



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: «Анализ метеорологических условий образования турбулентности ясного неба»

Исполнитель _____
Неровная Регина Михайловна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____
кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«29» 05 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТУРБУЛЕНТОСТЬ ЯСНОГО НЕБА.....	5
2. СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЯН.....	10
2.1 Синоптический метод.....	10
2.2 Физико-статистический метод.....	17
2.3 Метод прогноза зон турбулентности по средствам спутниковой информации.....	20
2.4 Метод прогноза умеренной и сильной турбулентности ясного неба.....	25
2.5 Метод индексов прогноза турбулентности ясного неба.....	31
3. МЕТОДЫ, ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ.....	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	57

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность ясного неба (ТЯН) — внезапная сильная турбулентность, возникающая в безоблачных регионах, которая вызывает сильные болтанки самолетов. Этот термин обычно применяется к турбулентности на большей высоте, связанной со сдвигом ветра. Наиболее полным определением является высотная турбулентность, встречающаяся за пределами конвективных облаков. Это включает турбулентность в перистых облаках, внутри и вблизи стоячих линзовидных облаков и, в некоторых случаях, в ясном небе в непосредственной близости от грозовой активности.

В результате турбулентности ясного неба самолет может получить структурные повреждения. В крайнем случае это может привести к поломке самолета. Даже при умеренной турбулентности может произойти повреждение арматуры внутри самолета, особенно в результате столкновения с незакрепленными предметами груза или пассажирского багажа.

Актуальность работы связана с тем, что экипажу воздушного судна чаще всего приходится сталкиваться с ТЯН неожиданно, поэтому так важно разрабатывать новые и совершенные методы прогноза турбулентности ясного неба.

Целью работы является исследование эффективности методов прогноза ТЯН на основе результатов гидродинамического моделирования.

Для проведения исследования сформулированы следующие задачи:

1. Знакомство с методами прогноза турбулентности ясного неба.
2. Собрать архив случаев турбулентности ясного неба.
3. Собрать данные о метеорологических величинах, необходимых для прогноза турбулентности ясного неба.
4. Разработать прогнозы ТЯН по результатам гидродинамического моделирования.

5. Анализировать полученные данные и выработать рекомендации по использованию рассмотренных методов.

Объект исследования – турбулентность ясного неба.

Предмет исследования – прогноз турбулентности ясного неба.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения.

В первой главе представлены основные сведения о турбулентности ясного неба (ТЯН) и механизмов её возникновения.

Во второй главе описаны стандартные методы прогноза турбулентности ясного неба.

В третьей главе описан собранный архив данных о наличии ТЯН, представлены результаты прогнозов по методам Гидрометцентра РФ и описаны проведённые эксперименты.

В заключение описывается проделанная работа и сформулированы выводы.

1. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ЯСНОГО НЕБА

Турбулентность – одно из наиболее опасных для авиации метеорологических явлений. Атмосфера практически всегда находится в турбулентном состоянии: воздух — это чрезвычайно подвижная среда и частицы в нем движутся хаотично. Однако есть слои атмосферы, где эти беспорядочные движения вызывают возникновение вихрей различных масштабов и различного характера, сильные порывы ветра, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Такие слои воздуха и называют турбулентными.

Влияние, оказываемое турбулентностью на воздушное судно (ВС), называется «болтанка ВС». Турбулентность ясного неба (ТЯН) является одним из наиболее опасных и наименее изученных явлений, предоставляющих угрозу полетам воздушных судов. ТЯН – малоизученная область и даже не имеет строгого теоретического описания, и знания о ней необходимо расширять. Часто пилоты не могут ее избежать, поскольку она невидима невооруженным глазом и не обнаруживается бортовыми датчиками.

Турбулентность ясного неба определяется как неровность высотных воздушных судов в регионах, лишенных значительной облачности и вдали от грозовой активности. Без предупреждения самолет может быть сильно подброшен в результате ТЯН. Любые незакрепленные предметы и не пристегнутые пассажиры, и члены экипажа могут быть разбросаны по салону, что может привести к серьезным травмам и даже летальному исходу. Часть полета, наиболее подверженная травмам от ТЯН — это крейсерская фаза на высоте более 3 километров, поскольку пассажиры и экипаж часто не пристегиваются. Было установлено, что на долю ТЯН приходится 24% авиационных происшествий, связанных с погодой, а на долю турбулентности в целом – 65% связанных с погодными условиями.

Механизмы развития ТЯН интенсивно изучались, начиная с 60-х гг. XX века, и к настоящему времени можно считать установленным, что имеются три основных разновидности механизма гидродинамической неустойчивости, порождающей ТЯН:

1. Гидродинамическая неустойчивость основного потока, стратифицированного по ветру и температуре (неустойчивость Кельвина – Гельмгольца).

Уравнение, описывающее процессы роста внутренних волн в результате неустойчивости этого вида, содержит в качестве единственного параметра число Ричардсона Ri .

$$Ri = \frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T \left(\frac{du}{dz} \right)^2},$$

где

- g – ускорение свободного падения;
- T – средняя температура слоя толщиной dz ;
- γ_a и γ – соответственно адиабатический и фактический вертикальные градиенты температуры;
- $\frac{du}{dz}$ – вертикальный градиент средней скорости вектора ветра.

Его теоретически найденное критическое значение равно $1/4$: при меньших Ri наступает быстрый рост амплитуд малых возмущений и турбулизация всего слоя, в котором $Ri < 1/4$. Размеры возникающих таким образом турбулентных слоев по горизонтали достигают 100 км и более, по вертикали – 1-1,5 км. Такие слои могут существовать довольно продолжительное время, зависящее от характера эволюции основного потока. Болтанку в таких слоях могут испытывать несколько самолетов, последовательно пролетающих через турбулентную зону.

2. Вторичная неустойчивость или неустойчивость внутренних волн в устойчивом потоке (в котором $Ri > 1/4$)

Внутренние гравитационные волны, распространяясь в атмосфере, при определенных условиях начинают расти по амплитуде, в результате чего на их гребнях возникают зоны неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (числа Ri понижаются ниже критического значения), и развивается турбулентность. Источники гравитационных волн весьма многочисленны: это неровности подстилающей поверхности, ее термические неоднородности, фронты и циклоны, грозовые очаги, струйные течения и др. Амплитуда, при которой на гребне волны появляется неустойчивость, называется критической. В результате вторичной неустойчивости образуются короткоживущие, небольших размеров турбулентные пятна («линзы» или «блины»), вкрапленные в квазиламинарный поток и переносимые этим потоком. Их протяженность не превышает немногих десятков километров по горизонтали и сотен метров по вертикали. Чем интенсивнее источники гравитационных волн, тем больше вероятность появления турбулентных пятен. С другой стороны, чем больше устойчивость стратификации (больше Ri), тем больше критические амплитуды и, значит, менее вероятно появление турбулентных пятен. Однако (и это имеет принципиальное значение) нельзя назвать такого значения Ri , при котором возможность появления турбулентных пятен исключалась бы полностью.

3. Неустойчивость критического уровня

Так называется уровень, на котором горизонтальная фазовая скорость внутренней гравитационной волны равна скорости ветра. Волна, подходя к критическому уровню, может расти по амплитуде и разрушаться с образованием турбулентности, либо приводить к появлению неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в окрестности этого уровня, что также ведет к турбулизации. В обоих случаях образуются турбулентные слои. Поскольку положение критических уровней, которые возникают в слоях со сдвигами ветра, зависит от фазовой скорости волн, а последняя должна

рассматриваться как случайная величина, вследствие неустойчивости критического уровня появляются случайным образом распределенные турбулентные зоны при больших Ri .

Таким образом, можно заключить, что зоны ТЯН в атмосфере сильно анизотропны (способны проявлять разные свойства в разных направлениях), их время жизни и размеры меняются в широких пределах, а их появление в потоке хотя и зависит от параметров последнего (прежде всего от сдвига ветра), но не полностью ими определяется.

Играют роль и свойства источников гравитационных волн. Так, повторяемость ТЯН выше над горами, которые генерируют горные волны больших амплитуд. Вследствие сильной пространственной анизотропии ТЯН нередки случаи, когда один самолет, пролетая через данный квадрат, встречает турбулентность, а другие самолеты, даже на том же эшелоне, не встречают ее. Точно так же, если один или несколько самолетов не встречают ТЯН в данном квадрате, нельзя быть уверенным, что следующий самолет не испытает болтанки.

ТЯН обнаруживается преимущественно по реакции самолётов на вертикальные движения, которые вызваны турбулентностью. Для того чтобы атмосферные турбулентные вихри вызвали болтанку самолетов, их размеры должны быть соизмеримы с размерами последних. Весьма большие вихри как бы увлекают воздушное судно в свой поток. При этом самолёт не ощущает болтанки, а вместе с потоком совершает плавное изменение высоты полета. На очень мелкие турбулентные вихри самолет также не реагирует, так как они разного знака и взаимно компенсируются. В зависимости от размеров самолета, скорости и высоты полета на него могут оказывать влияние атмосферные турбулентные вихри размером от нескольких метров до нескольких километров.

Благоприятные условия для возникновения ТЯН:

- высокая скорость ветра: чем выше скорость ветра, тем больше вероятность возникновения турбулентности;

- в зонах струйных течений, особенно по бокам от оси, над и под осью, где отмечается резкое изменение скорости ветра;
- неустойчивость атмосферы: если атмосфера неустойчива, то возможно образование воздушных потоков разной температуры, что может привести к турбулентности;
- участки с препятствиями: наличие гор и холмов, зданий и других препятствий может создавать вихри и изменять направление ветра, что также может привести к турбулентности;
- ночное время суток: турбулентность чаще возникает в ночное время, когда атмосфера становится более неустойчивой и скорость ветра увеличивается;
- высокая влажность: при высокой влажности возможно образование облачности, которая может вызвать турбулентность.

Типичные зоны ТЯН составляют приблизительно 80-500 км по направлению ветра и 20-100 км перпендикулярно к нему. По вертикали они могут простираться на 500-1000 м. Статистические исследования показали, что 71% всех зарегистрированных случаев столкновения с ТЯН произошли вблизи струйного течения. Встречи также чаще происходят над горами и континентами, чем над равнинной местностью и океанами.

2. СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЯН

Прогноз ТЯН сводится к определению в прогностических полях некоторых косвенных признаков, указывающих на повышенную (по сравнению с окружением) вероятность существования турбулентных зон. Широко распространенные в прошлом синоптические методы основаны на выделении тех участков термобарического поля, в которых возникновение ТЯН наиболее вероятно. В настоящее время в ведущих мировых прогностических центрах прогноз ТЯН дается с помощью физико-статистических зависимостей путем расчета по выходным данным прогностических моделей определенных предикторов («индексов ТЯН»), связь которых с повторяемостью болтанки самолетов доказана статистически. Хотя, с точки зрения теории, важнейшим предиктором ТЯН является число Ричардсона Ri , однако на практике его эффективность ограничена из-за низкой точности расчета по данным с недостаточным для этой цели вертикальным разрешением. Наряду с числом Ri используются другие параметры.

2.1 Синоптический метод

Суть синоптических методов прогноза атмосферной турбулентности, вызывающей болтанку самолетов, заключается в комплексном анализе приземных карт погоды и карт барической топографии разных уровней, на которых выделяются участки воздушных течений с наибольшей вероятностью болтанки.

Анализ материалов полетов попадавших в болтанку самолетов позволил установить связь болтанки с различными особенностями атмосферных полей и физических процессов и сформулировать некоторые правила для применения на практике. При этом главное внимание было

обращено на особенности барического поля на высоте полета, а также на наличие в районе полетов атмосферных фронтов, облачных полей или струйных течений, на характер адвекции, сходимости или расходимости потоков.

Определено, что точной связи болтанки от синоптического положения нет, поэтому при диагнозе и прогнозе нужно исходить не из альтернативности события, а из его вероятности, то есть привлекать дополнительные статистические характеристики, которые предусматривают прогноз с учетом некоторых других признаков. Окончательное заключение о возможности возникновения такого сложного явления, как турбулентность ясного неба, не может быть получено только путем оценки синоптических и статистических характеристик. Поэтому, при диагнозе и прогнозе болтанки летательных аппаратов нужно исходить из синоптического положения, статических характеристик и особенностей физико-метеорологических процессов, при которых происходит полет.

Исследование характера барического поля при болтанке самолетов позволило определить характерные области, в которых интенсивная турбулентность встречается более часто. Первый подробный анализ синоптических условий ТЯН выполнен И.Г. Пчелко [1]. Согласно его исследованиям, турбулентность при ясном небе следует прогнозировать, когда по маршруту полета встречается одна из характерных синоптических ситуаций, в которой болтанка наиболее вероятна.

Существует пять типов синоптических ситуаций, наиболее благоприятных для возникновения турбулентности.

Первый тип барического поля характеризуется наличием глубокой высотной ложбины, в которой можно выделить отдельный циклон.

Зоны наиболее сильной болтанки в этом случае находятся обычно в области сильной расходимости или сходимости изогипс (потоков) (рисунок 2.1). Скорость ветра в зонах болтанки составляет около 100-150 км/ч, а средние значения горизонтальных (боковых) сдвигов ветра, как правило,

превышают 15-20 км/ч на 100 км. В области сходимости изогипс граница зоны с наибольшей вероятностью болтанки расположена непосредственно от приземной линии холодного фронта до оси ложбины. В области сходимости изогипс преобладает умеренная болтанка, а в области расходимости изогипс - сильная болтанка. По данным И.Г. Пчелко, при резко выраженной сходимости потока, сильном ветре и значительном сдвиге ветра вероятность встречи с интенсивной болтанкой повышается.

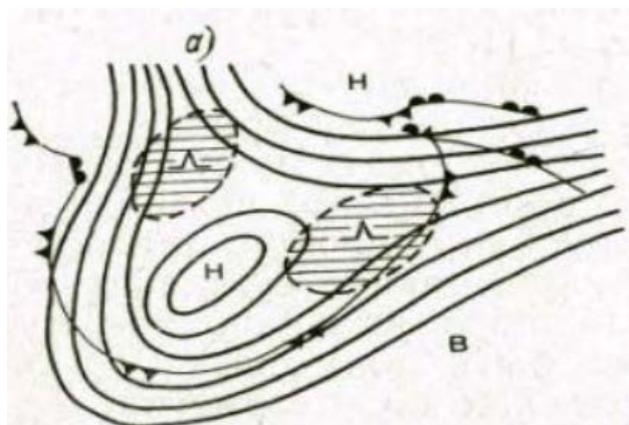


Рисунок 2.1 – Барическое поле, выраженное глубокой высотной ложбиной [1]

Второй тип барического поля характеризуется высотным циклоном (рис 2.2).

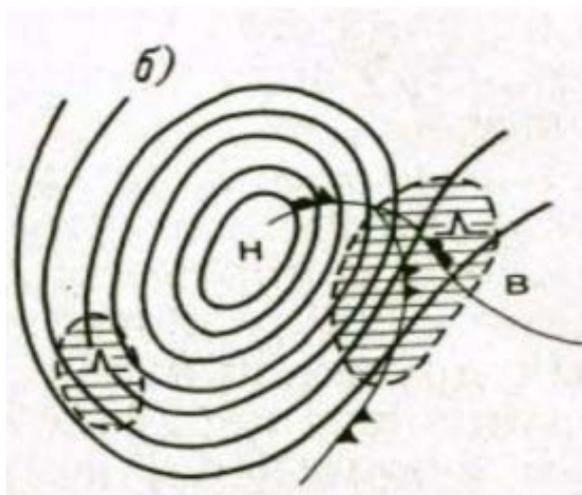


Рисунок 2.2 – Барическое поле, способствующее возникновению ТЯН – высотный циклон [1]

При этом типе поля также имеются две зоны, в которых болтанка встречается наиболее часто.

В первой зоне, находящейся в тыловой части циклона, болтанка, как правило, умеренная; скорость ветра 100-120 км/ч, наблюдается незначительная сходимость изогипс.

Вторая зона болтанки располагается в передней части циклона в области сильной расходимости изогипс и больших горизонтальных сдвигов ветра. Скорость ветра 100-150 км/ч, а горизонтальные сдвиги на отдельных участках могут превышать 50 км/ч на 100 км. На приземной синоптической карте этой зоне соответствует теплый сектор циклона и прилегающие к нему участки шириной 100-200 км за холодным и впереди теплого фронтов. Интенсивность болтанки здесь может превышать умеренную.

Третий тип характеризуется тем, что болтанка наблюдается в передней части ложбины, несколько правее ее оси в области расходимости изогипс. Болтанка может достигать умеренной интенсивности. Особенно большая вероятность возникновения болтанки при углублении ложбины. Скорость ветра здесь обычно не превышает 100 км/ч, а боковые сдвиги ветра незначительны (рис 2.3).

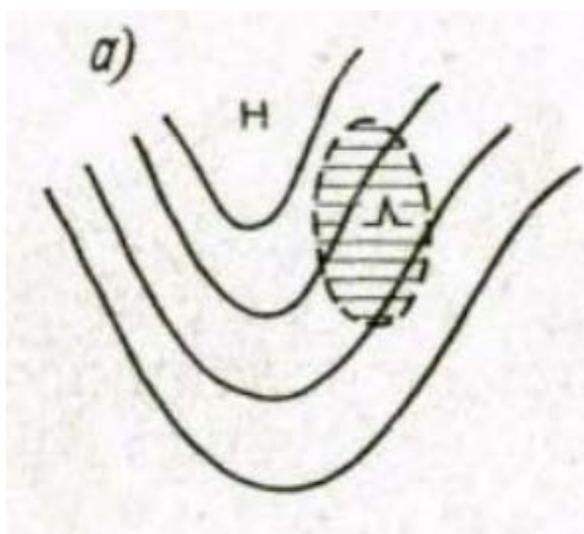


Рисунок 2.3 – Барическое поле, способствующее возникновению ТЯН
–передняя часть ложбины [1]

Четвертый тип барического поля также выражен ложбиной, но зона болтанки расположена в тыловой части ложбины в области сходимости изогипс. Скорость и боковые сдвиги ветра такие же, как и в предыдущем случае, и составляют 80-100 и 5-10 км/ч на 100 км. По интенсивности болтанка здесь может быть значительной (рисунок 2.4).

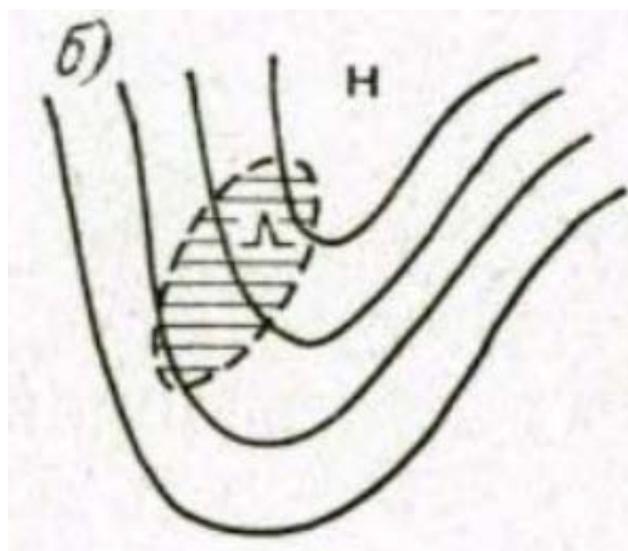


Рисунок 2.4 – Барическое поле, способствующее возникновению ТЯН
–тыловая часть ложбины [1]

Пятый тип барического поля выражен высотным гребнем (рисунок 2.5).

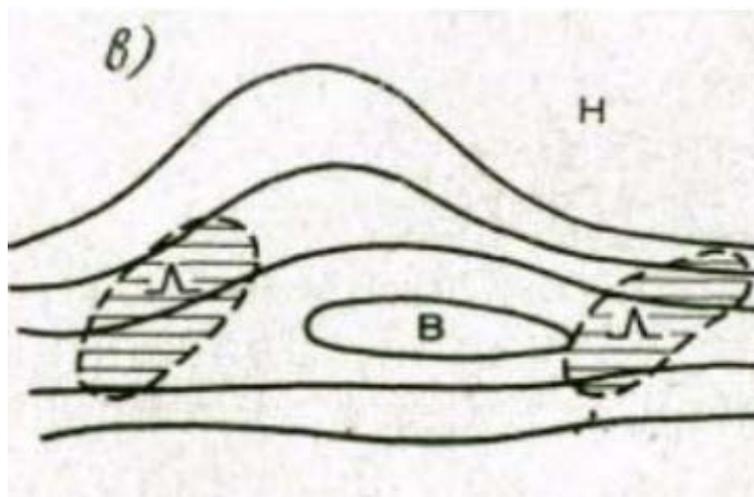


Рисунок 2.5 – Барическое поле, способствующее возникновению ТЯН
– область высотного гребня [1]

В нем также можно выделить две зоны болтанки. Одна зона расположена в передней, а другая - в тыловой части гребня. Вероятность встречи с болтанкой в тыловой части гребня выше, чем в передней части. Скорость ветра обычно незначительна и редко превышает 40-60 км/ч. Боковые сдвиги ветра в области высотного гребня, как правило, равны 10-15 км/ч на 100 км. Интенсивность болтанки в этих зонах умеренная или слабая, хотя иногда при более сильном ветре (до 100 км/ч) отмечается и сильная болтанка.

Так как однозначной связи между турбулентностью самолета и синоптическим положением на высоте полета нет, следует учитывать дополнительные признаки существования зон болтанки:

1. Холодные фронты 1-го и 2-го родов на приземной карте. Повторяемость болтанки на холодных фронтах наибольшая по сравнению с другими атмосферными фронтами. Болтанка на холодных фронтах не наблюдается в тех случаях, когда они слабо выражены или когда горизонтальный градиент температуры во фронтальной зоне менее 20°С на 100 км, а горизонтальный градиент скорости ветра - менее 20 км/ч на 100 км.

2. Теплый фронт или фронт окклюзии, связанные с тропосферными или стратосферными струйными течениями и имеющими горизонтальные градиенты скорости ветра более 20 км/ч на 100 км, а горизонтальные градиенты температуры более 2 °С на 100 км.

3. Высокотропосферные или стратосферные струйные течения.

Показателями болтанки, связанной со струйными течениями, являются:

- скорость ветра более 25 м/с;
- вертикальный градиент скорости ветра более 10 м/с на 1 км высоты, горизонтальный градиент скорости ветра >5 м/с на 100 км;
- изменение направления ветра с высотой более чем на 15° на 1 км высоты.

4. Периферия циклона, ложбина, гребень. При наличии этих форм барического поля повторяемость болтанки наибольшая. Если полет самолета происходит вблизи или внутри указанных барических образований, то необходимо особенно тщательно учитывать признаки возникновения турбулентности, вызывающей болтанку ВС. Наиболее благоприятные условия для возникновения болтанки связаны с глубокими ложбинами, которые продолжают углубляться. Часто информацию о болтанке можно получить от экипажей, выполняющих полеты на периферии циклонов. Анализ показал, что на западной и юго-западной периферии циклонов случаев болтанки в среднем в 1,5 раза больше, чем на восточной и северо-восточной периферии. Велика вероятность возникновения болтанки на юго-западной периферии углубляющихся циклонов при адвекции холода и сходимости изогипс. Сравнительно высокую повторяемость болтанки на периферии антициклона и особенно в гребне можно объяснить тем, что, согласно Партлу, в этих барических формах в непосредственной близости друг от друга могут находиться воздушные течения с различной скоростью.

5. Наличие облачности на высоте полета. Установлено, что повторяемость болтанки самолетов при наличии облачности на эшелоне полета в несколько раз больше, чем при безоблачном небе.

6. Адвекция холода, при которой наиболее часто наблюдается болтанка ВС.

7. Значительное усиление ветра на эшелоне полета по результатам двух соседних зондирований атмосферы в интересующем районе. Установлено, что если за критерий усиления ветра принять изменение скорости ветра на 10 м/с и более за 6 ч, то болтанка наблюдается примерно в 70% случаев, а если критерием является усиление ветра на 20 м/с и более за 6 ч, то повторяемость болтанки составляет около 75%. При слабом ветре на высоте полета (до 15 м/с) болтанка обычно встречается в зонах больших боковых сдвигов ветра на циклонической стороне струйных течений.

2.2 Физико-статистический метод

Основным при физико-статистическом методе прогноза турбулентности является определение пороговых значений параметров с помощью графиков, номограмм и эмпирических зависимостей.

Синоптический метод прогноза болтанки самолетов является качественным, поэтому практический интерес представляет диагноз и прогноз болтанки самолетов путем одновременного учета нескольких количественных критериев. Основу при этом должны составлять данные температурно-ветрового зондирования атмосферы. Подобный учет производится путем отыскания статистических связей между количественными критериями состояния атмосферы и фактом наличия или отсутствия болтанки.

Рассмотрим два метода диагноза и прогноза болтанки самолетов по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы: графический метод и метод комплекса критериев.

А) Графический метод – его основа строится на том, что турбулентность, вызывающая болтанку самолетов, обусловлена только вертикальными градиентами скорости ветра, направления ветра и температуры воздуха.

Суть графического метода – построить вертикальные профили скорости, направления ветра и температуры воздуха, и для каждого линейного участка профиля вертикальные градиенты соответствующих метеорологических величин будут характеризоваться наклоном рассматриваемого участка кривой распределения к горизонтальной оси. Чем меньше угол наклона между построенными кривыми и горизонтальной осью, тем больше вертикальный градиент данной метеорологической величины.

В качестве критериев при диагнозе и прогнозе болтанки используется понятие критических значений вертикальных градиентов. За критические вертикальные градиенты (на 1 км высоты) установлены соответствующие:

- для скорости ветра 10 м/с;
- для направления ветра 15°;
- для температуры 7°С.

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 и сравнивается с критическим значением. Для удобства расчетов можно так подобрать масштаб, что для всех трех величин критический угол наклона окажется одинаковым. С этой целью, произвольно выбрав масштаб по вертикали для высоты и одной из трех величин (например, для скорости ветра) по горизонтали, необходимо подобрать масштаб для двух других величин таким образом, чтобы отрезку, соответствующему 10 м/с на оси скорости ветра, соответствовал отрезок на оси направления ветра равный 15°, а на оси температуры - отрезок, равный 7 °С. После этого на график вертикального распределения ветра и температуры воздуха следует нанести сетку, наклон которой будет соответствовать критическим значениям вертикальных градиентов.

Теперь прогноз болтанки самолетов сведется к сравнению наклона стандартных линий сетки и наклона исследуемого участка профиля. Это осуществляется таким же образом, как и определение устойчивости стратификации с помощью аэрологической диаграммы или при определении характера адвекции на совмещенной карте АТ-700 и ОТ 500/1000. Однако в отличие от аэрологической диаграммы в данном случае «характер устойчивости» определяется отдельно для каждого вертикального профиля. Наличие «неустойчивости» одного из вертикальных профилей является признаком существования турбулентности, благоприятной для возникновения болтанки. Если в каком-нибудь слое «неустойчивость» обнаруживается по вертикальным профилям двух величин, то это служит указанием на большую вероятность болтанки (рисунок 2.6).

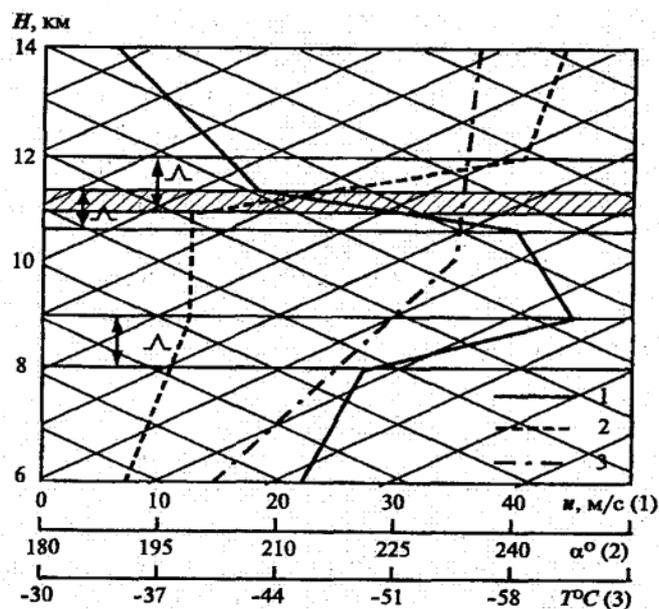


Рисунок 2.6 - Графический метод прогноза болтанки самолетов [1]

Основное достоинство графического метода – высокая оперативность. Его целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо получить картину вертикального распределения слоев повышенной турбулентности и болтанки самолетов для всех высот в определенном районе.

Б) Метод комплекса критериев – по данным температурно-ветрового зондирования определяются шесть критериев турбулентности:

- скорость ветра 25 м/с и более;
- 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°C на 1 км;
- горизонтальный градиент температуры воздуха 2°C на 100 км.

Если на высоте полета одновременно выполняются не менее трех любых критериев, то следует указывать болтанку.

Перед определением зон болтанки самолетов методом комплекса критериев необходимо разделить маршрут полета на участки длиной 300-400 км (2-3 см на картах барической топографии), приняв за узловые точки пункты, в которых производится температурно-ветровое зондирование

атмосферы. После по данным зондирования рассчитываются вертикальные и горизонтальные градиенты температуры и ветра для каждого участка трассы на эшелоне полёта и оценивается скорость ветра на заданной высоте. В зависимости от числа параметров, значения которых превышают критические, дается прогноз болтанки самолетов на заданном участке. Горизонтальные градиенты температуры и ветра определяются по карте барической топографии, ближайшей к эшелону полета, а вертикальные градиенты - по картам барической топографии, между которыми находится эшелон.

2.3 Метод прогноза зон турбулентности по спутниковой информации

Турбулентность в ясном небе наблюдается преимущественно на фоне нижележащего облачного покрова при небольшом количестве в нем облаков (до 2—5 баллов). Наиболее часто турбулентность отмечают в зоне, фронтальной облачной полосы, на периферии облачности струйного течения, в облачности, связанной, с горными волнами (волнистые облака), на границе сплошной облачности с обширными областями ясного неба и на больших, пространствах, занятых конвективной облачностью (особенно открытыми ячейками). Наиболее развита турбулентность в районах, в которых наблюдается мощная кучевая и кучево-дождевая облачность.

Существуют некоторые методы вычисления турбулентности при помощи спутников.

А) Оценить возможность возникновения интенсивной турбулентности, можно при помощи распознавания на снимках ИСЗ (искусственный спутник Земли) метеорологических объектов и знание синоптических условий ее возникновения.

Если на фотографиях, полученных с ИСЗ, прослеживаются фронтальные зоны, струйные течения и кучево-образная облачность, то в этих областях можно ожидать зоны интенсивной турбулентности.

Б) Анализ данных наблюдений за собственным излучением поверхности в диапазоне 8-12 мкм, которые получены с метеорологических спутников.

Уходящее излучение, фиксируемое аппаратурой ИСЗ (искусственный спутники Земли) в указанном спектральном диапазоне, позволяет не только обнаруживать облака или лед на фоне подстилающей поверхности, но и получить информацию о температурных неоднородностях самой излучающей поверхности, в частности, верхней границы облаков. Это решается с помощью компьютеров. Индикация пульсаций радиационной температуры облачной поверхности, которая вызвана вертикальными движениями воздуха, может быть применена в качестве первичной информации для оценки структурно-энергетических характеристик турбулентности на уровнях, близких к высоте верхней границы облаков.

В) В качестве исходной информации используются данные зондирования атмосферы радиометром SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8–10 с временным интервалом 15 мин, поступающие по каналам связи из НИЦ «Планета» в НПО «Тайфун».

Суть метода, состоит в определении кинематических характеристик случайного поля статистическими методами. Под случайным полем $U(x, y, z, t)$, где x, y, z — оси декартовой системы координат $Oxyz$ (положительное направление x — на восток, y — на север, z — в зенит), t — время, понимается собственное излучение атмосферы, принимаемое спутниковой аппаратурой. В дальнейшем будем рассматривать метод применительно к зондированию атмосферы в канале водяного пара 6,2 мкм. Этот канал имеет максимум весовой функции для условий средних широт на уровне приблизительно 350 гПа. При этом полуширина весовой функции составляет около 300 гПа). Таким образом, можно считать, что эффективный излучающий слой атмосферы в условиях средних широт для этого канала заключён между уровнями 200 и 500 гПа. В тропических широтах

эффективный излучающий слой расположен несколько выше. Поле $U(x, y, z, t)$, как известно, определяется полями концентрации водяного пара и температуры $T(x, y, z)$. Собственное излучение атмосферы, принимаемое радиометром SEVIRI в каналах водяного пара, будет определяться главным образом полем концентрации водяного пара. Будем считать, что водяной пар движется вместе с воздушной средой так, что его перемещение в пространстве полностью отражает кинематические характеристики движения среды. Расчёт этих характеристик в некоторой системе координат основан на отождествлении возмущений U в разные моменты времени. При этом используется естественное свойство случайных полей сохранять в течение некоторого времени свою структуру.

Согласно общему подходу к определению кинематических характеристик случайного поля статистическими методами в движущейся сплошной среде для случайных полей любой природы, для некоторой точки M' малого элемента объёма сплошной среды с центром в точке M вектор скорости $V(M')$ можно представить выражением:

$$V(M') = V(M) + \Omega \times \rho + E\rho, \quad (2.1)$$

где

- ρ — вектор смещения из точки M в точку M' ;
- E — тензор скоростей деформации;
- Ω — вектор вихря скорости движения воздушной среды, т. е. мгновенная угловая скорость вращения главных осей тензора скоростей деформации.

В этом выражении первые два слагаемых описывают движение выделенного объёма среды как твёрдого тела ($V(M)$ — перенос, $\Omega \times \rho$ — вращение) в пространстве; третье слагаемое, содержащее тензор E , описывает отличие этого движения от движения твёрдого тела. Если $E \neq 0$, элемент объёма деформируется со скоростью временной эволюции V_e ,

несколько изменив свою структуру, например за счёт турбулентной диффузии.

Выделение желаемого элемента объёма среды с центром в точке (x, y, z) осуществляется трёхмерным оператором H , представляющим собой пространственную весовую функцию и играющим роль фильтра верхних пространственных частот. Процедура отождествления выделенных таким образом областей поля U в моменты времени t_1 и t_2 может заключаться в нахождении глобальных экстремумов взаимных статистических характеристик (например, структурной функции) путём вариаций пространственных сдвигов. Не затрагивая здесь вопросы вычисления переносной скорости и завихренности, опишем метод вычисления скорости временной эволюции поля, V_e , обусловленной его «незамороженностью», который основан на анализе эллипсоида пространственных сдвигов (Бабий, 1983) [2]. В предположении изотропности временной эволюции поля можно определить радиус эквивалентной сферы (r_e), объём которой равен объёму эллипсоида. Тогда скорость V_e вычисляется как:

$$V_e = \frac{r_e}{\tau}, \quad (2.2)$$

где

$$\tau = t_2 - t_1.$$

Данные измерений, получаемые в каждом канале водяного пара радиометра SEVIRI, могут интерпретироваться как изображения (снимки) двумерного случайного поля $U(x, y, t)$. Использование модели двумерного случайного поля $U(x, y, t)$ для условий верхней тропосферы вполне оправдано. «Незамороженность» случайного поля и турбулентная диффузия являются различными проявлениями одного и того же процесса — временной эволюции поля (Бабий, 1983) [2]. Поэтому естественно предположить существование связи между скоростью эволюции V_e и коэффициентом турбулентной диффузии K_d . Интерпретируя V_e как

приращение радиус вектора L диффундирующего пятна в единицу времени ($V_e = dL/dt$), для двумерной модели диффузии получаем формулу:

$$K_d = aV_eL, \quad (2.3)$$

где

a — безразмерный коэффициент, приблизительно равный единице.

Для нахождения скорости временной эволюции поля и коэффициента турбулентной диффузии строится сечение пространственной структурной функции на уровне минимума пространственно-временной структурной функции и определяется его площадь в пикселях. С учётом искажения земной поверхности на снимке вычисляется радиус круга, эквивалентного по площади сечению пространственной структурной функции, r_e , и коэффициент турбулентной диффузии, равный согласно выражениям (2.2) и (2.3):

$$K_d = \frac{r_e^2}{\tau}, \quad (2.4)$$

Значение a принимается равным единице. Получаемое таким способом значение K_d можно интерпретировать как коэффициент горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии, при этом для расчётной пространственной области при $\tau = 15$ мин априорная погрешность расчёта K_d лежит в пределах $(3,2-6,4) \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$ (рисунок 2.7).

При наличии определенных технических средств и математического обеспечения вероятно не только качественная, но и количественная оценка турбулентного состояния атмосферы согласно данным спутниковой информации.

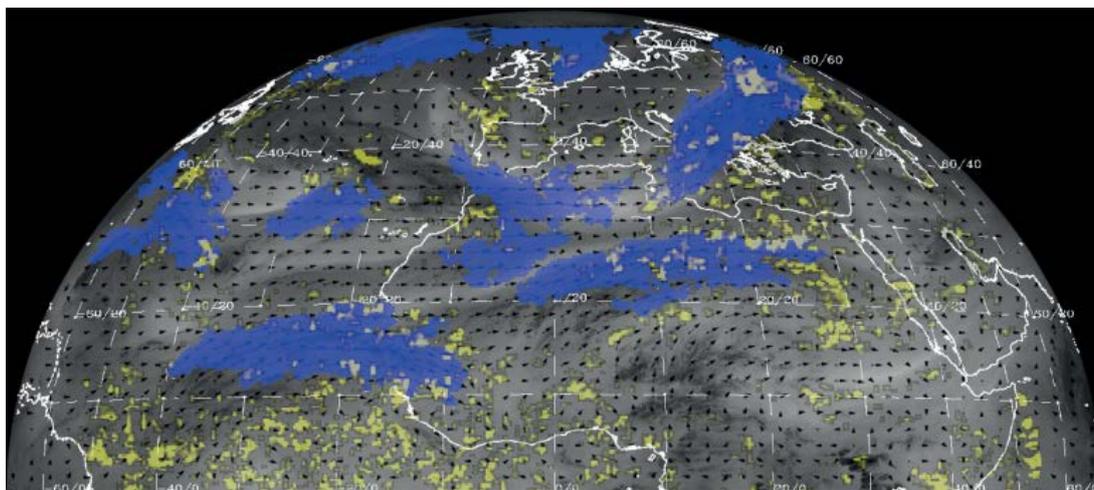


Рисунок 2.7 – Рассчитанное поле вектора скорости горизонтального ветра (чёрные стрелки), области струйных течений (синий цвет) и зоны турбулентности (жёлтый цвет) с $K_d \geq 105 \text{ м}^2/\text{с}$ для 13:00 UTC 01.12.2017 [3]

2.4 Метод прогноза умеренной и сильной турбулентности ясного неба

С точки зрения теории, важнейшим предиктором ТЯН является число Ri , однако на практике его эффективность ограничена из-за низкой точности расчета по данным с недостаточным для этой цели вертикальным разрешением. Наряду с числом Ri используются другие параметры.

В СССР в 1980-е годы на основе очень большой выборки данных (более 22 000 рапортов пилотов о наличии ТЯН) была разработана схема прогноза ТЯН с учетом топографии поверхностей 400 и 300 гПа (автор – Т.В. Лешкевич) [4]. Был создан алгоритм классификации ситуаций, основанный на критериях, учитывающих конфигурацию изогипс, конфигурацию и структуру струйного течения, особенности поля температуры. Для каждого из 9 классов была получена дискриминантная функция от трех предикторов, характеризующих температурно-ветровую стратификацию. Кроме того, путем учета географического распределения природной повторяемости ТЯН, производилась детализация схемы по степени влияния орографии и других региональных факторов. По объему использованного статистического материала, детальности и статистической обеспеченности прогностических

зависимостей эта схема, в ее диагностическом варианте, до сих пор остается непревзойденной.

В поисках оптимальных алгоритмов для расчета показателей ТЯН по прогностическим данным, утраченная схема Лешкевич была восстановлена. Удалось провести расчеты для области, для которой указанная схема была реализована, а также для Северного полушария. Однако расчеты показали, что региональная зависимость природной повторяемости ТЯН является решающим фактором, обеспечивающим успешность схемы. А поскольку эта зависимость за пределами области, рассматриваемой Т.В. Лешкевич, нам неизвестна, распространить схему на все полушарие не удастся. Поэтому, с учетом вероятности неэффективной работы схемы при ее распространении на полушарие и ориентировке на современные численные модели, параллельно были разработаны программы расчета индексов ТЯН, используемых в мировых прогностических центрах Великобритании – УКМО, а также в метеослужбах США и Канады. Для практического использования предполагалось выбрать тот метод, который бы обеспечивал наилучшее разделение случаев наличия и отсутствия ТЯН на выборках фактических самолетных данных о болтанке. Информация о наличии либо отсутствии ТЯН извлекалась из данных в коде AMDAR, поступающих из систем измерений, установленных на самолетах, летающих над территорией США и Канады. Именно эта техника измеряет турбулентность в единицах, предписанных Техническим регламентом ВМО. В нем также дается интерпретация данных о максимальной и мгновенной EDR (скорости вихревой диссипации, измеряемой самолетными пульсационными датчиками, в терминах «индекса турбулентности» (таблица 2.1).

На основании этих данных ВМО рекомендует следующие связи индексов наблюдаемой турбулентности и данных EDR с интенсивностью ТЯН.

Таблица 2.1 – Индекс турбулентности, определяемый средним и максимальным значением EDR ($\text{м}^{2/3} \text{с}^{-1}$), затемненные ячейки соответствуют сильной турбулентности. [5]

Средние EDR	Максимальное значение EDR							Отсутствие показаний
	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,8	>0,8	
<0,1	0	1	3	6	10	15	21	
0,1-0,2		2	4	7	11	16	22	
0,2-0,3			5	8	12	17	23	
0,3-0,4				9	13	18	24	
0,4-0,5					14	19	25	
0,5-0,8						20	26	
>0,8							27	
Отсутствие показаний								28

Турбулентность следует считать:

А) сильной, когда индекс турбулентности равен 15–27 (максимальное значение EDR превышает 0,5);

Б) умеренной, когда индекс турбулентности равен 6–14 (максимальное значение EDR удовлетворяет соотношению 0,3

В) слабой, когда индекс турбулентности равен 1–5 (максимальное значение EDR равно 0,1–0,3);

Г) нулевой, когда индекс турбулентности равен 0 (максимальное значение EDR <0,1).

С учетом малой природной повторяемости ТЯН и ее влиянии на полет ВС, были отобраны только случаи, относящиеся к умеренной или сильной турбулентности, то есть те, где соблюдалось условие $\text{EDR} > 0,3$. Таких случаев в окончательной выборке данных AMDAR, разнесенных по квадратам сетки объективного анализа (общим количеством 75281), оказалось 1235.

Анализ данных AMDAR показал, что индексы ТЯН (DVSI – deformation vertical shear index и индекс Даттона), оперативно используемые

в ведущих прогностических центрах, являются значимыми предикторами повышенной повторяемости ТЯН и, следовательно, могут быть использованы в технологии производства карт SWH и SWM в ГУ «Гидрометцентр России». Причем индекс DVSI, используемый в США и Канаде, показал более высокую информативность как предиктор ТЯН, в сравнении с индексом Даттона (E), используемым в УКМО. Индекс DVSI представляет собой произведение горизонтальной деформации ветра, его вертикального сдвига и скорости, нормализованной на ее характерное значение, как это видно из следующих выражений:

$$DVSI = (DEF) \times (VS) \times \frac{V}{45}, \quad (2.5)$$

где

$$DEF = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} - \text{горизонтальная деформация ветра;}$$

$$VS = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} - \text{вертикальный сдвиг ветра.}$$

Авторами [5] был предложен следующий алгоритм расчета карты зон ТЯН в цифровом виде.

В качестве исходных данных для расчета используются прогностические поля ветра с шагом 1,25 градуса по широте и долготе (согласно требованиям Технического регламента ВМО) глобальных моделей, оперативно функционирующих в ГУ «Гидрометцентр России»:

- глобальной спектральной модели в конфигурации T85L31;
- полулагранжевой глобальной модели атмосферы ПЛАВ на всех уровнях, начиная с 850 гПа.

Порядок расчета следующий.

1. Расчет значений DVSI производится на поверхностях 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 и 70 гПа по всей области. Уровни 850 и 70 гПа необходимы для построения в дальнейшем профиля DVSI в слоях 700–400 гПа (средние уровни) и 400–100 гПа (верхние уровни атмосферы). Величина DVSI рассчитывается с помощью кубической сплайн-аппроксимации зависимости составляющих скорости ветра от горизонтальной и вертикальной координат.

2. На вертикальном профиле в каждом узле сетки определяется наличие значений DVSI, превосходящих критические, хотя бы на одном уровне. Критическое значение индекса $DVSI_{кр}$, разделяющее условия наличия и отсутствия ТЯН, были определены на большом материале авторских испытаний. Оказалось, что из-за занижения скоростей ветра в глобальных моделях прогностические пороговые значения $DVSI_{кр}$, выработанные по принципу соответствия площадей ТЯН в анализе и прогнозе, гораздо ниже диагностических. Критическое DVSI при расчете по прогностическим полям T85L31 предлагается равным 12, при расчете по прогностическим полям ПЛАВ – равным 15.

3. Формируется файл результатов расчета, каковыми являются значения верхней и нижней границ слоя сверхкритических DVSI в каждом узле сетки. Если для данного узла не найдено сверхкритических DVSI ни на одном уровне, то для такого узла в файл расчетов заносится нуль. Если же данному узлу сетки соответствуют сверхкритические DVSI на одном или нескольких уровнях, то производится построение непрерывного профиля DVSI в слое 850-70 гПа с помощью кубических сплайн-функций. Затем определяются уровни, на которых DVSI переходит через критическое значение: эти уровни имеют смысл верхней и нижней границ слоя повышенной вероятности умеренной и сильной ТЯН над данным узлом. Высоты указанных уровней заносятся в файл результатов, в зависимости от их значения – для верхних или для средних уровней. В качестве аргумента в сплайн-функциях используется давление, а высоты границ слоя

записываются в единицах FL (гектофутах) в соответствии с Техническим регламентом ВМО.

По результатам авторских испытаний, для оперативной проверки качества прогноза ТЯН были предложены обе отечественные глобальные модели. Модель УКМО, показавшая наилучшие результаты, не годится для оперативного применения вследствие грубого горизонтального разрешения данных, доступных в ГУ «Гидрометцентр России» ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$). Для сравнения были проведены расчеты по модели NCEP на одноградусной сетке, которая в настоящее время тоже не может быть использована в оперативной работе ЛЗП (линии заданного пути) из-за недостаточно своевременного поступления данных по каналам связи.

Оперативные испытания метода предусматривали расчет условий возникновения ТЯН, определяемых через пороговые значения индекса DVSI, рассчитываемого при использовании полей, составляющих скорости ветра по территории Северного полушария и России по выходным данным моделей T85L31 и ПЛАВ с заблаговременностью 24 ч. В базу данных записывались поля результатов расчетов на каждой из изобарических поверхностей в дихотомических переменных: 0 означает невыполнение условий, 1 – выполнение. Параллельно рассчитывались аналогичные поля по данным объективного анализа. Для оценки точности прогноза сравнивались результаты расчета в узлах сетки по прогностическим полям и по полям объективного анализа на указанных выше изобарических поверхностях. Рассчитывались следующие характеристики успешности: оправдываемость прогнозов наличия явления, отсутствия явления, общая оправдываемость, предупрежденность наличия и отсутствия явления, критерии Пирси–Обухова и Хайдке–Багрова. Расчеты выполнялись по каждой изобарической поверхности (700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 и 100 гПа). Результаты расчетов по прогностическим полям ветра отечественных моделей сравнивались с расчетами по данным оперативного объективного анализа на

сетке с шагом 1,25 градусом, а для модели NCEP – с ее собственным анализом на одноградусной сетке.

Результаты испытаний показали, что успешность прогнозов зон ТЯН по модели ПЛАВ (версия 2008 года) превышает аналогичные показатели модели T85L31 ввиду более существенного занижения скоростей сильных ветров в тропосфере и нижней стратосфере в прогнозах T85L31. Наиболее высокие показатели обеспечивала модель NCEP. Отметим, что у всех сравниваемых моделей успешность прогнозов зон ТЯН на изобарической поверхности 100 гПа была низкой из-за слишком малой повторяемости случаев умеренной и сильной турбулентности в ясном небе на этом уровне.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета на своем заседании 1 декабря 2009 года одобрила представленный метод прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе, а также рекомендовала ГУ «Гидрометцентр России» внедрить его на базе полулагранжевой глобальной модели в оперативную практику в качестве основного и использовать в технологии выпуска карт особых явлений погоды на верхних и средних уровнях атмосферы заблаговременностью до 30 ч для метеорологического обеспечения авиации.

2.5 Метод индексов прогноза турбулентности ясного неба.

Существует несколько индексов для прогнозирования ТЯН:

- *TI1*, который учитывает горизонтальную деформацию и вертикальный сдвиг ветра;
- *TI2*, который похож на *TI1*, но включает в себя конвергенции.

Overeem (2002) [6] использовал данные численной модели и рассчитал упомянутые индексы, а также вертикальный сдвиг ветра, горизонтальный сдвиг ветра и только фронтогенез, чтобы проверить их достоверность с помощью отчетов PIREP (пилотные отчеты) и AMDAR (Aircraft

Meteorological Data Relay/Петрoнсляция метеорологических данных воздушным судном). Результаты этого исследования показали, что $TI2$ показал наилучшие результаты, хотя большинство индексов переоценивают площади ТЯН, давая значительные коэффициенты ложной тревоги. Это, вероятно, связано с микромасштабной природы ТЯН. В 44-летнем климатологическом исследовании индексов ТЯН над Северным полушарием (Jaeger and Springer 2007 [7]), использовались TII , Ri , частота Брента-Вяйсяля и отрицательные потенциальные вихри (это скалярная характеристика точки, показывающие, как вращение воздуха связано с толщиной вращающегося слоя между изоэнтропическими поверхностями).

До сих пор индексы TI находятся в оперативном использовании в авиационных бюро прогнозирования в нескольких странах, например, в голландском KNMI (Королевский метеорологический институт Нидерландов) (Overeem 2002[6]) используется TII , в шведском SMHI (Шведский метеорологический и гидрологический институт) (Bergman 2001[8]) используется $TI2$, а Британская метеорологическая служба также внедрила эти индексы (Turp и Gill 2008[9]). Индексы популярны благодаря своей производительности, скорости вычислений и простоте применения. В ходе дальнейшего усовершенствования TII добавлен член тренда дивергенции, чтобы учесть быстрые изменения дивергенции, связанные с антициклоническим сдвигом и гравитационными волнами в циклонических областях (Ellrod and Knox 2010 [10]).

Одним из компонентов индексов TI , разработанных Эллродом и Кнаппом (1992) [11], является горизонтальная деформация (DEF , раздел 2.4, уравнение (2.5)).

В случае $TI2$ включается член сходимости CVG уравнение (2.6). Когда линии течений воздушных слияний или когда воздух замедляется, как в случае с областью выхода струи, происходит конвергенция. Поскольку предполагают, что воздух в атмосфере является несжимаемым, область конвергенции будет давать поднимающийся или опускающийся воздух в

этих областях. Конвергенция в верхней тропосфере приводит к опусканию воздуха и может создавать гравитационные волны в области тропопаузы, что может вызвать неустойчивость Кельвина – Гельмгольца.

$$CVG = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) , \quad (2.6)$$

Индексы $TI1$ и $TI2$ получены для интенсивности фронтогенеза, представленного в уравнении (2.7).

$$I_f = |\nabla\theta| \times 0.5 \times (DEF \times \cos(2\beta) + CVG) , \quad (2.7)$$

где

- I_f — интенсивность фронтогенеза;
- $\nabla\theta$ — градиент потенциальной температуры
- β — угол от оси дилатации к изотермам потенциальной температуры.

Уравнение аппроксимируется для поверхности с постоянным давлением, где A_T интенсивность фронтогенеза на этой поверхности. Градиент потенциальной температуры аппроксимируется градиентом ощутимой температуры с n - осью перпендикуляра к изотермам (Ellrod and Knapp 1992 [11], Mancuso and Endlich 1966 [12]), уравнение (2.8).

$$|\nabla\theta| = \frac{\partial T}{\partial n} , \quad (2.8)$$

Это означает, что коэффициент между потенциальной температурой и ощущаемой температурой приближенно равен 1, но согласно уравнению (2.9) потенциальной температуры воздуха, на изобарических уровнях между 500 и 150 коэффициент может варьироваться между 1,2 и 1,7. (Overeem 2002 [6]) также указывает, что температурная аппроксимация сомнительна.

$$\theta = T \left(\frac{1000}{\rho} \right)^{0.286}$$

(2.9)

Вышеупомянутые приближения дают уравнение (2.10):

$$A_T = \frac{\partial T}{\partial n} \times 0.5 \times (DEF \times \cos(2\beta) + CVG) \quad (2.10)$$

Отношение термического ветра, приведенное в уравнении (2.11):

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{fT}{g} \times \frac{\Delta U}{\Delta z} \quad (2.11)$$

где

- f — параметр Кориолиса;
- g — ускорение силы тяжести;
- $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ — вертикальный сдвиг ветра = VS.

Данные из уравнения (2.11) подставляем в уравнение (2.10). Эллрод и Кнапп [11] также аппроксимируют косинусный член к 1, максимизируя деформационный член, это дает уравнение (2.12)

$$A_T = \frac{fT}{g} \times VS \times 0.5 \times (DEF + CVG) \quad (2.12)$$

Приведенное выше уравнение предполагает, что фронтогенез приведет к увеличению вертикального сдвига ветра, что повышает риск возникновения ТЯН. Mancuso, R.L. и R.M. Endlich, (1966) [12] обнаружили, что произведение вертикального сдвига ветра и деформации дает наилучшую корреляцию с возникновением ТЯН - 0,43 -0,48. Таким образом, Эллрод и

Кнапп [11] упростили (2.12) и определили индекс турбулентности TII как уравнение (2.13).

$$TII = VS \times DEF \quad (2.13)$$

Элрод и Кнапп [11] также определили второй индекс турбулентности, который учитывает член конвергенции, который можно увидеть в уравнении (2.14)

$$TII2 = VS(DEF + CVG) \quad (2.14)$$

TII и $TII2$ используется в оперативном авиационном прогнозировании в нескольких странах и пользуется популярностью благодаря своим хорошим характеристикам, простоте определения и экономичности вычислений. В ходе проверочного исследования с использованием пилотных опросов и AMDAR, Overeem (2002) [6] обнаружил, что эти два индекса дают наилучшие показатели среди других индексов. Однако они переоценивают площади ТЯН, хотя Overeem отмечает, что индексы все еще полезны.

3. МЕТОДЫ, ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе разнообразных данных – информации из СМИ о лётных происшествиях, информации из отчётов ИКАО о расследовании случаев лётных происшествий (<https://www.skybrary.aero/>) был собран архив данных, который содержит информацию о случаях влияния турбулентности ясного неба на осуществление полётов.

Даты, когда наблюдалась ТЯН:

- 1 мая 2017 года Boeing 777 авиакомпании «Аэрофлот — Российские авиалинии», совершая рейс SU270 из Москвы в Бангкок (Таиланд), попал в зону ТЯН на подлете к Бангкокскому аэропорту «Суваннапум», пострадало 27 человек. Самолёт благополучно долетел до пункта назначения.
- 19 апреля 2018 года Boeing 787-8 над Индией набирая высоту внезапно столкнулся с коротким периодом сильной турбулентности, что привело к падению уровня высоты до 600 футов, травмам пассажиров и незначительному повреждению оборудования кабины.
- 16 января 2020 года Airbus A380-800 рейс EK763 во время полета над Мозамбиком столкнулся с сильной турбулентностью.
- 2 февраля 2020 года Airbus A380-800 рейс EK216 во время полета над штатом Вайоминг столкнулся с кратковременной турбулентностью, пострадал один пассажир.

Для того чтобы выявить наличие ТЯН, рассмотрим данные анализа гидродинамической глобальной модели GFS с разрешением 0.25° по широте и долготе. Использовались данные на всех уровнях, которые рекомендованы технологией Гидрометцентра РФ (см. главу 2, раздел 2.4).

GFS (Global Forecast System) — это глобальная система численного прогнозирования погоды, включающая в себя, как динамическое ядро модели, с блоком параметризаций, а также систему ассимиляции (вариационный анализ), выполняемый Национальной метеорологической службой Соединенных Штатов. Данные моделирования и анализа представлены в различном разрешении, в одном из вариантов шаг по горизонтальным координатам $0,25^\circ$ по долготе и 0.25° по широте. Модельные данные представлены с временной дискретностью 4 раза в день – в 00, 06, 12, 18 часов по всемирному координированному времени. Приблизительное расширение по горизонтали до 13 км для 16 дней заблаговременности прогноза, по вертикали данные представлены на 127 уровнях, самый верхний на высоте 80 км.

Для визуализации результатов прогнозов используется программная среда GrADS (The Grid Analysis and Display System) - использует четырехмерную среду данных: долгота, широта, вертикальный уровень и время. Наборы данных размещаются в 4-мерном пространстве с помощью файла дескриптора данных (расширение `ctl`). GrADS интерпретирует данные станций, а также данные с привязкой к сетке, причем сетки могут быть регулярными и с нелинейным интервалом, гауссовы или с переменным разрешением. В нашем случае использовались сеточные регулярные данные.

Исследование в данной ВКР проводится с помощью метода прогноза умеренной и сильной турбулентности ясного неба, который описан ранее в главе 2, пункт 2.4.

Для данных случаев ТЯН были рассчитаны индексы DVSI, DEF и VS по формулам (3.1), (3.2) и (3.3), соответственно:

$$DVSI = (DEF) \times (VS) \times \frac{V}{45}, \quad (3.1)$$

где

DEF — горизонтальная деформация ветра;

VS — вертикальный сдвиг ветра.

$$DEF = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}; \quad (3.2)$$

$$VS = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (3.3)$$

DVSI – произведение деформации ветра, его вертикального сдвига и скорости, нормализованное на её характерное значение. Согласно этому методу, наличие ТЯН прогнозируется с переходом критического значения индекса DVSI.

Рассмотрим случай от 01.05.2017 авиарейса SU-270 Москва-Бангкок. На рисунках (рисунки 3.1-3.3) белым квадратом обозначен Бангкок, так как самолет попал в зону ТЯН незадолго до посадки, нас интересует зона северо-западнее Бангкока.

Проанализируем поля геопотенциальной высоты (рис 3.1) и ветра (рис 3.2) на уровне 300 гПа за срок 00 UTS каждый. В северо-западной части от 80° до 95° восточной долготы видно, что высота геопотенциала меняется достаточно резко, что приводит к увеличению скорости ветра, который можно увидеть в разрезе на рисунке 3.3. Увеличение скорости можно увидеть на высотах от 600 гПа до 150 гПа, что дает возможность в этой области образования турбулентности.

На рисунке 3.2 в юго-западной зоне можно увидеть расхожимость ветра, это подходит под второй тип синоптической ситуации для образования

турбулентности по И.Г. Пчелко (глава 2, раздел 2.1). В передней части циклона расходимость ветра может приводить к сильному горизонтальному сдвигу ветра и образовывать сильную турбулентность.

На полях, представленных на рисунке 3.4, видно, что северо-западнее Бангкока на уровнях 200 гПа и 300 гПа значение индекса DVSI (0.000001). На уровне 300 гПа за срок 00 UTS наблюдается более обширная зона турбулентности, но по значению недостаточно сильная.

Дополнительно были построены поля DEF и VS, представленные на рисунках 3.5 и 3.6.

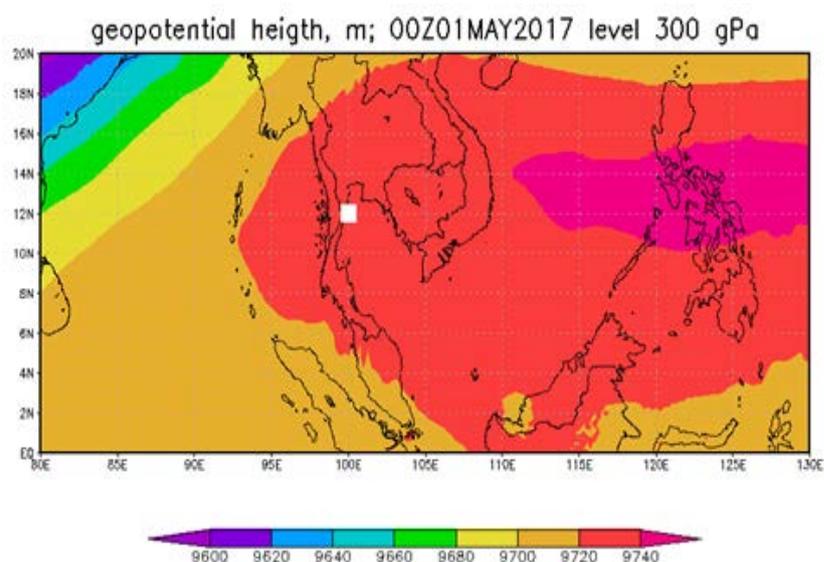


Рисунок 3.1 – Поле геопотенциальной высоты за 01.05.2017 на уровне 300 гПа в 00 UTS.

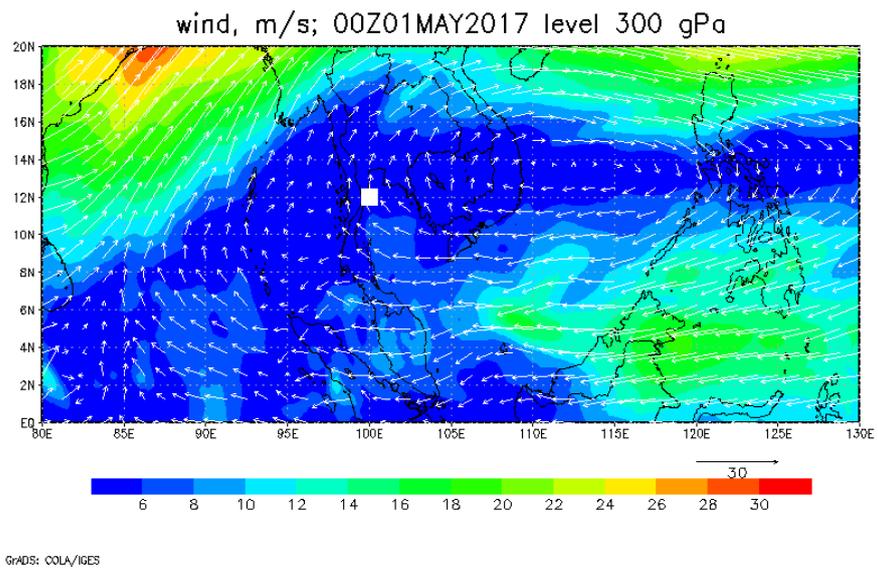


Рисунок 3.2 – Поле направления и скорости ветра за 01.05.2017 на уровне 300 гПа в 00 UTS.

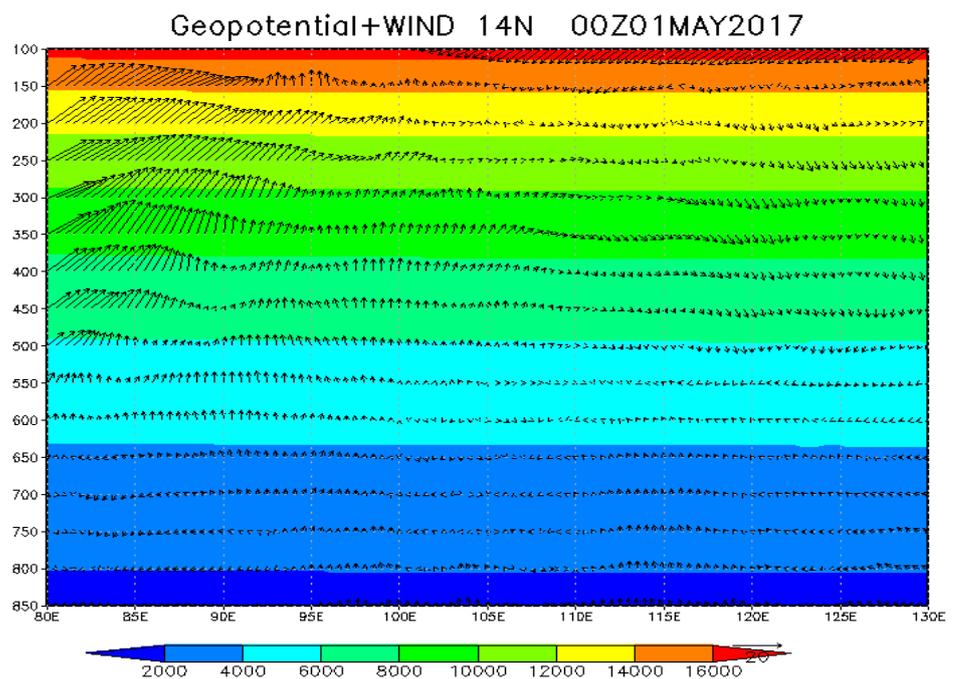


Рисунок 3.3 – Вертикальный разрез геопотенциальной высоты и ветра на 14° с.ш. за 01.05.2017 в 00 UTS.

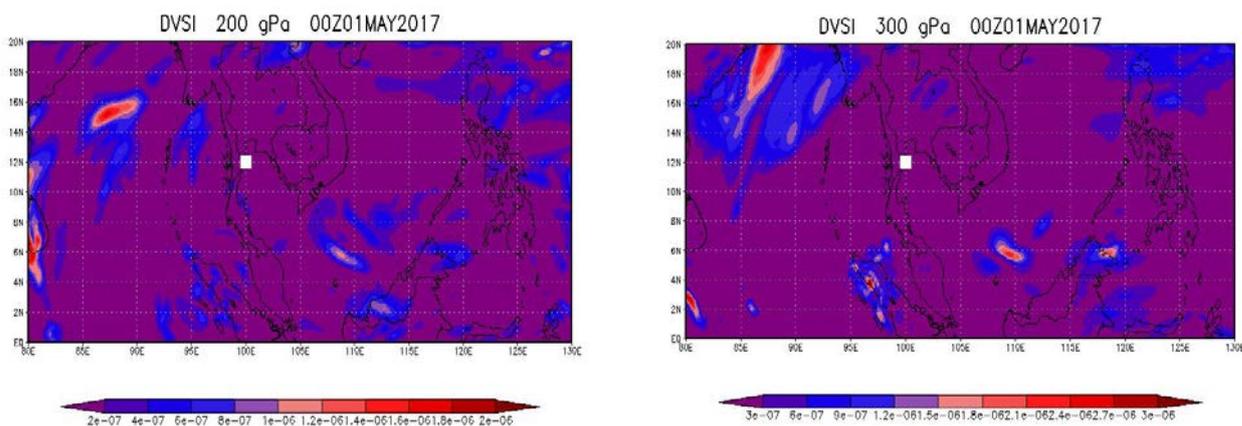


Рисунок 3.4 – Результаты расчета DVSI за 01.05.2017 на уровнях 200 гПа (слева) и 300 гПа (справа) в 00 UTS.

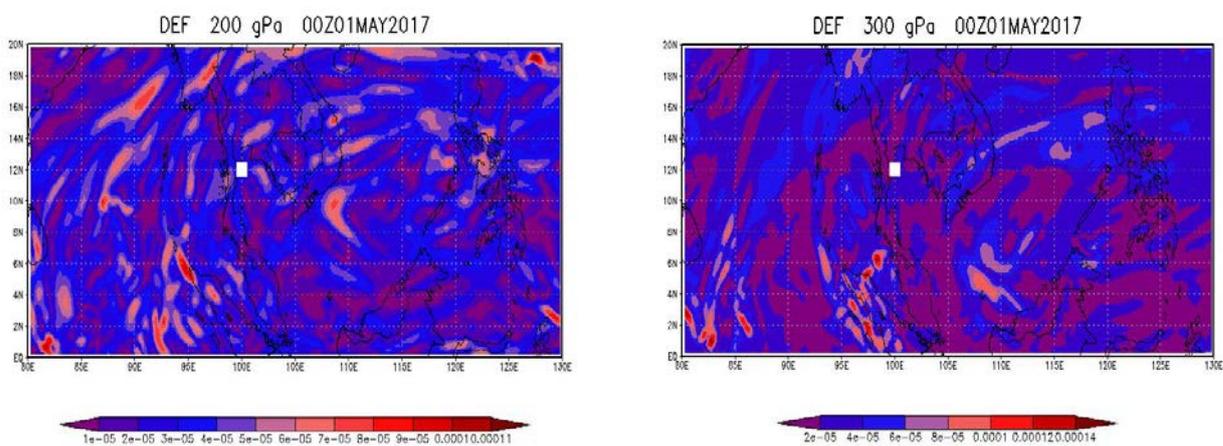


Рисунок 3.5 – Результаты расчета DEF за 01.05.2017 на уровнях 200 гПа (слева) и 300 гПа (справа) в 00 UTS.

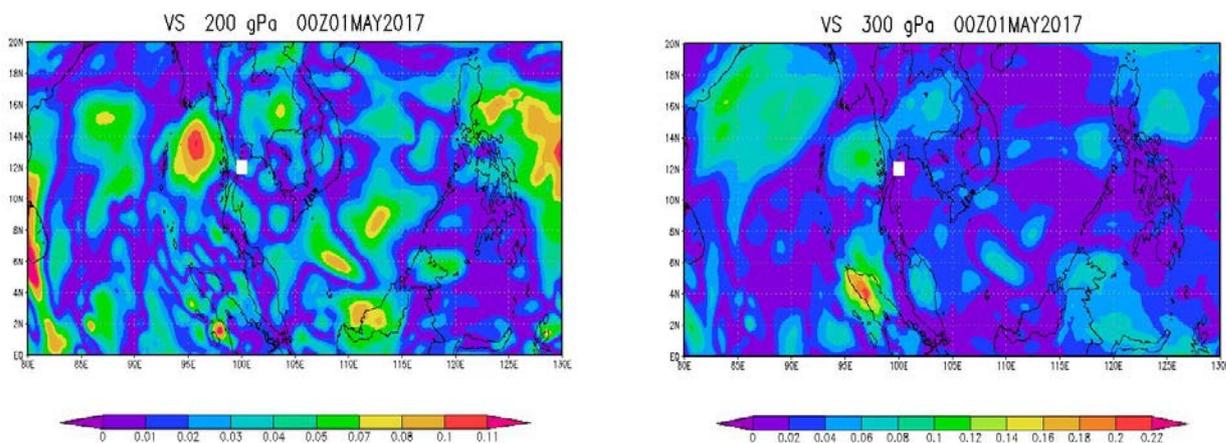


Рисунок 3.6 – Результаты расчета VS за 01.05.2017 на уровнях 200 гПа (слева) и 300 гПа (справа) в 00 UTS.

Индекс VS показывает достаточно сильный вертикальный сдвиг ветра (0,11), в то время как индекс DEF не такой значительный (0,00008).

По данным, представленных на рисунках 3.4 и 3.6, также можно отметить: чем больше значение индекса DVSI, тем больше значение индекса VS, это означает, что вертикальный сдвиг ветра значительно влияет на возникновение турбулентности ясного неба.

Дополнительно был построен вертикальный профиль индекса DVSI (рис 3.7) на 14° с.ш. от 80° до 130° в.д. На нем можно увидеть незначительное значение DVSI (0.000001) на высотах 300 и 150 гПа между 80° и 90° в.д. Индекс DVSI в данном отрезке не превышает критическое значение, исходя из реальных данных, это значит прогноз ТЯН не оправдался.

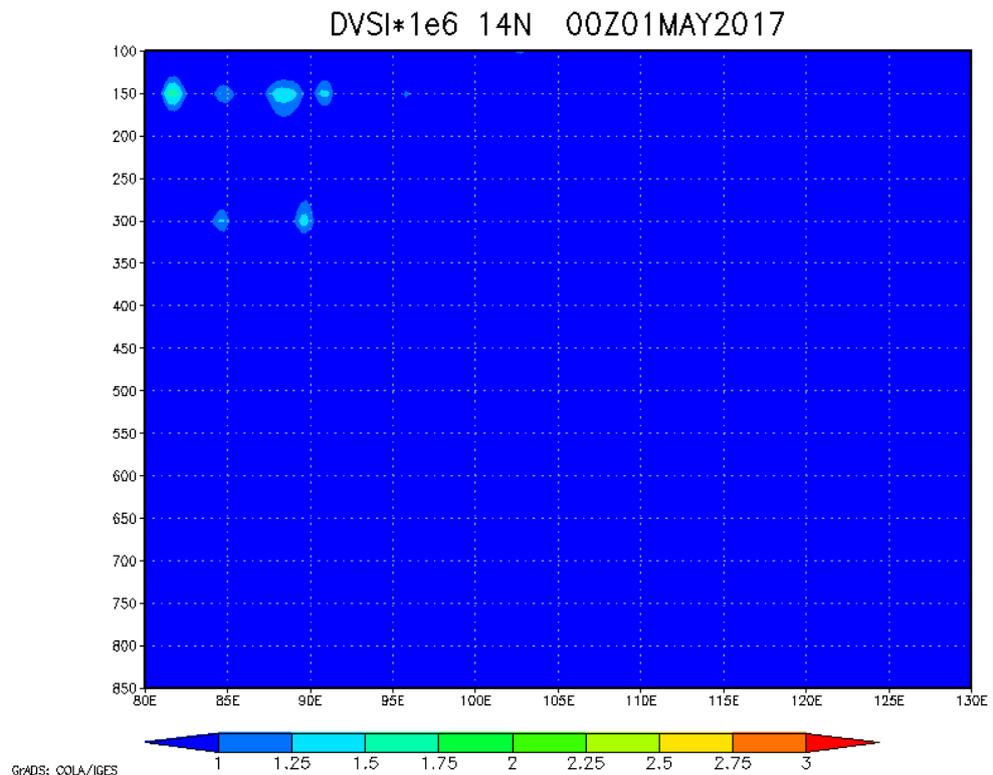


Рисунок 3.7 – Вертикальный разрез индекса DVSI на 14° с.ш. за 01.05.2017 в 00 UTS.

Рассмотрим другой случай – 19.04.2018 Boeing 787-8, набирая высоту с эшелона FL160 (~4800 м) на FL190 (~5800 м), самолёт столкнулся над Индией с умеренной и сильной турбулентностью.

Проанализируем поля геопотенциальной высоты на уровне 600 гПа, и направления и скорости ветра на уровне 500 гПа за срок 00 UTS каждый, представленные на рисунках 3.8 - 3.9, и вертикальный разрез геопотенциальной высоты и ветра за срок 00 UTS на рисунке 3.10. На рисунке 3.8 мы видим достаточно быструю смену высоты геопотенциала в антициклоне, а в районе Эвереста (правый верхний угол) можно увидеть часть циклона. На поле направления и скорости ветра (рис 3.9) в области Эвереста также можно отметить расходимость ветра. Эти данные могут указывать на вероятность образования турбулентности в данной зоне и подходят под описание синоптической ситуации пятого типа барического поля по И.Г. Пчелко (глава 2, раздел 2.1), где вероятное образование находится в передней части антициклона со слабой или умеренной интенсивностью.

На вертикальном разрезе (рис 3.10) мы видим четкое изменение направления ветра на всех долготах, что также может быть признаком образования ТЯН.

Далее рассмотрим наличие прогноза ТЯН с помощью и индекса DVSI на высотах 500 гПа и 600 гПа за 00 UTS на рисунке 3.11. Наши критические значения соответствуют красному цвету. Мы можем наблюдать наличие прогноза ТЯН в центральной части Индии и вблизи Эвереста. Индекс DVSI показывает прогноз турбулентности (0.000003), но отчетливее прослеживается на 500 гПа.

Дополнительно был рассчитан индекс DEF (рисунок 3.12) и VS (рисунок 3.13) на тех же высотах и сроках. Критические значения DEF (0.00006) преобладают над значениями VS (0.15), из чего можно проследить, чем выше значение DVSI, тем выше значение DEF, это говорит о том, что

расчетные значения деформации ветра значительно влияют на значения индекса DVSI и возникновения ТЯН.

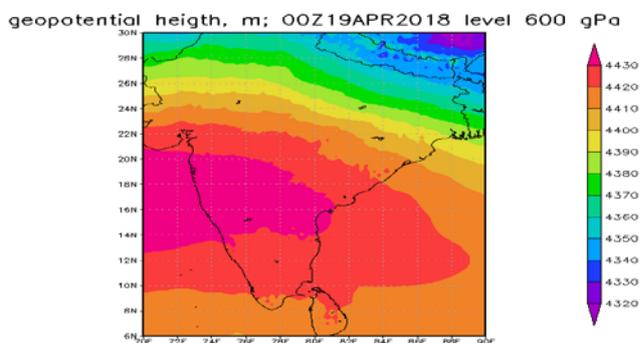


Рисунок 3.8 – Поле геопотенциальной высоты за 19.04.2018 на уровне 600 гПа в 00 UTS.

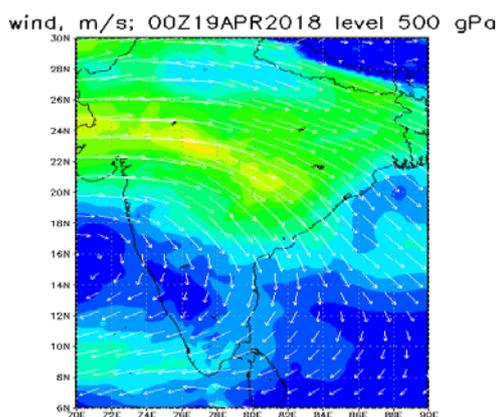


Рисунок 3.9 – Поле направления и скорости ветра за 19.04.2018 на уровне 500 гПа в 00 UTS.

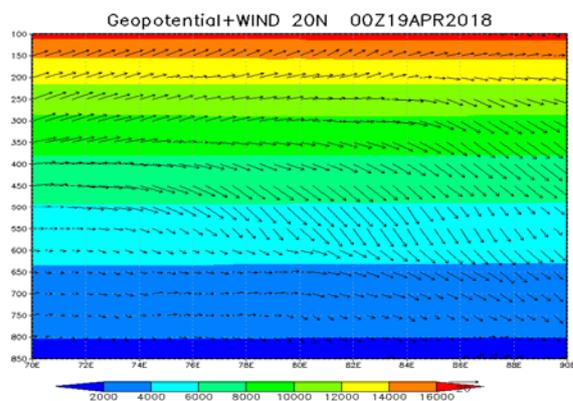


Рисунок 3.10 – Вертикальный разрез геопотенциальной высоты и ветра на 20° с.ш. за 19.04.2018 в 00 UTS.

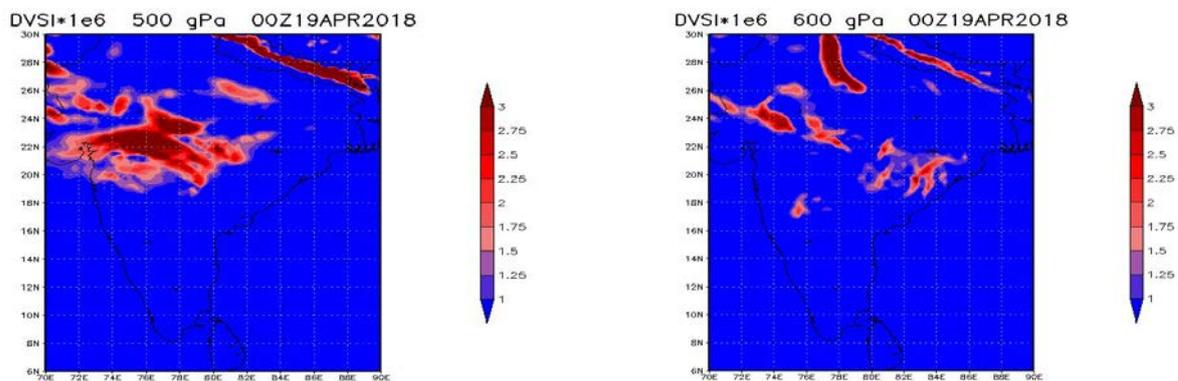


Рисунок 3.11 – Результаты расчета DVSI за 19.04.2018 на уровнях 500 гПа (слева) и 600 гПа (справа) в 00 UTS.

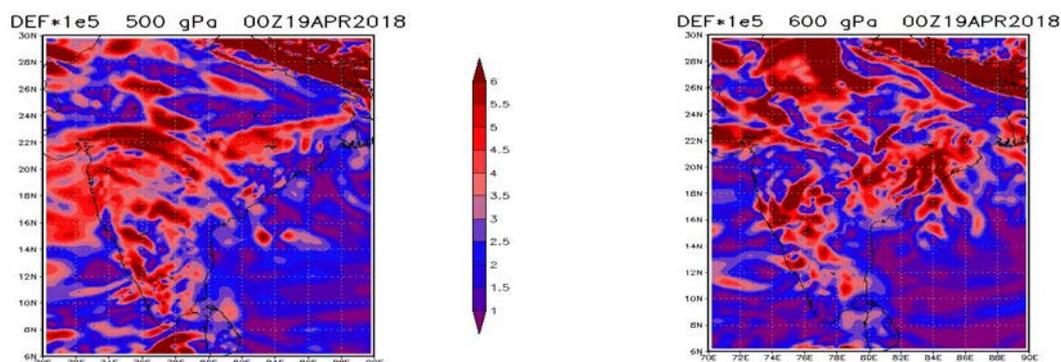


Рисунок 3.12 – Результаты расчета DEF за 19.04.2018 на уровнях 500 гПа (слева) и 600 гПа (справа) в 00 UTS.

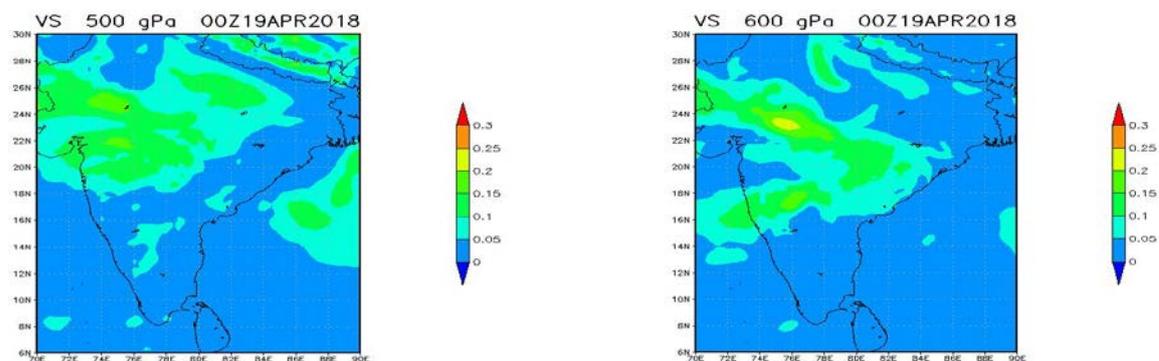


Рисунок 3.13 – Результаты расчета VS за 19.04.2018 на уровнях 500 гПа (слева) и 600 гПа (справа) в 00 UTS.

Дополнительно были построены вертикальные разрезы индексов DVSI на 20° и 30° с.ш. (рис 3.14) и DEF 25° с.ш. (рис 3.15) от 70° до 90° в.д. для определения верхней и нижней границ зоны ТЯН за 00 UTS.

По методу прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе за 19.04.2018 результаты прогноза, следующие:

Индекс DVSI на 30° с.ш присутствует от приземного до верхних слоев, переходит через критическое значение (0.000003) на уровнях 850 гПа и 100 гПа, это объясняется рельефом подстилающей поверхности. На 20° с.ш. проходит через критическое значение на высотах 600 гПа и 500 гПа, а значит эти уровни имеют смысл верхней и нижней границ слоя повышенной вероятности умеренной и сильной турбулентности ясного неба.

Индекс DEF оказал более сильное влияние на образование ТЯН, чем индекс VS.

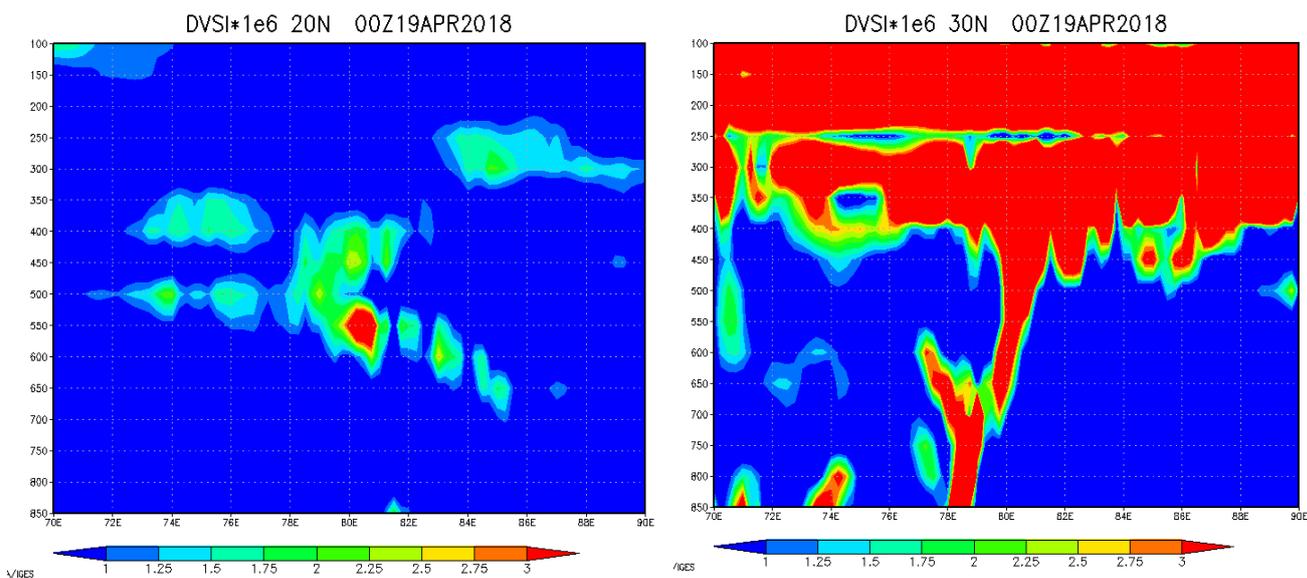


Рисунок 3.14 – Вертикальный разрез индекса DVSI за 19.04.2018 на 20° с.ш. (слева) и 30° с.ш. гПа (справа) в 00 UTS.

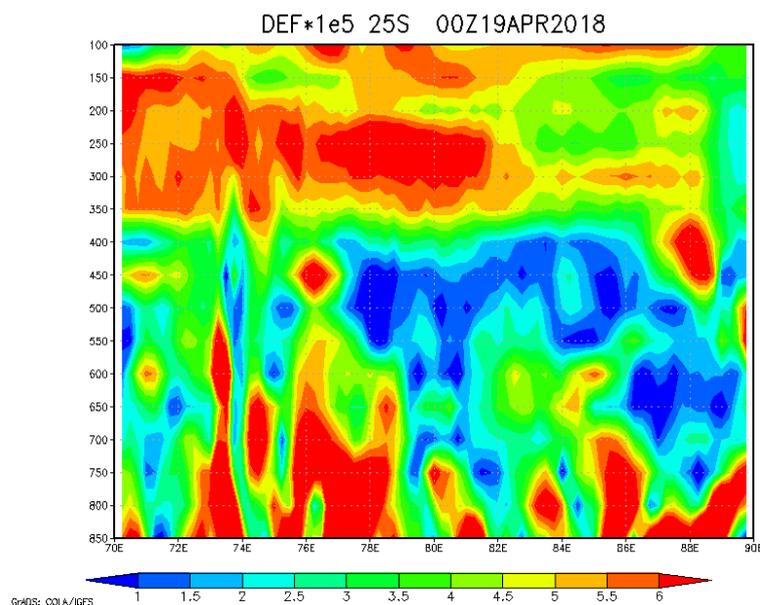


Рисунок 3.15 – Вертикальный разрез индекса DEF за 19.04.2018 на 25° с.ш. в 00 UTS.

Далее рассмотрим еще один случай ТЯН, произошедший над Мозамбиком 19.01.2020 Airbus A380-800 рейс EK763 на высоте FL400 (~12 км). Данный случай произошел в 13:50 UTS и на ~20° ю.ш., поэтому проанализируем данные, полученные в ближайшее к этому сроку время – 12 UTS и уровень AT200.

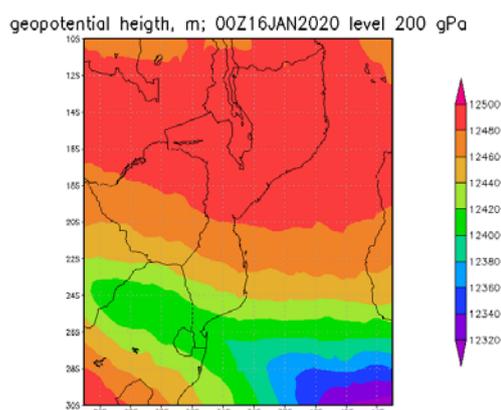


Рисунок 3.17 – Поле геопотенциальной высоты за 16.01.2020 на уровне 200 гПа в 00 UTS.

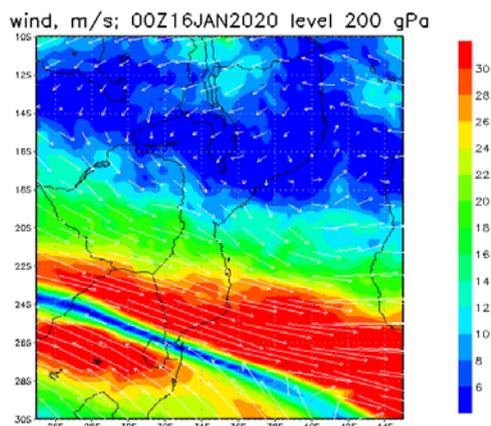


Рисунок 3.18 – Поле направления и скорости ветра за 16.01.2020 на уровне 200 гПа в 00 UTS.

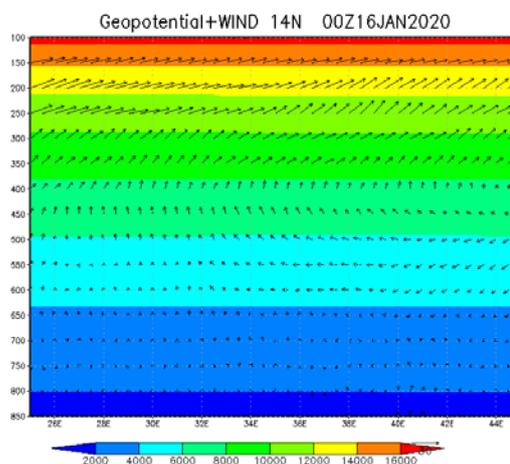


Рисунок 3.19 – Вертикальный разрез геопотенциальной высоты и ветра на 14° с.ш. за 16.01.2020 в 00 UTS.

Проанализировав поля геопотенциальной высоты и ветра на рисунках 3.17 и 3.18 соответственно, можно сказать, что данная синоптическая ситуация подходит под четвертый тип барических полей с ложбиной по И.Г. Пчелко (глава 2, раздел 2.1). Он характеризуется сходимостью изогипс в тыльной части ложбины, вследствие чего может образоваться сильная турбулентность.

На рисунке 3.19 видно, что начиная с уровня 200 гПа и выше скорость ветра усиливается.

Рассмотрим поля индексов DVSI, DEF (рис 3.20) и VS (рис 3.21). На полученных полях нас интересует критические значения, соответствующие красному цвету. В южной части рисунка 3.20 индекса DVSI видно, что присутствует прогноз ТЯН (0.00006) с западной и восточной стороны. Также видно, что сильная деформация ветра DEF (0.00035) присутствует в этом же месте. Это все совпадает с местом обозначения столкновения самолета с турбулентностью. Значение индекса VS (0.35) тоже достаточно большое в данной части и влияет на вероятность появления ТЯН.

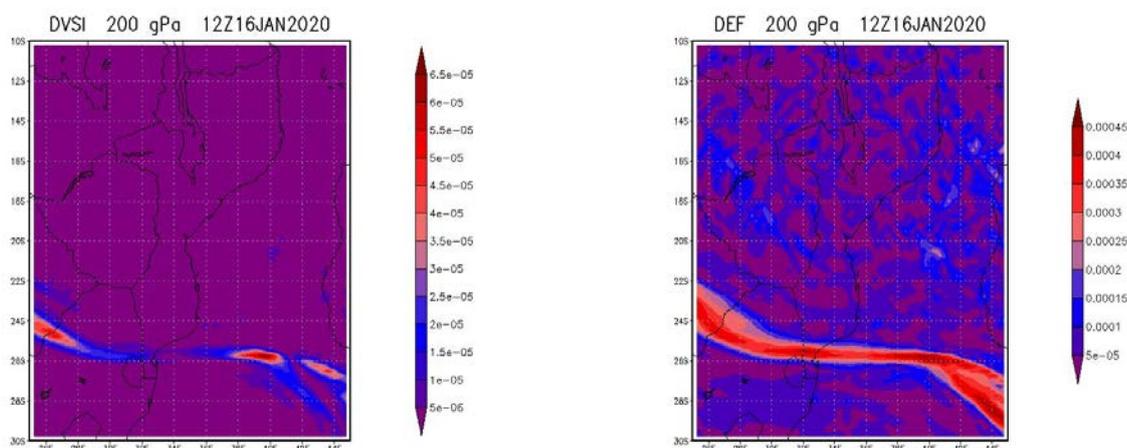


Рисунок 3.20 – Индексы DVSI (слева) и DEF (справа) на уровне 200 гПа за 16.01.2020 в 12 UTS.

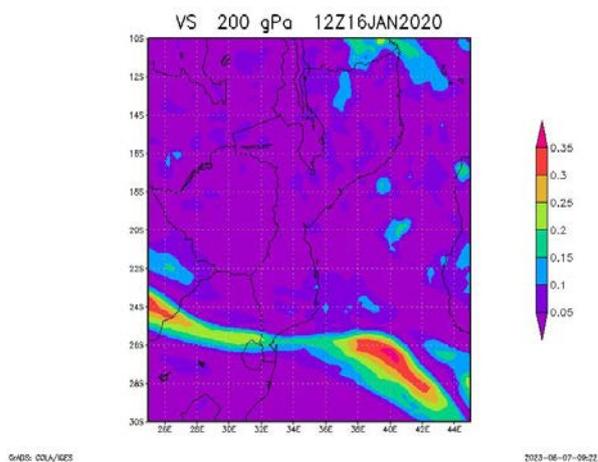


Рисунок 3.21 – Индекс VS на уровне 200 гПа за 16.01.2020 в 12 UTS.

Дополнительно были построены вертикальные разрезы индексов DVSI (рис 3.22) и DEF (рис 3.23) на 24° ю.ш. от 26° до 44° в.д. для определения верхней и нижней границ зоны ТЯН за 00 UTS.

По методу прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе за 16.01.2020 результаты прогноза, следующие:

Индекс DVSI присутствует и переходит через критическое значение (от 0.000003) от 850 гПа до 600 гПа на $26^\circ - 29^\circ$ восточной долготы, это объясняется рельефом подстилающей поверхности и от 500 гПа до 100 гПа по всей исследуемой долготе. Значит эти уровни имеют смысл верхней и нижней границ слоя повышенной вероятности умеренной и сильной турбулентности ясного неба.

Индекс DEF оказал более сильное влияние на образование ТЯН, чем индекс VS.

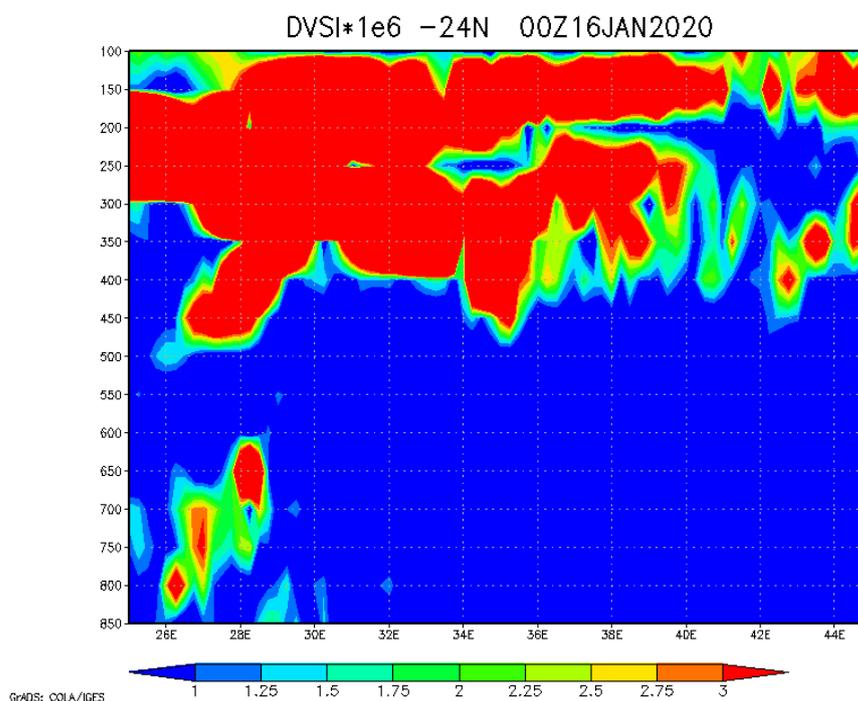


Рисунок 3.22 – Вертикальный разрез индекса DVSI за 16.01.2020 на 24° ю.ш. в 00 UTS.

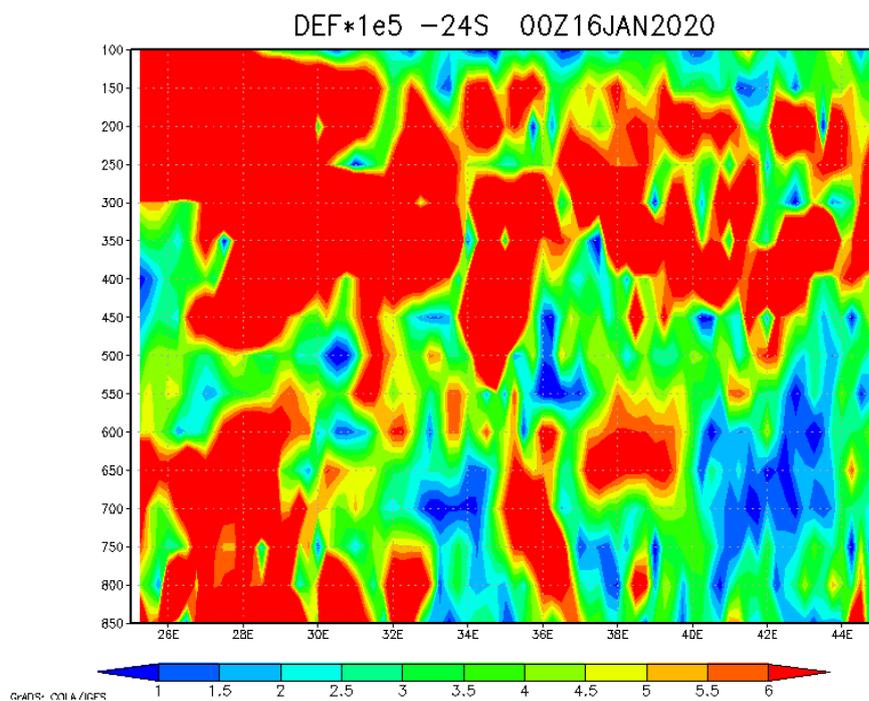


Рисунок 3.23 – Вертикальный разрез индекса DEF за 16.01.2020 на 24° ю.ш. в 00 UTS.

Рассмотрим случай от 02.02.2020 по маршруту Лос-Анжелес – Дубай. Самолет столкнулся с турбулентностью в районе штата Вайоминг в результате чего серьезно пострадал 1 пассажир.

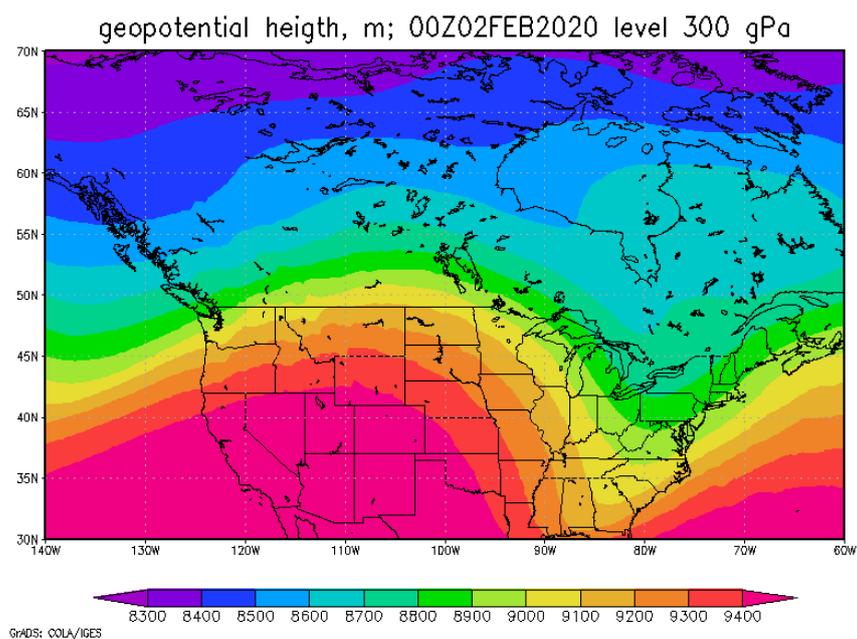


Рисунок 3.24 – Поле геопотенциальной высоты за 02.02.2020 на уровне 300 гПа в 00 UTS.

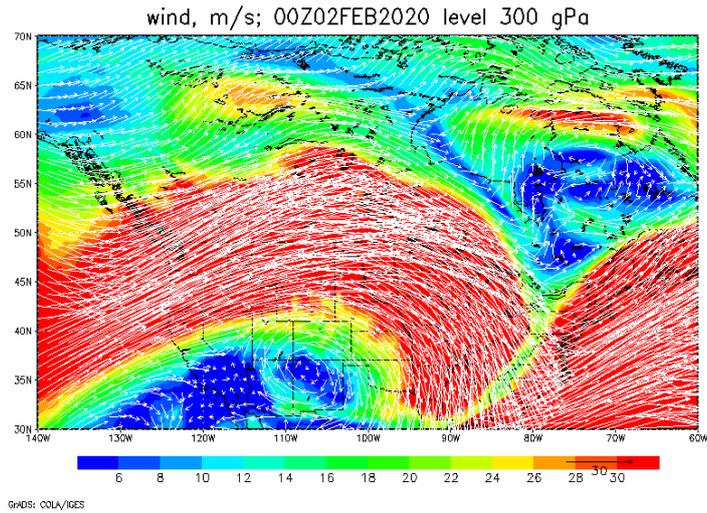


Рисунок 3.25 – Поле направления и скорости ветра за 02.02.2020 на уровне 300 гПа в 00 UTS.

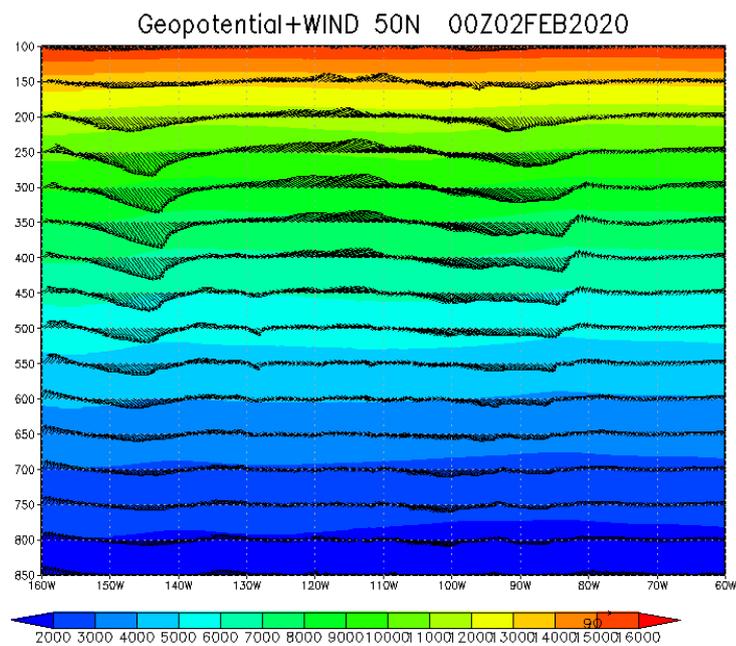


Рисунок 3.26 – Вертикальный разрез геопотенциальной высоты и ветра на 50° с.ш. за 16.01.2020 в 00 UTS.

На рисунке 3.24 геопотенциальной высоты на уровне 300 гПа за 00 UTS видно, что исследуемая область находится в области высокого давления – антициклоне. В поле ветра на рисунке 3.25 ярко представлено, что сильный ветер повторяет антициклоническую область. На вертикально разрезе

геопотенциальной высоты и ветра на рисунке 3.26 видно, что вдоль всех долгот происходит чередование сдвига ветра восходящих и нисходящий потоков, такие условия присущи гребню антициклона, также это может быть признаком образования ТЯН.

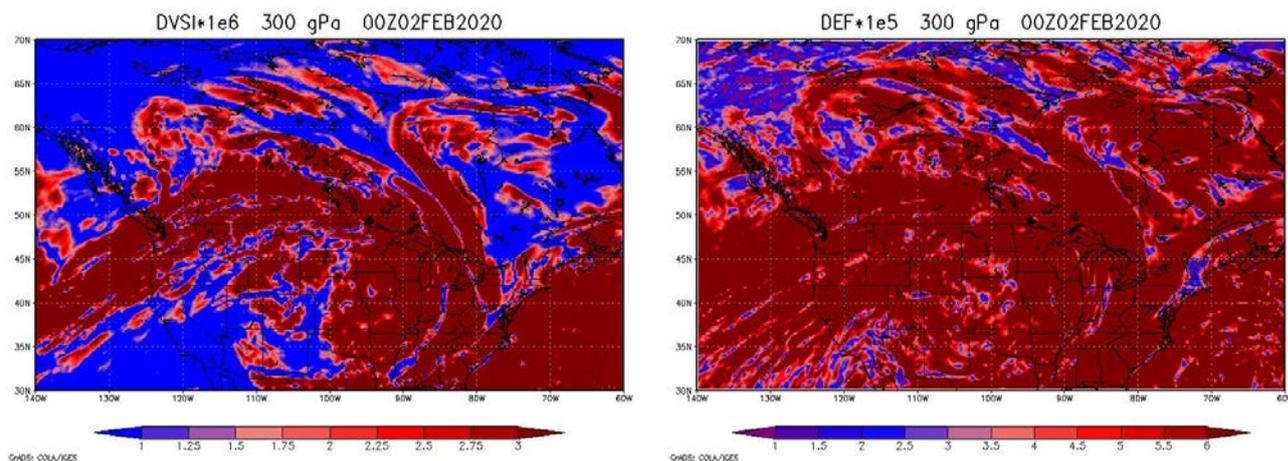


Рисунок 3.27 – Индексы DVSI (слева) и DEF (справа) на уровне 300 гПа за 02.02.2020 в 00 UTS.

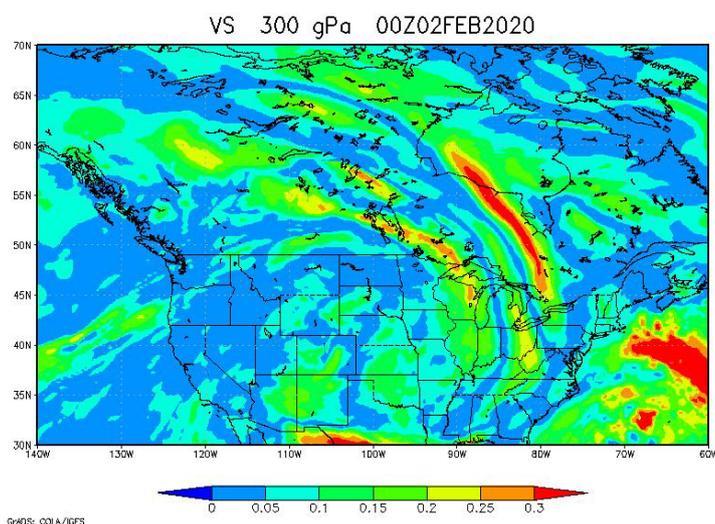


Рисунок 3.28 – Индекс VS на уровне 300 гПа за 02.02.2020 в 00 UTS.

Проанализируем поля индексов DVSI и DEF (рис 3.27), VS (рис 3.28). На них мы видим, что горизонтальная деформация ветра DEF переходит критические значения (0.00005) практически по всей области и создает

опасную полетную зону. Индекс вертикального сдвига VS присутствует в исследуемой области, но его значения (0.15) не превышают критических. Значения индекса DVSI переходят критические значения (0.000006) в области к близкой по значениям области индекса DEF, из чего можно сделать вывод: горизонтальный сдвиг ветра значительно влияет на образования ТЯН.

Дополнительно рассмотрим вертикальный разрез индексов DVSI (рис 3.29) и DEF (рис 3.30) на 50° с.ш. от 140° до 60° з.д. для обозначения нижней и верхней границы слоя повышенной вероятности образования ТЯН.

По методу прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе за 16.01.2020 результаты прогноза, следующие:

Индекс DVSI присутствует от 850 гПа до 100 гПа в области от 140° до 80° з.д, эти уровни являются нижней и верхней границей слоя повышенной вероятности образования ТЯН. Турбулентность в приземных слоях объясняется рельефом подстилающей поверхности, на данной территории находится хребет Абсарока.

Индекс DEF оказал более сильное влияние на образование ТЯН, чем индекс VS.

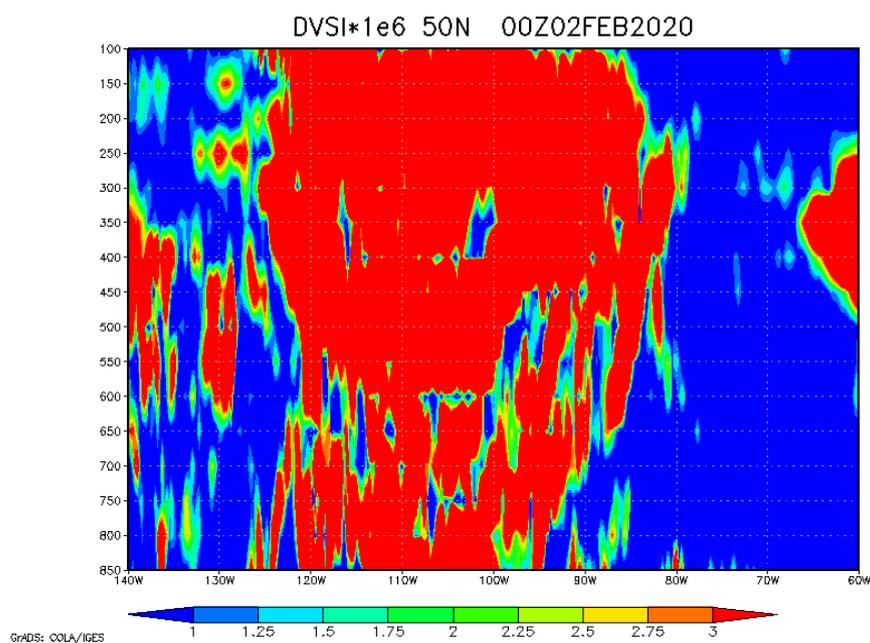


Рисунок 3.29 – Вертикальный разрез индекса DVSI за 02.02.2020 на 50° с.ш. в 00 UTS.

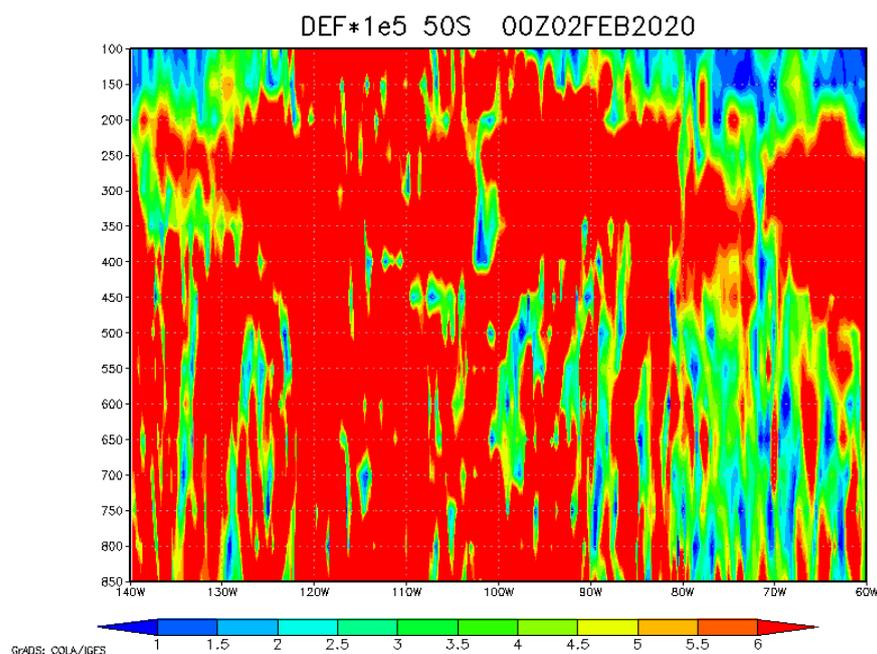


Рисунок 3.30 – Вертикальный разрез индекса DEF за 02.02.2020 на 50° с.ш. в 00 UTS.

Было рассмотрено четыре случая, из которых оправдались только три по методу прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе. Максимальное значение индекса DVSI наблюдалось 16.01.2020 над Мозамбиком (0.00006) и 02.02.2020, а минимальное значение наблюдалось над Индией 19.04.2018 (0.000003). Значение индекса DVSI над Бангкоком (0.000001) за 01.05.2017 было незначительное для прогноза ТЯН.

Таблица 3.1 – Результаты прогноза ТЯН.

Дата	Регион	Индекс DVSI
01.05.2017	Бангкок	-
19.04.2018	Индия	+
16.01.2020	Мозамбик	+
02.02.2020	США	+

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная в работе цель в исследование методов прогноза ТЯН на основе результатов гидродинамического моделирования, в ходе выполнения данной работы была достигнута.

Так же, для ее достижения, были решены дополнительные задачи:

1. Была освоена работа с результатами моделирования американской модель GFS, были реализованы численные эксперименты;

2. Была изучена система анализа и визуализации GRADS (The Grid Analysis and Display System);

3. Собран архив случаев ТЯН;

6. Были собраны данные о метеорологических величинах;

7. По результатам гидродинамического моделирования был разработан прогноз ТЯН по методу Гидрометцентра РФ;

8. Проанализированы результаты;

Выводы, которые можно сделать по проделанной работе:

1. Американская модель GFS, для прогноза турбулентности ясного неба, продемонстрировала хорошие результаты и перспективы ее использования.

2. Метод прогноза зон умеренной и сильной турбулентности в ясном небе дает хорошие результаты о наличии ТЯН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.Г. Богаткин, В.Д. Еникеева, Анализ и прогноз погоды для авиации
СПб: Гидрометиздат, 1992.
2. Бабий В.И., Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане, Ленинград: Изд. скорости звука в океане. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983.
3. А. Ф. Нерушев, Р. В. Ивангородский, Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе спутниковых измерений, 2019.
4. Лешкевич Т.В. Автоматизированный способ прогноза вероятности турбулентности в ясном небе// Метеорология и гидрология.– 1988, № 10.– с. 44-54.
5. Н. П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А. Р. Иванова, И. А. Горлач, Метод прогноза турбулентности в ясном небе
6. Overeem A. (2002) Верификация прогнозов турбулентности в ясном небе, Технический доклад, КНМИ.
7. Jaeger E.V. и Sprenger M. (2007) Климатология Северного полушария индексов турбулентности ясного неба в области тропопаузы, полученных из данных реанализа ERA40, Журнал геофизических исследований, том 112, D20106.
8. Бергман С. (2001) Проверка индекса турбулентности, используемого в SMHI, дипломный проект на факультете наук о Земле, факультете наук о Земле ISSN 1650-6553 № 2, Упсальский университет.
9. Turp D. and Gill, P. (2008) Развитие численного прогнозирования турбулентности в ясного неба в Метеорологическом управлении Великобритании.

10. Эллрод, Г.П. и Нокс Дж.А. (2010) Улучшение оперативного индекса диагностики турбулентности в ясном небе путем добавления термина тенденции расхождения, Погода и прогнозирование, том 25.

11. Эллрод, Г.П. и Кнапп, Д.И. (1992) Объективный метод прогнозирования турбулентности в ясном небе: Проверка и оперативное использование, Погода и прогнозирование, том 7.

12. Mancuso, R.L. и R.M. Endlich, 1966. Частота турбулентности в ясном небе как функция сдвига ветра и деформации, Ежемесячный обзор погоды.