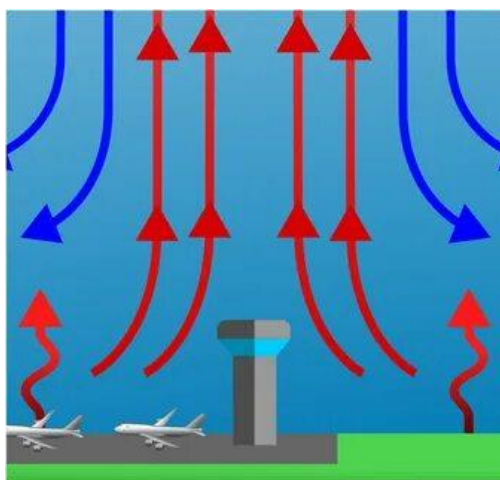


Рисунок 1.2 – термическая турбулентность

3. Динамическая турбулентность возникает в слоях атмосферы, где есть значительные вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра и температуры. В таких условиях могут образовываться гравитационные и гравитационно-сдвиговые волны, которые могут терять устойчивость и переходить в турбулентные вихри более мелкого масштаба. Эта турбулентность часто связана с явлениями, такими как турбулентность вблизи фронтов или в области вихрей.

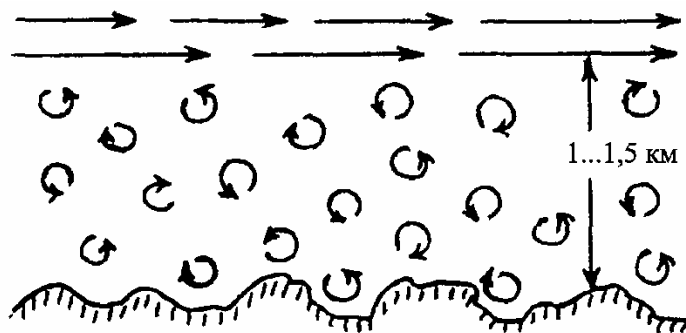


Рисунок 1.3 – динамическая турбулентность

1.2 Классификация турбулентности по шкале ICAO

Классификация турбулентности ICAO (Международная организация гражданской авиации) представляет собой шкалу, основанную на трех категориях интенсивности турбулентности, которые описывают уровень опасности для воздушного транспорта. Каждая категория имеет определенный диапазон значений скорости вертикального движения, которые оцениваются пилотами и специалистами метеорологических служб.

Первая категория - слабая турбулентность (Light Turbulence), характеризуется вертикальными колебаниями, которые могут ощущаться пассажирами, но обычно не приводят к неприятным ощущениям или опасности для полета. Скорость вертикального движения в этой категории не превышает 1,5 м/с.

Вторая категория - умеренная турбулентность (Moderate Turbulence), может вызывать значительные вертикальные колебания, которые могут привести к потере равновесия пассажиров и экипажа. Полет может быть несколько неустойчивым, но это не приводит к риску для безопасности. Скорость вертикального движения в этой категории составляет от 1,5 до 3 м/с.

Третья категория - сильная турбулентность (Severe Turbulence), может вызывать сильные вертикальные колебания, которые могут привести к потере контроля над самолетом. Полет становится небезопасным, и пассажиры и

экипаж должны быть пристегнуты к своим местам. Скорость вертикального движения в этой категории составляет от 3 до 6 м/с.

Также существует классификация по природе происхождения турбулентности. Классификация турбулентности ИКАО (Международная организация гражданской авиации) основывается на шкале интенсивности турбулентности и различных категориях, которые описывают ее характеристики. Данная классификация турбулентности ИКАО включает шесть категорий:

1. CAT (Clear Air Turbulence) - турбулентность ясного неба, которая обычно не видна и не обнаруживается на радарх. Она может возникать из-за различий в скорости ветра на разных высотах или изменений температуры воздуха.
2. CAT-e (CAT with embedded cumulonimbus) - турбулентность, связанная с грозовыми облаками.
3. TROPO (Turbulence in the vicinity of thunderstorms) - турбулентность, которая возникает вблизи грозовых облаков.
4. MTW (Mountain Wave Turbulence) - турбулентность, вызванная горными волнами, которые возникают в результате протекания воздушных масс через горные хребты.
5. LLWS (Low-Level Wind Shear) - турбулентность, связанная с резким изменением скорости и направления ветра в нижних слоях атмосферы.
6. ICE (Icing) - турбулентность, вызванная образованием ледяного наледи на поверхности воздушного судна.

Каждая категория имеет свой диапазон интенсивности турбулентности и соответствующие рекомендации для пилотов. Эта классификация помогает пилотам принимать решения о безопасности полета и выбирать наиболее подходящие маршруты и высоты полета.

1.3 Влияние турбулентности на полет воздушного судна

Турбулентность является одним из наиболее серьезных факторов, влияющих на безопасность полетов воздушных судов. Турбулентность может возникать в различных метеорологических условиях и вызывать резкие изменения направления и скорости ветра, температуры и давления на различных высотах.

Турбулентность может быть причиной ряда нежелательных явлений в полете, таких как:

- Изменение курса и высоты полета: Турбулентные потоки могут вызывать резкие изменения курса и высоты полета, что может привести к потере управления над самолетом.
- Повреждение структуры самолета: Турбулентные потоки могут вызвать повреждения крыльев, хвостовых поверхностей и других частей самолета, что может привести к потере управления или к аварии.
- Повышенная утомляемость пилотов: Турбулентность может вызвать повышенное утомление пилотов, что может снизить их реакцию и увеличить вероятность ошибки в управлении самолетом.

Измерение турбулентности на воздушных судах выполняется путем измерения болтанки - величины, которая отражает приращение перегрузки на борту самолета из-за турбулентных движений воздуха. Важно отметить, что для самолета релевантны только те турбулентные пульсации, масштаб которых соизмерим с его размерами, поскольку слишком мелкомасштабные и длиннопериодические пульсации не оказывают влияния на полет. При оценке интенсивности турбулентности необходимо учитывать именно ту часть спектра, которая оказывает влияние на полет. Измерение самой турбулентности является сложной задачей, поэтому ее влияние оценивается через изменение болтанки.

Перегрузка (n) – это отношение подъемной силы в данный момент времени (Y) к подъемной силе горизонтального полета (Y_0).

Подъемная сила возникает на крыле в результате разности давлений на верхней и нижней его поверхностях и направлена перпендикулярно крылу вверх. При полете в горизонтальной плоскости подъемная сила должна быть равна силе

тяжести, иначе самолет начнет изменять свою высоту. Поэтому подъемная сила и сила тяжести взаимно компенсируют друг друга, и перегрузка в горизонтальном полете равна единице ($n=1$). Если подъемная сила становится больше силы тяжести, то перегрузка становится больше единицы (например, при полете вверх или при маневре), а если подъемная сила становится меньше силы тяжести, то перегрузка становится меньше единицы (например, при пике). Поэтому перегрузка характеризует силовое воздействие на самолет и является одним из основных показателей турбулентности. Она измеряется в единицах ускорения свободного падения (g), например, $1g$, $2g$, $3g$ и т.д.

$$n = \frac{Y}{Y_0} \quad (1.5)$$

Масса самолета (G) равна подъемной силе в горизонтальном полете. Значение любой мгновенной величины равно: $Y = Y_0 + \Delta Y$. Таким образом, формулу 1.6 можно представить в виде:

$$n = Y/G = (Y_0 + \Delta Y)/G = 1 + \Delta Y/G \quad (1.6)$$

Во время горизонтального полета значение перегрузки равно единице, поэтому для расчетов используется не само значение перегрузки, а ее изменение (приращение) в относительных единицах, которое обозначается символом Δn .

$$\Delta n = n - 1 \quad (1.7)$$

Первый уровень турбулентности - слабая болтанка, характеризуется перегрузками и их приращениями в диапазоне от 0,8 до 1,2 с возможным изменением до $\pm 0,2 g$. При таком уровне турбулентности самолет может продолжать полет на автопилоте, но ощущается легкое воздействие болтанки.

На следующем уровне, который называется умеренная болтанка, перегрузки и их приращения изменяются от 0,5 до 1,5 с возможным изменением до $\pm 0,5$. На этом уровне возможно использование автопилота, но воздушное судно испытывает сильные пульсации, изменения высоты и покачивания, что затрудняет перемещение в салоне. Колебания стрелок приборов становятся заметными.

Сильная болтанка характеризуется перегрузками и приращениями в долях g в диапазоне от 0 до 2.0 и ± 1.0 соответственно. При сильной болтанке возможны опасные ситуации и непредсказуемые воздействия на воздушное судно, поэтому полет осуществляется только в ручном режиме с использованием специальных инструкций. В таких условиях ВС испытывает сильные колебания и резкие повороты, которые сопровождаются ощущением невесомости или прижатия к креслу. Нарушение правил полета может привести к критическим последствиям.

Турбулентность часто возникает в потоках, обусловленных струйным течением и воздушными течениями, находящимися вблизи границы между тропосферой и стратосферой, которую называют тропопаузой. В этих областях можно часто встретить так называемые ТЯН. Турбулентные зоны имеют горизонтальные размеры, значительно превосходящие вертикальные, что означает, что вероятность попадания в такие зоны при горизонтальном полете ниже, чем при вертикальном. Кроме того, чем меньше широта, тем больше размеры турбулентных зон. В авиации принято говорить о «встречаемости болтанки», которая представляет собой расстояние, которое должен пройти самолет до попадания в турбулентную зону.

1.4 Турбулентность ясного неба

Турбулентность ясного неба (англ. Clear air turbulence, CAT) - это неожиданные и быстро изменяющиеся турбулентные движения в верхних слоях атмосферы, которые возникают в отсутствие видимых облачных образований.

Они могут возникать как в рамках слабой турбулентности вокруг гор и других неровностей рельефа, так и в рамках сильной турбулентности в верхних слоях атмосферы, связанной с динамическими процессами.

Основной причиной возникновения турбулентности являются градиенты скорости и температуры в атмосфере. Верхние слои атмосферы обладают различными характеристиками воздуха, такими как плотность, температура, влажность и скорость ветра. Эти характеристики неоднородны и быстро меняются с высотой, что может приводить к образованию градиентов. Градиенты скорости и температуры могут вызывать сдвиги воздушных масс, а это, в свою очередь, может приводить к образованию вихрей и других форм турбулентности. Турбулентность ясного неба также может возникать при пересечении воздушных потоков разной температуры, например, при прохождении фронта холодного воздуха через область с теплым воздухом. В этом случае разница в температуре вызывает перемешивание воздуха и возникновение турбулентности.

Турбулентность ясного неба может быть очень опасной для воздушных судов, так как она не видна невооруженным глазом и не может быть заранее обнаружена с помощью радаров или других инструментов. В результате, пассажиры и члены экипажа могут получить серьезные травмы во время полета, если они не пристегнуты ремнями безопасности в момент возникновения турбулентности.

Для предотвращения опасных ситуаций во время полетов, авиакомпании и метеорологические службы используют различные методы для прогнозирования турбулентности ясного неба и предупреждения экипажа и пассажиров о возможных опасных условиях. Эти методы включают в себя наземное и спутниковое наблюдение за погодой, использование атмосферных моделей для прогнозирования изменений воздушного потока, и использование информации от других самолетов о возникновении турбулентности.

Существует несколько механизмов гидродинамической неустойчивости, которые могут порождать турбулентность ясного неба (ТЯН):

- Гидродинамическая неустойчивость основного потока:

Этот механизм возникает в границе между двумя слоями воздуха с различными скоростями потока. Если условия подходят, то разность скоростей может приводить к возникновению вертикальных вихрей, которые затем могут эволюционировать в турбулентные структуры.

Теоретически определено, что критическое значение числа Ричардсона Ri равно $1/4$. Если Ri меньше $1/4$, то происходит быстрый рост амплитуд малых возмущений и весь слой начинает турбулизироваться. Размеры турбулентных слоев, образованных таким образом, достигают 100 км и более по горизонтали и 1-1.5 км по вертикали. Такие слои могут продолжительное время существовать в зависимости от эволюции основного потока. Несколько самолетов могут испытывать потрясения при прохождении через такую турбулентную зону.

- Вторичная неустойчивость или неустойчивость внутренних волн в устойчивом потоке, при $Ri > 1/4$:

Второй механизм развития турбулентности является связанным с неустойчивостью внутренних гравитационных волн в устойчивом потоке. Гравитационные волны возникают в результате вертикальной неоднородности стратификации атмосферы, когда взаимодействие гравитационных сил и плотности создают вертикальное изменение плотности. При определенных условиях гравитационные волны начинают расти по амплитуде, и на их гребнях волн возникают зоны неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, при которых числа Ричардсона (Ri) понижаются ниже критического значения. В результате развивается турбулентность. Источниками гравитационных волн являются неровности подстилающей поверхности, ее термические неоднородности, фронты и циклоны, грозовые очаги, струйные течения и другие факторы. Амплитуда, при которой на гребне волны появляется неустойчивость, называется критической. Вторичная неустойчивость приводит к образованию

маленьких турбулентных пятен, которые существуют недолго и находятся внутри практически ламинарного потока, перемещаясь вместе с потоком.

- Неустойчивость критического уровня:

Неустойчивость критического уровня является одним из механизмов возникновения турбулентности в атмосфере. Она происходит в результате взаимодействия атмосферного потока со внутренней гравитационной волной, которая движется в направлении, противоположном потоку. Когда волна подходит к определенному уровню, который называется критическим уровнем, где горизонтальная фазовая скорость волны равна скорости ветра, она может расти по амплитуде и разрушаться с образованием турбулентности. В этом случае образуется турбулентный слой, который может иметь размеры от нескольких метров до нескольких километров. Также возможно появление неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в окрестности критического уровня, которая также ведет к турбулизации. В этом случае образуется более крупный турбулентный слой, который может иметь размеры до нескольких десятков километров. Положение критического уровня зависит от фазовой скорости волн, которая должна рассматриваться как случайная величина. Поэтому в результате неустойчивости критического уровня появляются случайным образом распределенные турбулентные зоны при больших числах Рейнольдса (Re). Неустойчивость критического уровня имеет большое значение в атмосферной динамике, так как она может приводить к образованию мощных турбулентных потоков, которые могут оказывать существенное влияние на метеорологические условия и климат.

Так как ТЯН (турбулентность ясного неба) является редким и довольно сложным явлением, то встречаемость его может сильно различаться в зависимости от места и времени. Например, в Антарктике, где часто встречаются ледяные шельфы, ТЯН может происходить достаточно часто. В других районах, где доминируют стабильные атмосферные условия, ТЯН может быть крайне редким явлением. Согласно собранным данным от пилотов рейсовых самолетов

над территорией СССР, умеренные и сильные случаи ТЯН повторялись в среднем 2,5% раз в год, с наибольшим количеством случаев в сентябре и наименьшим в декабре. В США общая тенденция годового колебания ТЯН схожа с той, что наблюдается над территорией СССР, но повторяемость этих случаев значительно выше.

Механизм образования ТЯН связан с определенными метеорологическими условиями, включая:

1. вертикальный сдвиг ветра 8 м/с на 100 м;
2. горизонтальный сдвиг ветра 10 м/с на 100 км;
3. горизонтальный градиент температуры $2^{\circ}/100$ км;
4. вертикальный градиент температуры $1^{\circ}/100$ м;

Существуют несколько систем на борту самолета, которые помогают прогнозировать зоны ТЯН. Некоторые из них:

1. Радар погоды: этот прибор позволяет обнаружить зоны мощной конвекции, которые могут привести к образованию ТЯН.
2. Системы определения направления и скорости ветра: эти системы помогают определить вертикальный и горизонтальный сдвиги ветра, которые являются одним из условий образования ТЯН.
3. Системы измерения температуры и давления: они позволяют определить вертикальные градиенты температуры и давления, которые также являются условиями образования ТЯН.
4. Системы предупреждения о турбулентности: они помогают пилоту принимать меры предосторожности при приближении к зонам ТЯН, включая изменение высоты и скорости полета.
5. Системы передачи информации о ТЯН: эти системы могут передавать информацию о зонах ТЯН другим самолетам, что позволяет пилотам избегать этих зон или принимать соответствующие меры предосторожности при полете через них.

Турбулентность ясного неба - это важный физический процесс, который до сих пор изучен недостаточно. Несмотря на новейшие разработки и технологии, которые применяются в современных исследованиях, многие аспекты турбулентности ясного неба остаются неизученными. Это связано с тем, что для проведения таких исследований требуется большое количество времени, ресурсов и современного оборудования. В дополнение к этому, данные, собранные за более ранние годы, могут быть недостаточно полными и точными для анализа турбулентности ясного неба. Несмотря на эти трудности, ученые продолжают работать в этой области и пытаются найти новые методы и подходы для решения этой проблемы.

2. ПРОГНОЗ ТЯН

Методы прогноза ТЯН

Существует несколько методов прогнозирования ТЯН, которые используются в авиационной и метеорологической отраслях. Один из наиболее широко распространенных методов основан на анализе термобарических полей. Синоптики выделяют участки поля, на которых вероятность возникновения ТЯН наибольшая. Однако, этот метод имеет свои ограничения, так как он основывается на определенных условиях, которые не всегда могут привести к появлению турбулентности.

В настоящее время наиболее точный метод прогнозирования ТЯН - это использование физико-статистических зависимостей, полученных на основе данных, собранных за длительный период времени. Данные анализируются и обрабатываются, что позволяет определить связь между определенными признаками (индексами) и вероятностью возникновения ТЯН в конкретной зоне.

Также существуют методы прогнозирования ТЯН с использованием аэрокосмических технологий. Например, на борту самолетов установлены специальные датчики, которые могут измерять параметры воздуха и обнаруживать признаки возникновения турбулентности. Данные датчики передают информацию на земную станцию, где она обрабатывается и используется для прогнозирования ТЯН. Также существуют спутниковые системы мониторинга атмосферы, которые могут помочь в прогнозировании турбулентности на больших расстояниях.

2.1 Синоптический метод

Синоптический метод прогнозирования ТЯН основан на анализе погодных карт и прогнозов, составляемых синоптиками. Этот метод использует данные о вертикальных и горизонтальных изменениях атмосферного давления,

температуры и скорости ветра для выявления участков атмосферы, в которых вероятность возникновения турбулентности выше, чем в окружающих областях.

Синоптический метод прогнозирования ТЯН был разработан в начале XX века и является одним из наиболее простых и доступных методов прогнозирования турбулентности. Однако он имеет некоторые ограничения, так как не учитывает многих факторов, влияющих на появление турбулентности, таких как термодинамические условия, характер поверхности земли, топография местности и др.

Сегодня синоптический метод прогнозирования ТЯН все еще широко используется, особенно для краткосрочного прогнозирования турбулентности, но он дополняется более сложными методами, использующими математические модели и статистические алгоритмы.

Были определены пять типичных барических полей, которые характеризуются наибольшей повторяемостью возникновения интенсивной турбулентности.

Первый тип барического поля отличается присутствием глубокой высотной ложбины, внутри которой можно выделить отдельный циклон. В зоне сходимости изогипс происходит умеренная турбулентность, а в зоне расходимости — сильная. Обычно скорость ветра в зонах интенсивной турбулентности составляет от 100 до 150 км/ч, а средние значения боковых сдвигов ветра на 100 км обычно превышают 15—20 км/ч. Границы зоны с наибольшей вероятностью турбулентности расположены в пространстве от приземной линии холодного фронта до оси ложбины в области сходимости изогипс. Характерное поле изображено на рисунке 2.1.

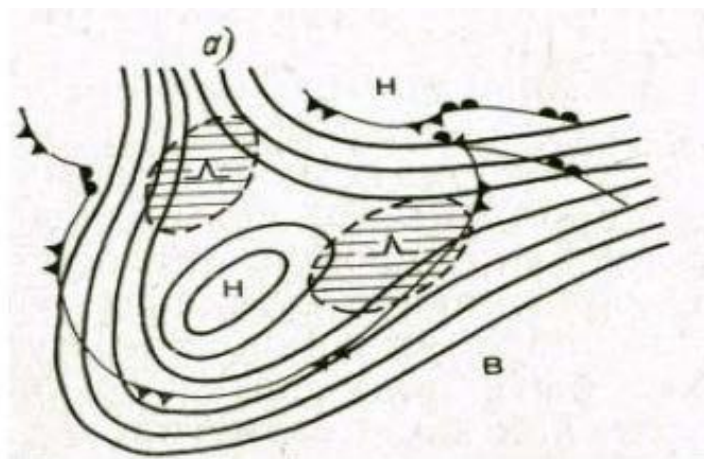


Рисунок 2.1 – Распределение зон повышенной турбулентности в барическом поле, выраженном глубокой ложбиной [2]

Второй тип барического поля характеризуется наличием высотного циклона (см. Рисунок 2.2). В тыловой части этой зоны, вероятность умеренной турбулентности выше, скорости ветра обычно составляют около 100-120 км/ч, и поток воздуха характеризуется небольшой сходимостью. В то же время, в передней части и в теплом секторе циклона, вероятность турбулентности может быть выше умеренной, скорости ветра могут достигать 100-150 км/ч, а горизонтальные сдвиги ветра могут превышать 50 км/ч на 100 км. Зоны с наибольшей вероятностью болтанки находятся в теплом секторе циклона и на участке шириной 100-200 км перед холодным фронтом.

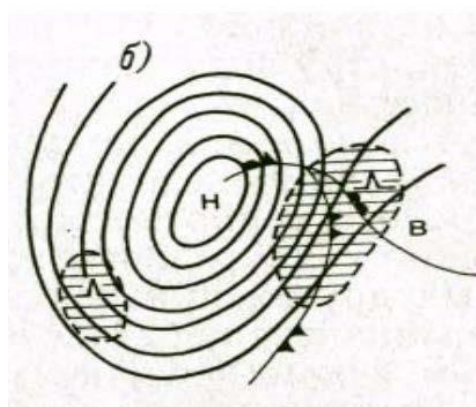


Рисунок 2.2 - Распределение зон повышенной турбулентности в барическом поле, выраженном в высотном циклоне [2]

Третий тип барического поля характеризуется тем, что интенсивная турбулентность наблюдается в двух областях:

- в передней части ложбины, правее ее оси в области расходящихся изогипс (иногда умеренная). Особенно это заметно, если ложбина углубляется после гребня.
- в тыловой части ложбины в области сходимости изогипс (иногда значительная). Скорость ветра при этом обычно не превышает 80-100 км/ч, а горизонтальные сдвиги ветра незначительны. (см. рисунок 2.3)

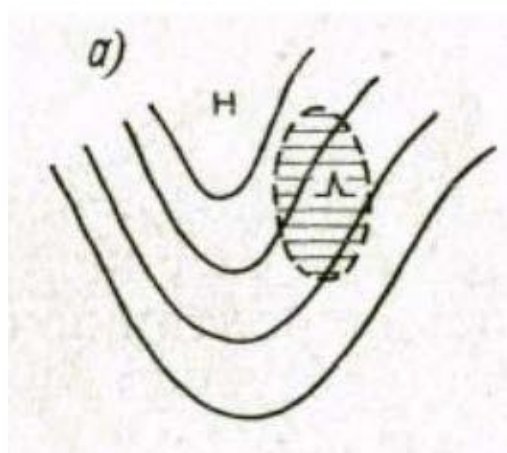


Рисунок 2.3 – Положение зон повышенной турбулентности в передней части ложбины [2]

Зона повышенной турбулентности при четвертом типе барического поля находится в тыловой части ложбины в области сходимости изогипс, при этом скорость и боковые сдвиги ветра такие же, как и в предыдущем случае и составляют 80—100 км/ч и 5—10 км/ч на 100 км соответственно. В этом случае интенсивность болтанки может быть значительной. Характерное поле можно увидеть на рисунке 2.4.

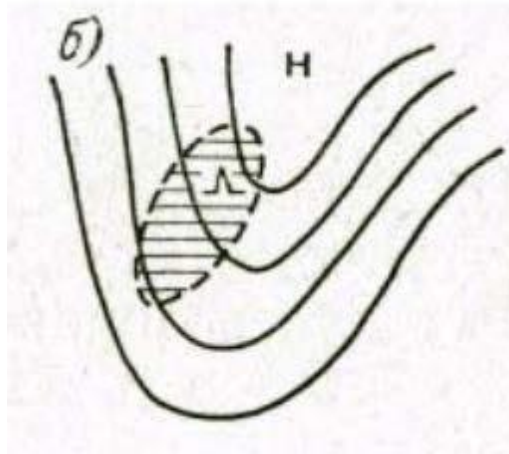


Рисунок 2.4 - Положение зон повышенной турбулентности в тыловой части ложбины [2]

Пятый тип барического поля, который характеризуется повышенной интенсивностью болтанки самолетов, связан с наличием высотного гребня. Здесь можно выделить две зоны с повышенной турбулентностью - в передней и тыловой частях гребня. Вероятность встречи с болтанкой в тыловой части гребня выше, чем в передней. Синоптическая ситуация характеризуется незначительной скоростью ветра, которая редко превышает 40-60 км/ч, а боковые сдвиги ветра в области высотного гребня обычно составляют 10-15 км/ч на 100 км. Интенсивность болтанки обычно умеренная или слабая, но иногда на фоне более сильного ветра (до 100 км/ч) может наблюдаться сильная болтанка. Рисунок 8 показывает характерное поле для этого типа барического поля.

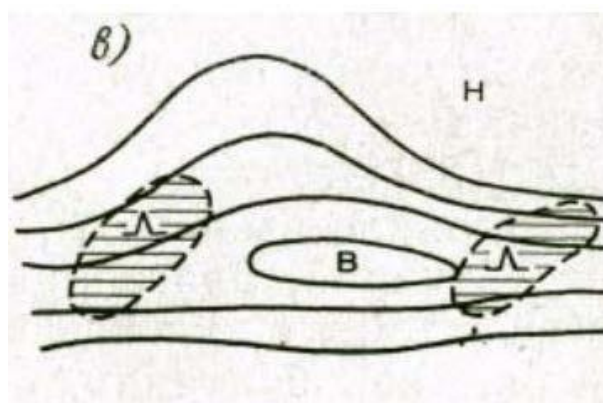


Рисунок 2.5 - Положение зон повышенной турбулентности в области высотного гребня [2].

Так как связь между болтанкой самолетов и синоптическим положением на высоте полета не является однозначной, необходимо использовать дополнительные прогностические признаки, которые указывают на возможность возникновения болтанки. Среди таких признаков следует упомянуть:

1. Холодные фронты I и II рода на приземной карте. Болтанка на холодных фронтах чаще всего повторяется по сравнению с другими атмосферными фронтами. Однако, на слабых холодных фронтах или в случае, когда горизонтальный градиент температуры в области фронтальной зоны составляет менее 2°C на 100 км, а горизонтальный градиент скорости ветра менее 20 км/ч на 100 км, болтанку не наблюдают.
2. Теплый фронт или фронт окклюзии, связанные с высокотропосферными струйными течениями, четко выраженными и имеющие горизонтальный градиент температуры более 2°C на 100 км, а горизонтальный градиент скорости ветра более 20 км/ч на 100 км.
3. Струйные течения в высоких слоях атмосферы, включая стратосферу, являются причиной болтанки самолетов, и для их наличия требуются определенные показатели, включающие скорость ветра более 25 м/с, вертикальный градиент скорости ветра более 10 м/с на 1 км высоты и изменение направления ветра более 15° на 1 км высоты.
4. При периферии циклона, ложбины или гребня барического рельефа на высоте полета наблюдается наибольшая повторяемость болтанки самолетов. Особенно благоприятные условия для развития турбулентности возникают в глубоких барических ложбинах, которые продолжают углубляться. Случаи болтанки в заполняющихся ложбинах встречаются гораздо реже. В центральной части пересечения высотных циклонов и антициклонов наблюдаемость болтанки самолетов редка. Повторяемость болтанки значительно выше на периферии барических образований, особенно в западной и юго-западной частях углубляющихся циклонов при адвекции холода и сходимости изогипс.

5. Имеет место увеличение повторяемости болтанки самолетов, когда на эшелоне полета присутствует облачность, по сравнению с безоблачной погодой.
6. Болтанка самолетов наблюдается наиболее часто при ситуации адвекции холода.
7. Наблюдается значительное усиление ветра на эшелоне полета в верхней тропосфере, что может приводить к развитию болтанки самолетов.

2.2 Физико-статистический метод

Физико-статистический метод прогнозирования турбулентности - это метод, который использует физические законы, статистические данные и моделирование для предсказания турбулентности в атмосфере. Для этого метода требуется собрать большое количество данных о состоянии атмосферы, таких как скорость ветра, температура, давление, влажность и т.д., и использовать их для определения возможных паттернов турбулентности. Эти данные затем анализируются с помощью математических методов и моделирования, чтобы предсказать будущие уровни турбулентности в атмосфере на основе предыдущих показателей. Этот метод может быть использован в авиации, метеорологии и других областях, где важно точно прогнозировать турбулентность в атмосфере.

Преимуществом физико-статистического метода является то, что он может учитывать физические законы и другие факторы, которые могут влиять на предсказываемое явление. Однако этот метод также может быть ограничен необходимостью точных данных и проблемами, связанными с учетом всех релевантных факторов, что может приводить к неточным результатам.

Методы диагноза и прогноза болтанки самолетов на основе температурно-ветрового зондирования могут быть графическим и методом комплекса критериев.

Графический метод основан на анализе вертикальных профилей ветра и температуры на определенных уровнях атмосферы. В результате этого анализа строят графики, на которых показывают изменение скорости и направления ветра в зависимости от высоты. Этот метод позволяет выявить наличие струйных течений, перепадов давления и температур, которые могут привести к болтанке самолетов. Чем больше вертикальный градиент метеорологической величины, тем меньше угол наклона между построенными кривыми и горизонтальной осью. Для диагностики и прогнозирования болтанки самолетов используются критические значения вертикальных градиентов, такие как скорость ветра более 10 м/с, изменение направления ветра более чем на 15° на 1 км высоты, и изменение температуры воздуха более чем на 7°C на 1 км высоты. Для выделения зон болтанки воздушных судов применяется технология, основанная на построении профилей ветра и температуры воздуха. Для каждого линейного участка определяется угол наклона вертикального профиля относительно горизонтальной оси. Затем, этот угол наклона сравнивается с критическим значением [2]. Если один из вертикальных профилей считается "неустойчивым", это считается признаком наличия турбулентности, что может привести к образованию болтанки. Если неустойчивость выявляется в двух профилях для какого-то слоя, то это значительно увеличивает вероятность болтанки.

Графический метод диагностики и прогнозирования болтанки самолетов имеет свои преимущества и недостатки.

Среди преимуществ можно отметить простоту и доступность данного метода, а также возможность получения наглядной картины профилей скорости ветра, направления ветра и температуры воздуха на высоте полета, что облегчает анализ данных и выделение зон болтанки. Графический метод также позволяет быстро оценить изменения погодных условий на различных участках маршрута полета.

Однако у графического метода есть и недостатки. Один из главных недостатков - это субъективность оценки угла наклона вертикального профиля к горизонтальной оси, который сравнивается с критическим значением. Также

графический метод не позволяет оценить динамику изменения погодных условий и вертикальных градиентов на маршруте полета во времени.

Метод комплекса критериев основан на определенных критериях, которые позволяют диагностировать болтанку самолетов. Эти критерии включают в себя скорость ветра, вертикальный градиент скорости ветра, изменение направления ветра и температурные градиенты на разных уровнях атмосферы. В результате анализа этих критериев строят комплексную карту, на которой указывают зоны, где вероятность болтанки самолетов наиболее высока. Этот метод является более точным и надежным по сравнению с графическим, так как учитывает множество критериев и их взаимосвязь.

Согласно информации температурно-ветрового зондирования, установлено шесть критериев турбулентности, которые включают в себя:

- скорость ветра 25 м/с и выше
- вертикальный градиент скорости ветра 10 м/с на 1 км
- горизонтальный градиент скорости ветра 5 м/с на 100 км
- вертикальный сдвиг направления ветра 15° на 1 км
- вертикальный градиент температуры воздуха 7° на 1 км и
- горизонтальный градиент температуры воздуха 2 на 100 км

Если на эшелоне полета выполняется одновременно не менее трех критериев, то считается, что имеется болтанка.

Перед применением метода комплекса критериев для определения зон болтанки, трасса полета разделяется на участки длиной 200-400 км между пунктами температурно-ветрового зондирования атмосферы. Для каждого отдельного участка трассы на заданной высоте рассчитываются вертикальные и горизонтальные градиенты температуры и ветра с использованием данных зондирования. Затем, в зависимости от количества параметров, которые превышают критические значения, делается прогноз появления болтанки на заданном уровне. Горизонтальные градиенты температуры и ветра определяются согласно карте барической топографии, ближайшей к эшелону полета, а

вертикальные градиенты - по картам барической топографии, находящимся между уровнями полета.

Можно использовать график, изображенный на рисунке 2.6, для прогнозирования болтанки воздушных судов с использованием данных температурно-ветрового зондирования. На этом графике вертикальные градиенты температуры γ отложены по оси ординат, а вертикальные градиенты вектора ветра β - по оси абсцисс. Вся площадь графика разделена на две зоны: зону с возможной болтанкой и зону без нее. Исходя из значений вертикальных градиентов температуры и ветра, можно определить вероятность возникновения болтанки в исследуемом слое[2].

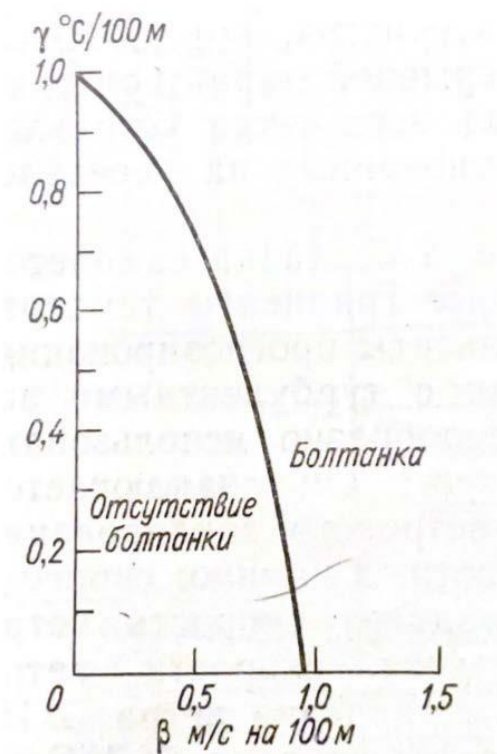


Рисунок 2.6 - График для прогноза болтанки по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы (по Н.З. Пинусу)

Для прогнозирования болтанки воздушных судов между главными изобарическими поверхностями также доступен график, изображенный на рисунке 2.7. Он использует данные температурно-ветрового зондирования для определения вертикального градиента температуры γ (в градусах Цельсия на 100

метров) и вертикального градиента вектора ветра β (в метрах в секунду на 100 метров). Затем рассчитывается отношение γ/β , и на основе графика определяется вероятность болтанки воздушных судов [2].

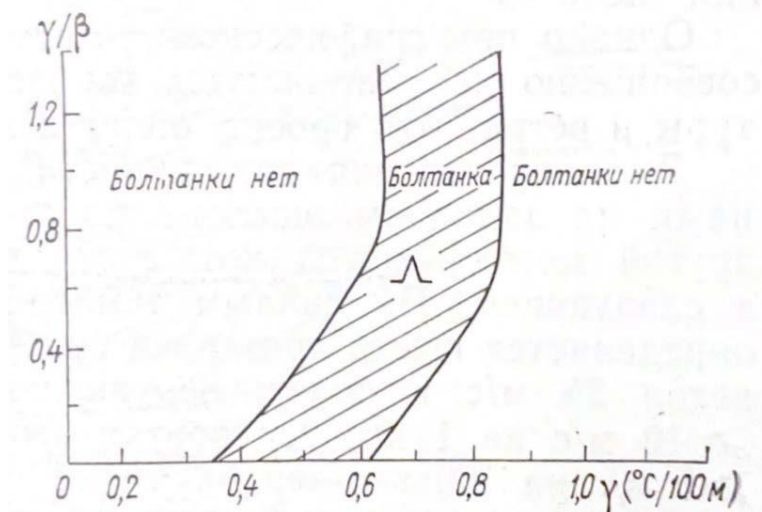


Рисунок 2.7 - График для прогноза болтанки самолетов в свободной атмосфере

Для прогнозирования болтанки самолетов в нижнем слое атмосферы можно использовать графики, представленные на рисунке 2.8. На первом графике (рис. 2.8а) по оси абсцисс отчается максимальная скорость ветра на высоте, близкой к аэродрому, а по оси ординат – разность скоростей ветра на данной высоте и на ВПП (в абсолютной величине). На графике выделены зоны с различными уровнями турбулентности: слабой ($\delta 0-1$), умеренной или сильной ($\delta 2-3$) [2].

Также, турбулентность в приземном слое можно определить по графику, изображенному на рисунке 2.8б. На данном графике по оси абсцисс отчается максимальная скорость ветра на ВПП ($U_{\text{макс ВПП}}$, м/с), а по оси ординат – горизонтальный градиент температуры на уровне 850 гПа ($\text{ГТ}850^{\circ}\text{C}/100\text{км}$).

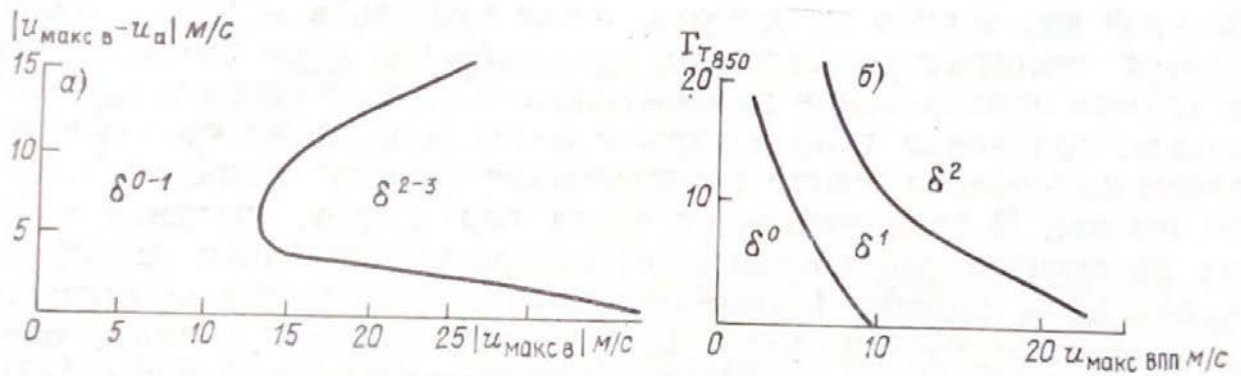


Рисунок 2.8 - График для прогноза болтанки в приземном слое: а - по приземным данным; б - по данным о ветре на ВПП и горизонтальном градиенте температуры на уровне 850 гПа $\Gamma_{T850}(\text{°C}/100 \text{ км})$ [2]

Был создан метод (основанный на гидродинамических моделях), который использовался Гидрометцентром СССР при составлении карт особых погодных явлений, включая прогноз ТЯН [2]. Для прогноза требуются данные о высоте изобарических поверхностей 300 и 400 гПа, температуре, направлении и скорости ветра на поверхности. Расчет производится в средней точке каждого квадрата сетки. Для каждого квадрата рассчитываются значения следующих параметров: модуль производной по z от вектора скорости ветра в слое 300-400 гПа ($\partial u/\partial z$, м/с на 100 м), горизонтальные градиенты температуры на поверхности 300 и 400 гПа ($\partial T/\partial n$, °C/100 км) и градиенты скорости ветра по потоку на поверхностях 300 и 400 гПа ($\partial u/\partial n$, м/с на 100 км). Кроме того, рассчитывается значение дискриминантной функции.

$$L = 7,268 \frac{du}{dz} + 0,718 \frac{dT}{dn} + 0,133 \frac{du}{dn} - 2,52 \quad (2.1)$$

При использовании соответствующих значений $\partial T/\partial n$ и $\partial u/\partial n$ для поверхностей 300 и 400 гПа, если $L > 0$, то на соответствующем уровне в атмосфере прогнозируется наличие турбулентности при ясном небе [2].

Во многих аэропортах нашей страны наиболее распространенным методом прогнозирования атмосферной турбулентности является синоптический метод. Это связано с тем, что даже при наличии инструментов и индексов, доступных в наше время, прогнозирование ТЯН остается сложным процессом.

2.3 Метод прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе

Число Ричардсона (Ri) является важным фактором для прогнозирования турбулентности, однако на практике его использование ограничено из-за низкой точности расчетов при недостаточном вертикальном разрешении данных. Кроме того, для прогнозирования турбулентности также используются другие параметры. В 1980-х годах в СССР была разработана схема прогнозирования турбулентности с учетом топографии поверхностей 300 гПа и 400 гПа на основе большой выборки данных (более 22 000 рапортов пилотов о наличии турбулентности) при участии Т.В. Лешкевича. [3]. Был разработан алгоритм, который классифицирует ситуации, основываясь на различных критериях, включая конфигурацию изогипс, структуру струйного течения и характеристики поля температуры. Для каждого из 9 классов была получена дискриминантная функция от трех предикторов, которые характеризуют температурно-ветровую стратификацию. Учитывая географическое распределение природной повторяемости ТЯН, схема была детализирована с учетом степени влияния орографии и других региональных факторов. Эта схема до сих пор остается непревзойденной по объему использованного материала, детальности и статистической обеспеченности прогностических зависимостей в ее диагностическом варианте. Для расчета показателей ТЯН по прогностическим данным была восстановлена утраченная схема Лешкевич в поисках оптимальных алгоритмов.

Были проведены вычисления для северного полушария и для территории, на которой использовалась данная схема. Результаты расчетов показали, что

местная зависимость повторяемости ТЯН является ключевым фактором, обеспечивающим эффективность данной схемы. Однако, поскольку эта зависимость за пределами территории, изученной Т. В. Лешкевич, неизвестна, расширение использования схемы на всё полушарие невозможно. Поэтому, с целью снижения вероятности неэффективности данной схемы, были созданы альтернативные программы расчета индексов ТЯН, используемых в международных прогностических центрах, таких как UKMO в Великобритании [4], а также в метеослужбах США и Канады [5]. Целью было выбрать метод, который обеспечивал бы наиболее точное разделение случаев наличия и отсутствия турбулентных явлений на выборках реальных данных, полученных от самолетов. Информация о наличии или отсутствии турбулентности извлекалась из данных в коде AMDAR, которые поступали из систем измерений на борту самолетов, летающих над территорией США и Канады, и анализировались отделом авиационной метеорологии ГУ «Гидрометцентр России». Эта техника измерения турбулентности основывается на данных о максимальной и мгновенной скорости вихревой диссипации (EDR), полученных от самолетных пульсационных датчиков, и интерпретируется в терминах «индекса турбулентности» (см. таблицу 1), как предписано Техническим регламентом ВМО [6].

Таблица 1 – Индекс турбулентности, определяемый средним и максимальным значением EDR ($\text{м}^{2/3}\text{с}^{-1}$): категории, соответствующие сильной турбулентности, затенены [7]

	Максимальное значение EDR
--	---------------------------

Средние EDR	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,8
< 0,1	0	1	3	6	10	15
0,1-0,2		2	4	7	11	16
0,2-0,3			5	8	12	17
0,3-0,4				9	13	18
0,4-0,5					14	19
0,5-0,8						20
> 0,8						
Отсутствие						

На основании данных EDR и индексов наблюдаемой турбулентности, ВМО рекомендует связи, определяющие интенсивность ТЯН. Согласно этим связям, турбулентность считается:

- сильной, если индекс турбулентности находится в диапазоне от 15 до 27 (при максимальном значении EDR более 0,5)
- умеренной – если индекс турбулентности находится в диапазоне от 6 до 14 (при максимальном значении EDR в диапазоне от 0,3 до 0,5)
- слабой – если индекс турбулентности находится в диапазоне от 1 до 5 (при максимальном значении EDR в диапазоне от 0,1 до 0,3)
- нулевой – если индекс турбулентности равен 0 (при максимальном значении EDR менее 0,1)

Учитывая редкость ТЯН и их влияние на полет ВС, были выбраны случаи, когда турбулентность была сильной или умеренной (то есть когда выполнялось условие $EDR > 0,3$). Количество таких случаев в окончательной выборке данных AMDAR, разбитых на квадраты сетки объективного анализа, составило 1235 из общего числа случаев – 75281.

Необходимо учитывать, что ТЯН представляет собой турбулентность, которая происходит вне зон активной конвекции, и поэтому необходимо исключать из анализа квадраты, в которых присутствует конвективная

неустойчивость, включая неглубокую. При этом, для анализа используются данные AMDAR, которые помогают выявить квадраты с наличием или отсутствием ТЯН. Однако, следует исключать квадраты, в которых имеется конвективная неустойчивость, даже неглубокая. Если значение рассчитанного уровня нулевой плавучести (верхняя граница конвекции) превышает 2 км, то такие квадраты также исключаются из рассмотрения. Для выявления предикторов повторяемости ТЯН используются индексы, такие как deformation vertical shear index (DVSI) и индекс Даттона. Они считаются важными предикторами, используемыми в ведущих прогностических центрах. Индекс DVSI показал более высокую информативность, чем индекс Даттона, как предиктор ТЯН, используемый в УКМО. Индекс DVSI представляет собой произведение деформации ветра, его вертикального сдвига и скорости, нормализованной на ее характерное значение.

В целом, использование данных индексов позволяет более точно определять наличие и интенсивность ТЯН, что может быть использовано в технологии производства карт в ГУ «Гидрометцентр России», таких как карты значений высот волн (SWH) и карты скоростей ветра над поверхностью моря (SWM).

$$DVSI = (DEF) * (VS) * \frac{VDVSI}{45} \quad (2.2)$$

где DEF-деформация ветра,

$$DEF = \sqrt{\left(\frac{du}{dx} - \frac{dv}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy}\right)^2} \quad (2.3)$$

Где VS – вертикальный сдвиг ветра:

$$VS = \sqrt{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2} \quad (2.4)$$

В статье [7] был предложен метод для вычисления карты зон ТЯН в цифровом формате. В качестве исходных данных используются прогностические поля ветра от глобальных моделей с шагом 1.25° по долготе и 1.25° по широте, которые оперативно используются в "Гидрометцентре России". Эти модели включают в себя глобальную спектральную модель в конфигурации T85L31 и полулагранжевую глобальную модель атмосферы ПЛАВ на всех уровнях, начиная с 850 гПа, в соответствии с Техническим регламентом ВМО [6].

Алгоритм состоит из двух шагов. На первом шаге вычисляются значения индекса DVSI на поверхностях 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 и 70 гПа по всей области. Индекс DVSI определяется с помощью кубической сплайн - аппроксимации, зависимости составляющих скорости ветра от горизонтальной и вертикальной координат.

На втором шаге, в каждом узле сетки вертикального профиля, определяется значение индекса DVSI, которое превышает критическое значение DVSI_{кр}, разделяющее условия наличия и отсутствия ТЯН. Критические значения DVSI_{кр} были определены на большом материале авторских испытаний. Однако, из-за занижения скоростей ветра в глобальных моделях, прогностические пороговые значения DVSI_{кр}, выработанные по принципу соответствия площадей ТЯН в анализе и прогнозе, ниже диагностических. Предлагается установить критическое значение DVSI равным 12 при расчете по прогностическим полям T85L31 и равным 15 при расчете по прогностическим полям ПЛАВ.

На третьем этапе, после проведения расчетов по каждому узлу сетки, формируется файл результатов, в который записываются значения верхней и нижней границы слоя сверхкритических DVSI. Если для узла не найдены сверхкритические DVSI, то в файл результатов заносится ноль. Если же узел

имеет сверхкритические DVSI на одном или нескольких уровнях, то построение непрерывного профиля индекса DVSI в слое 850-70 гПа происходит при помощи кубических сплайн-функций. Затем определяются уровни, на которых DVSI переходит через критическое значение, которые соответствуют верхней и нижней границам повышенной вероятности умеренной и сильной ТЯН над данным узлом сетки. Высоты этих уровней записываются в файл результатов, используя единицы FL (гектофуты) и различая их на средние и верхние уровни. Сплайн-функции используют давление в качестве аргумента, а высоты границ слоя записываются в соответствии с Техническим регламентом ВМО [6]. После проведения авторских испытаний были предложены две отечественные глобальные модели для проверки качества прогноза ТЯН. Модель UKMO показала лучшие результаты, однако не годится для оперативного применения из-за грубого горизонтального разрешения данных, доступных в ГУ (2.5x2.5°). Для сравнения были проведены расчеты по модели NCEP на одноградусной сетке, однако и эта модель не может быть использована в оперативной работе ЛЗП в настоящее время из-за недостаточно своевременного поступления данных по каналам связи.

В результате исследований были получены следующие выводы:

- Модель ПЛАВ (версия 2008 года) показала более высокую успешность прогнозов зон ТЯН, чем модель T85L31. Основной причиной этого является то, что модель ПЛАВ более точно оценивает скорость сильных ветров в тропосфере и нижней стратосфере.
- Наиболее точные прогнозы зон ТЯН показала модель NCEP.
- На изобарической поверхности 100 гПа, успешность прогнозов зон ТЯН была низкой из-за того, что у всех сравниваемых моделей была очень маленькая повторяемость случаев умеренной и сильной турбулентности в ясном небе на этом уровне.
- Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета одобрила метод прогнозирования зон ТЯН в ясном небе, основанный на исследованных

моделях и рекомендовала ГУ «Гидрометцентр России» использовать его в качестве основного для оперативной практики и выпуска карт особых явлений погоды на верхних и средних уровнях атмосферы заблаговременностью до 30 часов для метеорологического обеспечения авиации.

3. РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗА ТЯН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭТАЛОНОВ

3.1 Исходные данные

Фактические случаи турбулентности выбирались на основе спутникового продукта ASII-TF [6], который оценивает вероятность вторжения стратосферного воздуха в тропосферу (так называемые складки тропопаузы). Обычно в складке тропопаузы наблюдается вертикальный сдвиг струйного течения в сочетании с конвергенцией воздушных масс. Складки тропопаузы отмечаются изменением высоты тропопаузы и характеризуются возникновением сильной турбулентности. Стратосферный воздух, для которого характерно низкое содержание влаги и высокая потенциальная завихренность, может вторгаться в среднюю или даже нижнюю тропосферу. Следовательно, складки тропопаузы могут быть обнаружены по их связи с градиентами влажности, которые можно отслеживать в канале водяного пара (WV) на длине волны 6,2 мкм, чувствительном к водяному пару верхней тропосферы. Высота тропопаузы может быть оценена по параметрам ЧПП, таким как температура, удельная влажность или потенциальная завихренность. Кроме того, содержание озона, полученное по ИК-каналу на длине волны 9,7 мкм, является хорошим индикатором наличия складки тропопаузы: чем ниже тропопауза, тем выше показатели содержания озона. Все вышеназванные показатели являются входными параметрами в ASII-TF.

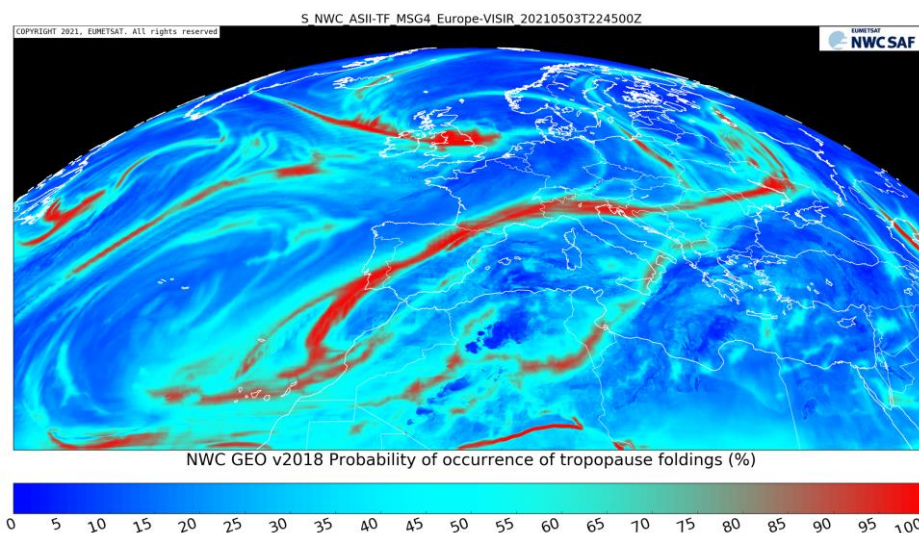


Рисунок 3.1 – вероятность обнаружения складок тропопаузы

Преимущества продукта ASII-TF включают:

1. **Покрытие всей Земной поверхности:** Продукт ASII-TF доступен для всей видимой Земной поверхности, как наблюдаемой метеорологическими геостационарными спутниками. Это глобальное покрытие позволяет обнаруживать складки тропопаузы и оценивать потенциальные зоны турбулентности в масштабах всей планеты.
2. **Постоянная доступность:** Продукт обеспечивает круглосуточную доступность, включая как дневные, так и ночные наблюдения. Это гарантирует, что информация ASII-TF доступна и обновляется в любое время, обеспечивая своевременное отслеживание турбулентных условий.
3. **Временная частота:** ASII-TF доступен с разрешением, соответствующим временным интервалам, на которых геостационарные спутники обычно делают снимки. Это разрешение позволяет проводить мониторинг складок тропопаузы и потенциала возникновения турбулентности в них практически в реальном времени.
4. **Высокое разрешение:** Продукт доступен с полным разрешением инструмента SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) геостационарного спутника. Это высокое разрешение повышает точность и детализацию обнаруженных складок тропопаузы, улучшая точность определения зон турбулентности.
5. **Интеграция источников данных:** ASII-TF объединяет данные спутника с данными моделей численного прогноза погоды (NWP) в одном продукте.

Эта интеграция позволяет проводить всесторонний анализ атмосферных условий, объединяя наблюдаемые и моделируемые данные. Путем объединения этих источников данных ASII-TF предоставляет более полное представление о потенциале для турбулентности в атмосфере.

В целом, продукт ASII-TF предлагает широкое покрытие, постоянную доступность, высокое разрешение и интеграцию данных спутников и NWP, что делает его ценным инструментом для обнаружения и мониторинга складок тропопаузы.

Ограничения:

Продукт ASII-TF определяет расположение складок тропопаузы в верхней тропосфере, но не предоставляет информацию о их вертикальном распределении и протяженности в пространстве. При этом складки тропопаузы обычно имеют сильную вертикальную, но такая детальная информация не учитывается в данном продукте.

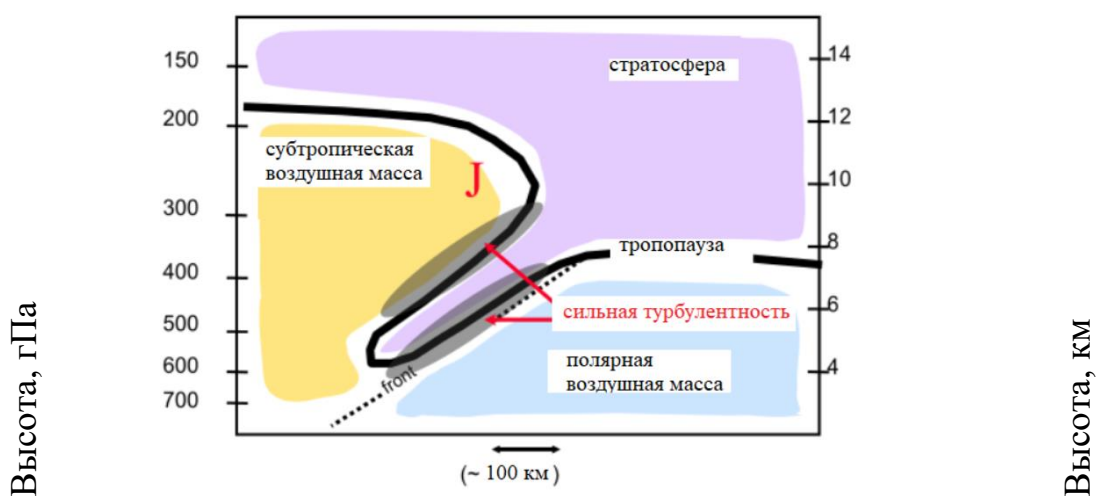


Рисунок 3.2 – Схема стратосферного вторжения [6]

В приведенном выше примере (рис. 3.1) для каждого пикселя показана вероятность нахождения в области складки тропопаузы (наиболее высокие значения вероятности отображены красным цветом, наименьшие - синим). Турбулентность в верхней тропосфере тесно связана с сдвигами ветра и струйными течениями. Складки тропопаузы указывают на градиенты температуры в верхних слоях (фронты), и они часто сопровождаются струйными течениями и сдвигом, что является основной причиной

турбулентности ясного неба (CAT). Таким образом, складки тропопаузы являются косвенным показателем сдвига ветра в верхних слоях, который является основной причиной турбулентности на этой высоте. [6]

На приведенной карте (рис. 3.3) представлены прогностические данные о значимых погодных явлениях (SIGWX) для той же даты и региона над Европой, выпущенные WAFC Лондон. Все 4 области, где прогнозируется турбулентность (CAT), отмечены на карте и соответствуют высоким значениям вероятности нахождения в области складок тропопаузы, которые представлены в продукте ASII-TF.

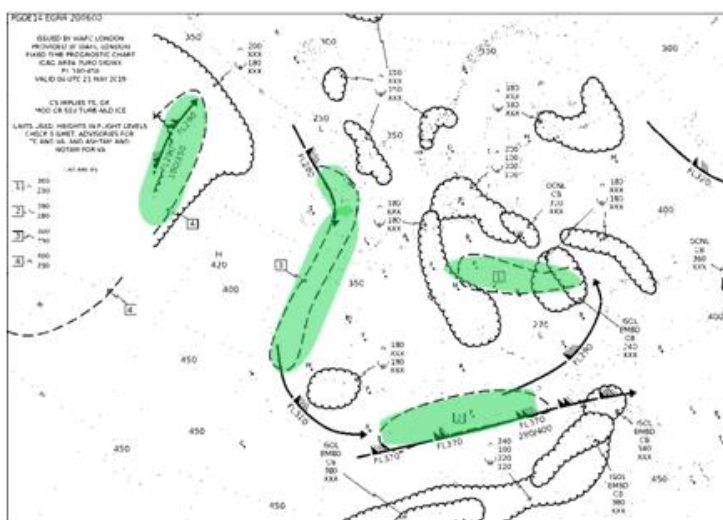


Рисунок 3.3 – прогноз турбулентности на карте SIGWX [6]

Таким образом, продукт ASII-TF объединяет информацию с спутников и моделей численного прогноза погоды (NWP) для обнаружения перегибов тропопаузы в атмосфере. Он предоставляет данные о местоположении этих областей, где условия для турбулентности в полете самолетов более вероятны, чем в других областях.

В ходе работы была выбрана территория Южной Европы (Испания, Италия) и рассмотрен временной интервал с 2020 по 2022 год. Выбор

территории был обусловлен тем, что именно здесь вторжение стратосферного воздуха в тропосферу наблюдалось чаще всего.

Всего было отобрано 27 дней с ТЯН. Так как продолжительность явления была около суток, то для расчета эталонных полей брались ежечасные поля геопотенциала на АТ-300 гПа реанализа ERA 5 [11,6] с разрешением 2,50 x 2,50, то есть анализировались 648 полей. Искомые 27 дней (648 полей) были поделены на обучающую выборку (17 дней или 408 полей) и контрольную (10 случаев или 240 полей), при этом в контрольной было еще дополнительно привлечено столько же случаев когда ТЯН не наблюдалось.

3.2 Методология

Произведен расчет эталонных полей геопотенциала АТ-300 гПа - конкретных полей геопотенциала, обладающих наибольшей схожестью с остальными полями в данном множестве. В работе был использован метод эталонов, предложенный Морозовой С.В [7]. Для реализации метода используется информация реанализа ERA5 с разрешением 2,5 x 2,5 градуса. Эталонное поле давления – это одно из фактических полей, которое характеризуется наивысшим подобием с другими полями в данном множестве [9] Это поле находится ближе всего к другим полям и, именно, оно лучше всего отображает остальные поля. Такой метод позволяет выявлять типичные поля для любого локального явления, будь то заморозки или туманы [7].

Архив полей геопотенциала представляется в виде :

$$X = X(z) = (X_1, X_2, \dots, X_k), 1 < z < k \quad (3.1)$$

где

- k – число выбранных полей;
 $X(k)$ – конкретное поле из архива, представленное в виде матрицы

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

где

- x_{ij} – значение геопотенциала в узле регулярной сетки;
 i – число параллелей, i изменяется от 1 до m ;
 j – число меридианов, $j = 1, n$

Таким образом, на данном этапе определяются выборки полей геопотенциала отдельно для всех периодов, в каждом из которых впоследствии определяется «эталонное» поле.

Далее в данной методике устанавливается «эталонное поле». Для определения эталонных полей применяется подход, основанный на статистической оценке минимальных расстояний между барическими полями, по формуле [7]:

$$C_{i,p} = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x_{ij} - x_{pj})^2} \quad (3.4)$$

где:

$C_{i,p}$	–	параметр близости (удалённости) между i -м и p -м барическими полями;
$X_{i,j}, X_{p,j}$	–	давление в узлах регулярной сетки сравниваемых полей;
k	–	число выбранных полей;
q	–	число узлов регулярной сетки

Подобие i -го поля со всеми остальными находится по формуле:

$$S_i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k C_{i,p} \quad (3.5)$$

Наименьшее значение S_i означает, что i -е поле лучше всего описывает все поля. Именно по этому показателю можно сказать, что поле будет являться эталонным для других.

Таким образом, полученные значения $C_{i,p}$ и S_i позволяют выявить эталонные поля давления.[8]

3.3 Выбор эталонных полей

Для эталонного поля геопотенциала в обучающей выборки коэффициент S_i оказался равен 4.58. Это было для 6 января 2021 года. Далее это поле было добавлено к контрольной выборке (с днями с ТЯН и без) и был сделан еще один расчет. Наиболее близкими к эталонному полю геопотенциала оказались дни с турбулентностью.

На рисунке ниже представлена контрольная выборка, дни без ТЯН обозначены в названии NO_***

era5_z_2021m01-06.nc	24 728 B
era5_z_2021m02-07.nc	24 728 B
era5_z_2021m02-23.nc	24 728 B
era5_z_2021m02-28.nc	24 728 B
era5_z_2021m03-19.nc	24 728 B
era5_z_2021m03-28.nc	24 728 B
era5_z_2021m05-03.nc	24 728 B
era5_z_2021m06-20.nc	24 728 B
era5_z_2021m06-21.nc	24 728 B
era5_z_2021m07-7.nc	24 728 B
etalon.dat	3 024 B
NOera5_z_2021m02-16.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m07-22.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m08-21.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m09-14.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m10-14.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m12-03.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m12-14.nc	24 728 B
NOera5_z_2021m12-20.nc	24 728 B
NOera5_z_2022m01-01.nc	24 728 B

Рисунок 3.5 – контрольная выборка для ТЯН

После итогового расчета были получены следующие коэффициенты S_i . Первые несколько строк итоговых расчетов представлены ниже. Дни с ТЯН выделены серым цветом. Как видно, в контрольной выборке наиболее низкие значения коэффициента действительно соответствуют дням с турбулентностью. Некоторые даты фигурируют несколько раз, так как данные реанализа были ежечасные. Соответственно это разные сроки одних тех же суток с турбулентностью.

Таблица 2 - Коэффициенты S_i для контрольной выборки.

Дата	коэффициент S_i
------	-------------------

2021-03-19	7.496
2021-02-28	8.345
2021-02-23	10.074
2021-01-06	11.007
2021-02-23	11.087
2021-02-16	11.160
2021-01-06	11.184
2021-02-07	11.711

На рисунке 3.6 представлено эталонное поле для ТЯН, характерное для южной Европы (район Испании и Италии). В данном районе наблюдается сдвиг ветра. Зона сдвига ветра часто связана с границами различных воздушных масс или явлениями, такими как фронты, грозовые системы или горные рельефы, которые вызывают изменения ветрового поля и создают условия для возникновения турбулентности.

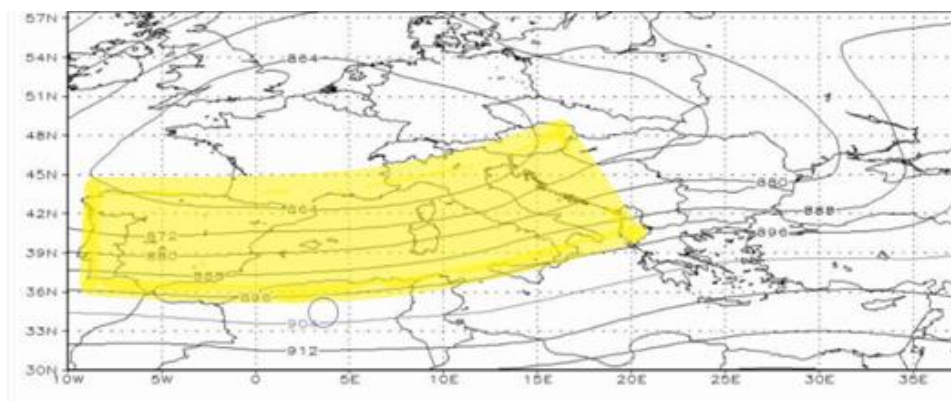


Рисунок 3.6а - эталонное поле для ТЯН

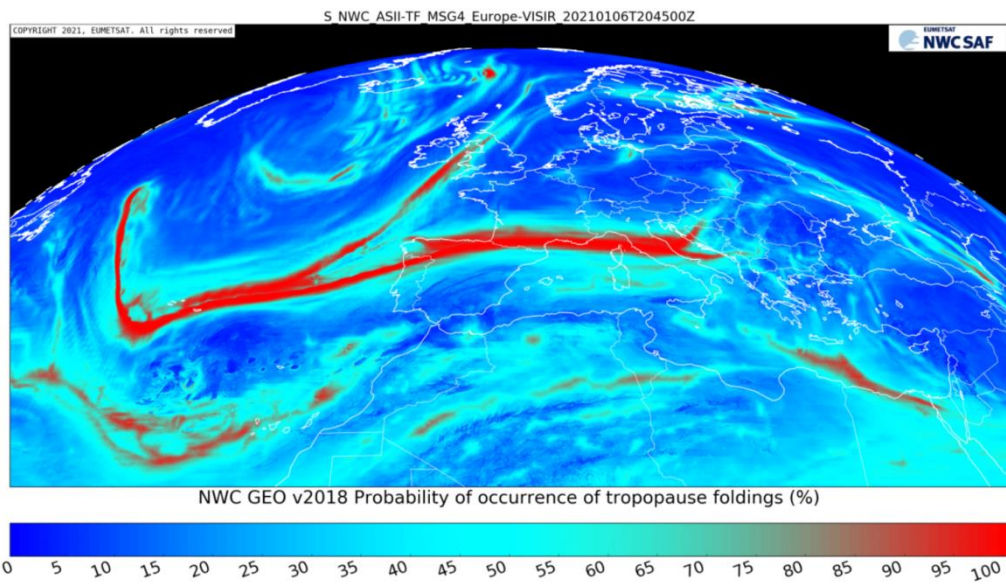


Рисунок 3.6б - Расчетная вероятность обнаружения складок тропопаузы

Заключение

Турбулентность ясного неба является опасным фактором для безопасности авиаперевозок и может приводить к неожиданным изменениям скорости и направления ветра, что оказывает негативное влияние на управление воздушным судном, а также к повреждению воздушных судов. Многие авиационные происшествия и катастрофы доказывают это. Данная работа посвящена исследованию методов прогнозирования турбулентности ясного неба на основе метода эталонов. Этот метод с учетом отбора фактических полей с помощью продуктов совместного использования спутниковых данных и ЧПП является перспективным и требует дальнейшего исследования (большей выборки и исследований для других территорий) Результаты исследования показали, что метод, основанный на эталонных полях, предложенный С.В. Морозовой, может быть эффективным инструментом. Применение метода прогноза для зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе является предпочтительным, так как данный метод продемонстрировал отличные результаты.

Выводы по продукту ASII-TF:

ASII-TF (Автоматическое интерпретация спутниковых изображений - обнаружение стратосферного вторжения) является продуктом, предназначенным для обнаружения складок тропопаузы в атмосфере. Стратосферное вторжение характеризуются наличием сильного вертикального сдвига ветра на уровне струйного потока и часто связано с возникновением турбулентности ясного неба. ASII-TF комбинирует данные спутников и численного прогноза погоды (NWP), чтобы определить области с высокой вероятностью нахождения складок тропопаузы.

Преимущества ASII-TF включают доступность для всей Земли, видимой метеорологическими геостационарными спутниками, круглосуточную доступность (днем и ночью), доступность с временной частотой геостационарного спутника и высокое пространственное разрешение SEVIRI. Кроме того, данный продукт объединяет спутниковые и NWP данные в одном

продукте, что позволяет получить более полную картину атмосферных условий. Таким образом, ASII-TF представляет ценный инструмент для обнаружения областей с потенциально высокой вероятностью турбулентности в атмосфере. Однако, для точного и полного прогноза турбулентности следует учитывать и другие факторы.

Таким образом, дипломная работа представляет важную научную работу, имеющую практическое значение для безопасности авиаперевозок. Результаты исследований, проведенных в рамках данной работы, могут быть использованы для разработки более эффективных методов прогнозирования турбулентности ясного неба и улучшения безопасности авиаперевозок.

Список литературы

1. Турбулентность в свободной атмосфере / Отв.ред Л.С. Гандин.–Л: Гидрометеорологическое издательство Ленинград, 1968.– 336 с.
2. Богаткин, О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2009.–339 с.
3. Ellrod G.P., Knapp D.I. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use//Weather and Forecasting., 1992, vol.7– p. 150165
4. Технический Регламент Метеорологическое обслуживание международной авиации. Том 2. ВМО- №49, 2004.
5. Н. П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А. Р. Иванова, И. А. Горлач, Метод прогноза турбулентности в ясном небе
6. [www.nwcsaf.org/documents/20182/30813/Aviation Turbulence v1.0 no color.pdf/52fb7ca4-b8c3-4b8e-a124-6534e2e329b0](http://www.nwcsaf.org/documents/20182/30813/Aviation_Turbulence_v1.0_no_color.pdf/52fb7ca4-b8c3-4b8e-a124-6534e2e329b0)
7. Топорикова Е.Н. Топтунова О.Н. Эталонные поля давления для туманов в районе акватории Печорского моря // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: Материалы VII Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 24-26 мая 2022 года. С. 148-151
8. Ермакова Л.Н., Толмачева Н.И. Эталонные поля давления для интенсивных волн тепла в Пермском крае // Географический вестник. 2007. № 1-2 (5-6). С. 148-155.
9. Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Л.М. К вопросу обобщения гидрометеорологической информации // Известия Саратовского гос. ун-та. Новая серия. – 2004. – Т.4, № 1-2. – С. 157–161
10. Лешкевич Т.В. Автоматизированный способ прогноза вероятности турбулентности в ясном небе// Метеорология и гидрология.– 1988, № 10.– с. 44-54
11. <https://www.nwcsaf.org/web/guest/nec/geo-geostationary-archive>
12. С.В. Морозова, Е.А. Полянская, Г.А. Пужлякова, Л.М. Фетисова. К

вопросу обобщения гидрометеорологической информации / С.В. Морозова, Е.А. Полянская, Г.А. Пужлякова, Л.М. Фетисова // Саратовский государственный университет, кафедра метеорологии и климатологии.;

13. Н. П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А. Р. Иванова, И. А. Горлач, Метод прогноза турбулентности в ясном небе