

Н.П. Шакина, Е.Н. Скриптунова, А.Р. Иванова, И.А. Горлач

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЯСНОМ НЕБЕ

В соответствии с Планом испытаний на 2009 год, в период с 1 апреля по 31 декабря 2009 года в ГУ «Гидрометцентр России» проводились оперативные испытания метода прогноза турбулентности в ясном небе (ТЯН) воздушных судов (ВС). Метод является составной частью технологии расчета карт особых явлений (ОЯ) на верхних (SWH) и средних (SWM) уровнях атмосферы для авиации. Технология была разработана в Отделе авиационной метеорологии в 2004–2008 гг. в рамках тем НИР 1.1.1, 1.4.1 для внедрения в Лаборатории зональных прогнозов Отдела авиационной метеорологии ГУ «Гидрометцентр России».

Воздушные потоки свободной атмосферы вне зон конвективной деятельности являются, как правило, слабо возмущенными (квазиламинарными). Сильная турбулентность в них встречается в виде отдельных слоев или в виде вкрапленных в спокойную среду пятен, или линз, с очень высоким уровнем возмущенности. Прогноз этого вида турбулентности, именуемого «турбулентностью в ясном небе», очень важен для метеообеспечения авиации [3]. Своеобразный характер зон ТЯН – перемежаемость, резкая локализация в окружающем потоке, большая изменчивость размеров и продолжительности жизни – затрудняет их исследование и прогноз. Механизмы развития ТЯН интенсивно изучались начиная с 60-х годов XX века [4, 8]. 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 . 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, 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. Игруют 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.

В целом, ТЯН – редкое явление. Повторяемость умеренной и сильной ТЯН, по материалам сбора сведений от пилотов рейсовых самолетов [4], над территорией СССР составляла в среднем за год 2,5 %, с максимумом в сентябре и минимумом в декабре. Над территорией США годовой ход ТЯН в целом аналогичен, а повторяемость значительно выше. Кроме того, отмечена меньшая горизонтальная протяженность зон ТЯН над США. Обе эти особенности могут объясняться преобладанием неустойчивости гравитационных волн, генерируемых меридионально ориентированными хребтами. В бывшем СССР также была отмечена повышенная повторяемость ТЯН и меньшие размеры турбулентных зон над горными массивами Кавказа и Средней Азии.

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 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, обзор которых дан в [1].

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 [2]). 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 [6], а также в метеослужбах США и Канады [7]. 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 [5]. В [5] также дается интерпретация данных о максимальной и мгновенной EDR (скорости вихревой диссипации, измеряемой самолетными пульсационными датчиками, в терминах «индекса турбулентности» (табл. 1).

**Индекс турбулентности, определяемый средним и максимальным значением
EDR ($\text{м}^{2/3}\text{с}^{-1}$)**

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

Примечание: Выделены категории, соответствующие сильной турбулентности

На основании этих данных ВМО рекомендует следующие связи индексов наблюдаемой турбулентности и данных EDR с интенсивностью ТЯН. 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 $0,3 < \text{EDR} \leq 0,5$);

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 $\text{EDR} < 0,1$).

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.

Следует учитывать, что ТЯН – это турбулентность вне зон активной конвекции, и следует исключить из анализа квадраты, в которых имеет место конвективная неустойчивость, хотя бы и неглубокая. Поэтому из рассмотрения исключались квадраты

как с наличием, так и с отсутствием ТЯН, если в центре квадрата значение рассчитанного уровня нулевой плавучести, интерпретируемого как верхняя граница конвекции, превышало 2 км.

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 [7] представляет собой произведение деформации ветра, его вертикального сдвига и скорости, нормализованной на ее характерное значение, как это видно из следующих выражений:

$$DVSI = (DEF) \cdot (VS) \cdot \frac{V}{45}, \quad (1)$$

где

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

деформация ветра;

$$VS = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad - \quad (3)$$

вертикальный сдвиг ветра.

Авторами 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 град. по широте и долготе (согласно требованиям Технического регламента ВМО [5]) глобальных моделей, оперативно функционирующих в ГУ «Гидрометцентр России»: глобальной спектральной модели в конфигурации T85L31 и 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 [5].

По результатам авторских испытаний, для оперативной проверки качества прогноза ТЯН были предложены обе отечественные глобальные модели. Модель UKMO, 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 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), 1 – выполнение. Параллельно рассчитывались аналогичные поля по данным объективного анализа. Для оценки точности прогноза сравнивались результаты расчета (1) 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 град., а для модели NCEP – с ее собственным анализом на одноградусной сетке.

Результаты испытаний, представленные в табл. 2, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев А.А., Лешкевич Т.В., Шакина Н.П.* Турбулентность ясного неба и ее прогноз // ВНИИГМИ-МЦД. Обзорная информация, сер. Метеорология. – 1983. – 42 с.
2. *Лешкевич Т.В.* Автоматизированный способ прогноза вероятности турбулентности в ясном небе // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 10. – С. 44–54.
3. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации // *Абрамович К.Г., Васильев А.А.* (ред.). – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
4. *Пинус Н.З.*: Физическая модель турбулентности ясного неба // Метеорология и гидрология. – 1971. – № 6. – С. 57–66.
5. Технический Регламент ВМО-№ 49. Том 2. Метеорологическое обслуживание международной авиации. – 2004.
6. *Dutton M.J.O.* Probability forecasting of clear air turbulence based on numerical model output // Meteorol. Mag. – 1980. – V. 109. – P. 293–310.
7. *Ellrod G.P., Knapp D.I.* An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use // Weather and Forecasting. – 1992. – V. 7. – P. 150–165.
8. *Knox J. A.* Possible mechanisms of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flow // Mon. Wea. Rev. – 1997. – V. 125. – P. 1251–1259.

Таблица 2

Результаты испытания прогнозов ТЯН на 24 ч по моделям Т85L31, ПЛАВ и NCEP

Уровни, гПа	Общая оправдываемость			Критерий Пирси-Обухова			Критерий Хайдке-Багрова		
	Т85L31	ПЛАВ	NCEP	Т85 L31	ПЛАВ	NCEP	Т85 L31	ПЛАВ	NCEP
Северное полушарие (7721502 узла сетки размером 1,25°x1,25°, 11859120 узлов сетки размером 1°x1°)									
700	98,9	99,2	98,9	0,217	0,295	0,494	0,232	0,353	0,474
500	96,4	97,4	97,6	0,448	0,546	0,613	0,402	0,536	0,585
400	93,1	94,9	95,3	0,471	0,577	0,648	0,464	0,587	0,630
300	93,1	93,7	94,5	0,319	0,491	0,599	0,372	0,502	0,585
250	92,1	93,2	94,3	0,374	0,521	0,624	0,419	0,537	0,616
200	94,5	95,4	96,1	0,431	0,524	0,611	0,439	0,533	0,599
150	97,0	97,8	98,2	0,525	0,506	0,572	0,416	0,485	0,541
100	99,3	99,7	99Ю5	0,336	0,398	0,398	0,129	0,175	0,344
Россия (1702998 узлов сетки размером 1,25°x1,25°, 2612192 узла сетки размером 1°x1°)									
700	98,5	98,7	98,3	0,141	0,246	0,495	0,183	0,317	0,464
500	94,9	96,2	96,0	0,347	0,466	0,573	0,355	0,495	0,544
400	88,8	91,4	91,8	0,387	0,513	0,602	0,400	0,536	0,588
300	88,2	89,4	90,3	0,305	0,449	0,569	0,354	0,473	0,554
250	86,9	88,8	90,3	0,334	0,484	0,604	0,379	0,509	0,594
200	91,5	92,8	93,8	0,388	0,492	0,609	0,414	0,514	0,592
150	95,6	96,7	97,3	0,504	0,599	0,656	0,487	0,556	0,612
100	99,2	99,7	99,6	0,278	0,274	0,442	0,074	0,158	0,367