

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-6-24>

УДК 551.55

## **Скорость вихревой диссипации в авиационных приложениях оценки интенсивности турбулентности**

***А.Р. Иванова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
ivanova@mecom.ru*

Представлен обзор работ о результатах использования в метеорологическом обеспечении авиации характеристики EDR (eddy dissipation rate), связанной со скоростью диссипации турбулентной кинетической энергии и представляющей собой кубический корень из ее значения. Величина EDR, не зависящая от типа самолета, была выбрана ИКАО в качестве стандарта для определения интенсивности турбулентности. Обсуждаются физические основы использования EDR, методы определения EDR *in situ* и с помощью средств дистанционного зондирования. Рассматриваются некоторые подходы к прогнозированию турбулентности в единицах EDR в моделях численного прогноза погоды.

*Ключевые слова:* турбулентность, скорость вихревой диссипации, методы оценки турбулентной кинетической энергии, климатология турбулентности, прогнозирование EDR

## **Eddy dissipation rate in aviation applications of turbulence intensity assessment**

***A.R. Ivanova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
ivanova@mecom.ru*

A review of papers on the use of the EDR (eddy dissipation rate) parameter in meteorological aviation service is presented. EDR is associated with the rate of dissipation of turbulent kinetic energy and is the cube root of its value. The EDR characteristic, independent of an aircraft type, has been designated by ICAO as the measure for determining turbulence intensity. The physical basis of the EDR application, methods for determining EDR *in situ* and in the surface layer of the atmosphere using remote sensing are discussed. Some approaches to forecasting turbulence in EDR units in numerical weather prediction models are considered.

*Keywords:* turbulence, eddy dissipation rate, methods for estimating turbulent kinetic energy, turbulence climatology, EDR forecasting

## Введение

Атмосферная турбулентность на масштабах движений от десятков до нескольких сотен метров может представлять определенную опасность для воздушных судов (ВС) [10, 13]. Согласно информации Федерального авиационного агентства США, болтанка самолетов как результат действия турбулентности является основной причиной травм бортпроводников и пассажиров воздушного судна в результате происшествий без смертельного исхода и обходится авиационной индустрии ежегодно в сотни миллионов долларов [[https://www.faa.gov/travelers/fly\\_safe/turbulence](https://www.faa.gov/travelers/fly_safe/turbulence)]. По данным Управления гражданской авиации Китая, в период с 2017 по 2021 год произошло более 1700 инцидентов, связанных с турбулентностью [7].

Еще несколько десятилетий назад информацию о турбулентности в полете можно было получить исключительно из сообщений пилотов, которые передавались авиадиспетчеру посредством голосовой связи. Эти сводки могли содержать информацию о типе турбулентности (классифицируется по источнику возникновения), об уровне ее интенсивности (слабая, умеренная, сильная, экстремальная) и продолжительности (случайная, прерывистая, непрерывная). Все эти характеристики определялись пилотом субъективно и были основаны на реакции ВС и реакции находящихся внутри кабины самолета [35].

Субъективность восприятия воздействия турбулентности на самолет не позволяла оценить реальную картину возмущенности атмосферы вокруг ВС. Это послужило причиной поиска иных критериев, не зависящих от типа самолета и от ощущений членов экипажа. К таким характеристикам, объективно отражающим интенсивность турбулентности, можно отнести извлеченную эквивалентную вертикальную скорость порыва, DEVG (derived equivalent vertical gust) и параметр EDR (кубический корень из «eddy dissipation rate» – скорости вихревой диссипации). В 2001 г. Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) был принят метод определения EDR *in situ* в качестве стандарта для автоматических сообщений о турбулентности коммерческими самолетами [18], а сама характеристика EDR утверждена как стандартный показатель интенсивности атмосферной турбулентности [6].

## Определение величины EDR

### *Историческая справка*

Исследование атмосферной турбулентности, приведшее к разработке алгоритмов определения EDR *in situ*, началось в 40-х годах прошлого века. В 1941 г. А.Н. Колмогоров опубликовал работу «Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса» [4], где было введено понятие интервала равновесия. На этом интервале энергия вводится в поток в крупных масштабах, после этого происходит ее передача каскадом вихрей к более мелким масштабам, где

под действием вязкости энергия диссипирует. Тот интервал масштабов, где в потоке действуют лишь силы инерции и передача энергии происходит без существенной диссипации, в литературе получил название «инерционного» [3].

В 1948 г. Теодор фон Карман из Калифорнийского технологического института разработал эмпирическую формулу, описывающую энергетический спектр линейки масштабов, включающей инерционный интервал [24].

В 1964 г. McCready [32], обсуждая возможность стандартизации интенсивности атмосферной турбулентности, воздействующей на ВС вне зависимости от типа самолета, предложил использовать теорию Колмогорова для введения понятия коэффициента диссипации энергии,  $\epsilon$ . Эта величина на инерционном интервале («inertial subrange») связывает статистическое количество вихрей с их размером. Энергетический спектр турбулентности в любом направлении будет пропорционален  $\epsilon^{2/3}\lambda^{5/3}$  ( $\lambda$  – длина волны) и обычно распространяется на турбулентные возмущения на масштабах от нескольких сантиметров до 200–300 м (в работе [18] эти границы расширены от миллиметров до нескольких километров). Было доказано, что среднеквадратическое значение вертикального ускорения, через которое ощущается болтанка, пропорционально  $\epsilon^{1/3}$ . Константы пропорциональности будут отличаться для разных типов ВС, их массы, воздушной скорости (вариации здесь максимальны) и высоты полета, но они могут быть посчитаны или измерены.

В 1994 г. специалисты Национального центра по атмосферным исследованиям США, базируясь на теоретических положениях об инерционном интервале, предложили алгоритм определения в полете EDR *in situ* [17], позже оптимизированный в [40] с учетом ошибок, обусловленных непродолжительным воздействием турбулентности или возникающих при маневрах в полете.

### ***Методы определения скорости рассеяния турбулентной кинетической энергии (вихревой диссипации)***

Принципы определения скорости диссипации турбулентной энергии в потоке легли в основу некоторых специфических методов, используемых как в аэрогидродинамических экспериментах, так и в рутинной оперативной практике работы средств дистанционного зондирования. Они основаны на оценке энергетического спектра турбулентности по флуктуациям скорости ветра/температуры [1], измеряемым контактным или дистанционным способом с помощью различной аппаратуры, установленной на земле или летательных аппаратах [2, 5, 12, 45, 46].

Измерение скорости турбулентной диссипации с помощью термического анемометра (иначе «hot wires», [46]) производится на основании оценки тепловых потерь проволоки, нагреваемой электрическим током. Для определения трех компонент скорости и их градиентов могут применяться сложные конструкции с большим количеством проводов и сложной

конфигурацией. Турбулентную диссипацию можно оценить по энергетическому спектру, полученному из временных рядов скоростей, измеренных с помощью нагреваемых током проводов.

Другой путь оценки спектра турбулентности – вычисление флуктуаций скорости ветра акустическими (ультразвуковыми) анемометрами, принцип действия которых основан на измерении скорости звука, меняющейся в зависимости от направления ветра по отношению к направлению распространения звука. Такие приборы могут быть установлены на борту самолетов [5] или закреплены на корпусе беспилотных летательных аппаратов [9].

Лазерное доплеровское измерение скорости (LDV) – определение скорости в одной точке в прозрачной или полупрозрачной жидкости при использовании принципа доплеровского сдвига лазерных лучей, которые отражаются от засеянных в среде частиц. По этому принципу, например, определяется величина турбулентного рассеяния в облаках доплеровским радаром [33, 37], в ясном небе – системой радиоакустического зондирования [19], содаром [15] или доплеровским когерентным лидаром [8, 16].

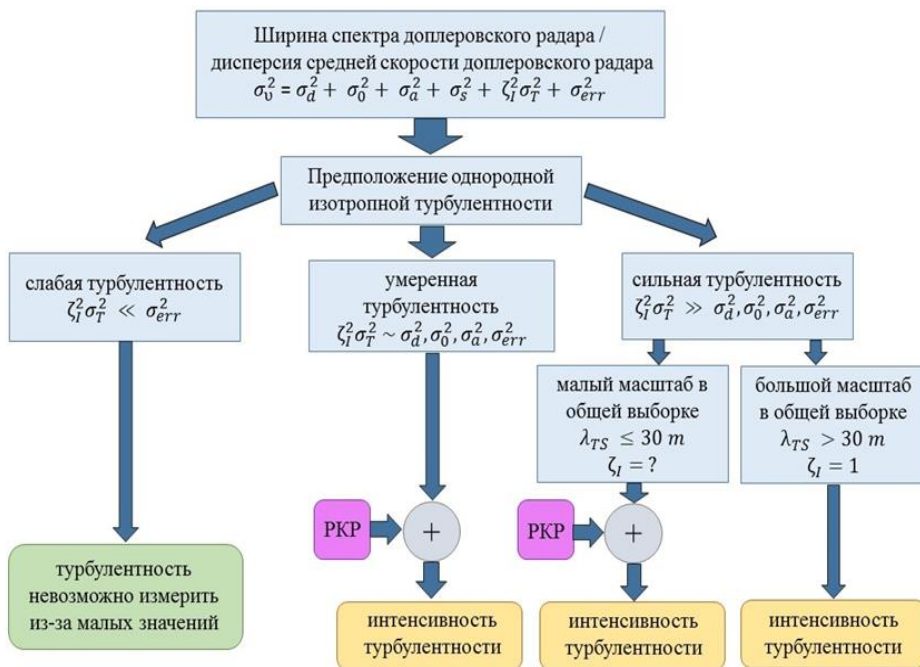
Информация систем дистанционного зондирования о турбулентности может использоваться для оценки вихревой ситуации вблизи аэродромов. Точность определения значений EDR проверяется по информации, полученной, например, от наземных акустических анемометров. Согласно исследованию [8], в эксперименте по оценке скорости диссипации турбулентной энергии методом поперечной структурной функции радиальной скорости при использовании 1,5-микронного импульсного когерентного лидара «Stream Line» точность не превышала 30 %.

Применение метода машинного обучения генеративно-состязательной сети позволило эффективно решить проблему распознавания и классификации областей турбулентности с помощью доплеровского лидара (рабочая длина волны 1.55 мкм) в аэропорту Лангжоу Чонгчуан, КНР, и увеличить точность распознавания таких областей (hit rate) до 78 %, а также сократить долю ложных тревог до 5.6 % [47].

Сравнение EDR, извлеченной из информации наземных доплеровских лидаров (работающих на длине волны 2 мкм), со значениями *in situ*, определяемыми на борту ВС, осуществляющих взлет и посадку в международном аэропорту Чхеплакок (Гонконг), показало хорошее соответствие в определении уровня интенсивности турбулентности [16].

Пример схемы расчета EDR, получаемой по данным доплеровского X-радар, представлен на рис. 1 [37]. Здесь производится оценка ширины спектра доплеровского радара/дисперсия средней скорости, определяемой радаром ( $\sigma_v^2$ ), состоящая из отклонений, обусловленных разнообразием скоростей падения гидрометеоров ( $\sigma_d^2$ ), многообразием их ориентаций и вибраций ( $\sigma_o^2$ ), движением антенны радара ( $\sigma_a^2$ ), сдвигом/отклонениями в направлении вектора ветра ( $\sigma_s^2$ ) и турбулентностью ( $\sigma_T^2$ ). Параметр  $\zeta_I^2$  ответственен за коррекцию инерции гидрометеоров, ( $\sigma_{err}^2$ ) – ошибка

из-за допущений в модели и/или шум измерений. Члены  $\sigma_d$  и  $\zeta_l$  оцениваются через распределение капель по размеру (РКР). РКР извлекается из информации о радиолокационной отражаемости и/или других радарных измерений. Путем оценки соотношений вкладов разных дисперсий выявляется – в предположении однородной изотропной турбулентности – интенсивность последней.



**Рис. 1.** Схематическое изображение предположений и упрощений, которые используются для восстановления информации об интенсивности турбулентности по данным доплеровского радара [37]. РКР – распределение капель по размерам.

**Fig. 1.** The schematic illustrates the assumptions and simplifications that are used in radar-based turbulence intensity retrieval techniques [37].

Следует отметить по крайней мере пять существующих методов восстановления EDR по радарным данным [37]: по оценке отклонений скорости ветра (wind speed variance technique, WSV), дисперсии вертикальной скорости ветра (vertical wind velocity variance VWVV), по энергетическому спектру (power spectrum, PS), по структурной функции второго порядка (second-order structure function, SSF), по кратковременным изменениям скорости ветра (short time wind speed variance, STWSV).

Стоит упомянуть также возможность определения скорости вихревой диссипации в атмосфере с помощью радиозондов высокого вертикального

разрешения (HVRRD, high vertical-resolution radiosonde data). Подобные исследования проводились, например, над территорией США с использованием специальной обработки полученных профилей потенциальной температуры методом Торпа для выявления областей локальной турбулентности [28].

### **Определение EDR *in situ***

Исследования атмосферной турбулентности с помощью самолетов-лабораторий были начаты в середине прошлого века [1] и продолжают по сей день [2]. При этом самолет использовался, с одной стороны, как платформа для размещения приборов, с другой стороны – как сам измерительный прибор, поскольку турбулентное состояние атмосферы можно было опосредованно определить по его реакции, проявляющейся в изменении параметров полета. Именно реакция ВС, фиксируемая пилотажно-навигационными приборами и системами, легла в основу принципа определения скорости вихревой диссипации в свободной атмосфере и позволила реализовать его не только на специально оборудованных летающих лабораториях, но и на сотнях самолетов, совершающих регулярные рейсы.

Важно отметить, что определение значений EDR *in situ* не тождественно их измерению. Скорость диссипации вихрей не является непосредственно измеряемой величиной, а рассчитывается с использованием различных данных авионики самолета и вычислительных алгоритмов, использующих альтернативные методы с разными исходными данными и предположениями для расчета EDR [30].

В основе определения величины EDR лежат подходы, основанные на регистрации вертикальных ускорений ВС (акселерометрический метод) или базирующиеся на информации о вертикальной скорости [18].

Акселерометрический метод обеспечивает косвенный расчет EDR, который зависит от определенных предположений, касающихся поведения самолета при различных обстоятельствах. Этот метод считается косвенным, поскольку степень турбулентности определяется по реакции самолета на турбулентность и зависит от его веса, а не является непосредственным показателем атмосферы. В последние годы, однако, происходит довольно успешная модификация метода с применением, например, оценки вертикального ускорения при использовании нестационарных вихревых решеток [20].

Методы, основанные на вертикальной скорости, используют данные о ветре, регистрируемые различными бортовыми системами. Это может быть информация системы TAMDAR (включающая истинную воздушную скорость и углы крена) [18] или данные бортового интерфейса.

Например, алгоритм определения EDR, разработанный в аэрокосмическом центре Нидерландов (NLR), использует информацию бортового

эксплуатационного регистратора полетной информации (QAR – quick access recorder) [23,27], в том числе данные об истинной воздушной скорости, углах атаки, углах скольжения ВС.

Алгоритм NLR – это алгоритм, основанный на значениях вертикальной скорости ветра. Он вычисляет EDR ( $\varepsilon^{1/3}$ ) с использованием следующего выражения:

$$\varepsilon^{\frac{1}{3}} = \frac{\hat{\sigma}_{\omega}}{\sqrt{1.05V_a^{\frac{2}{3}}(\omega_1^{\frac{2}{3}} - \omega_2^{\frac{2}{3}})}}, \quad (1)$$

где  $V_a$  – воздушная скорость с фильтрацией нижних частот, которая представляет собой среднюю скорость полета, а  $\hat{\sigma}_{\omega}$  – вычисленное текущее стандартное отклонение изменений вертикального ветра после полосовой фильтрации с частотами на границах интервала  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (в [26] указаны 0.1 и 2 Гц). Скользящее временное окно имеет продолжительность 10 секунд. Вертикальная составляющая ветра рассчитывается как разность между инерционной скоростью  $V_i$  и аэродинамической скоростью  $V_a$ . Вектор инерционной скорости  $V_i$  оценивается через путевую скорость (относительно земной поверхности) и путевой угол (между северным направлением меридиана и направлением пути). Вектор аэродинамической скорости  $V_a$  оценивается по аэродинамической скорости, углу атаки и углу скольжения; первоначально рассчитывается в системе отсчета фюзеляжа, затем преобразуется в систему отсчета относительно земной поверхности.

Алгоритм NCAR [34], основанный на значениях вертикальной скорости ветра, разрабатывался для самолетов типа Boeing в Национальном центре атмосферных исследований США. Он имеет открытый исходный код для установки на этих ВС, однако детали алгоритма отсутствуют в открытом доступе. Известно только, что значения EDR рассчитываются на основании формулы:

$$\varepsilon^{\frac{1}{3}} = \sqrt{\frac{\gamma^2 \sum_{i=1}^N \frac{S_{\omega}(f_i)}{S_{model}(f_i)}}{N}}, \quad (2)$$

где суммирование производится по частотной области с  $N$  частотами,  $S_{\omega}(f_i)$  равен спектру мощности вертикальной составляющей ветра;  $\gamma^2$  – поправочный член;  $S_{model}(f_i)$  – это спектр эталонной модели, в котором соблюдаются условия спектральной модели фон Кармана для используемого турбулентного поля скоростей в несжимаемой изотропной среде. Вертикальная составляющая скорости ветра определяется так же, как и в предыдущем алгоритме, но угол скольжения ВС полагается равным нулю. Расчет «сырых» значений производится по данным о ветре каждые 10 сек. Далее, после фильтрации и калибровки каждые 60 сек выполняется передача пиковых и средних значений EDR [34].

Авторы работ, проводившие сравнение двух алгоритмов [30], заключают, что различные предположения относительно спектра эталонной

модели или значений угла скольжения, могут привести к получению разных значений EDR. Кроме того, данные, регистрируемые бортовым самописцем QAR, могут отличаться в зависимости от региона эксплуатации ВС и, таким образом, являться дополнительным источником неопределенности в оценках EDR.

### Градации интенсивности турбулентности по критерию EDR

До 2007 г. категории интенсивности турбулентности, обозначенные в Приложении 3 «Метеорологическое обеспечение международной авиации» к Чикагской Конвенции ИКАО, определялись по комбинации максимальных и осредненных за 15 мин значений EDR [10]. В 16-м издании Приложения 3 интерпретация информации об EDR изменилась. Теперь категории интенсивности турбулентности определялись по кубическому корню из максимального значения. Турбулентность считалась:

- сильной, когда максимальное значение кубического корня из EDR превышает 0.7;
- умеренной, когда максимальное значение кубического корня из EDR больше 0.4, но меньше или равно 0.7;
- слабой, когда максимальное значение кубического корня из EDR больше 0.1, но меньше или равно 0.4;
- нулевой, когда максимальное значение кубического корня из EDR меньше или равно 0.1.

После 2018 г. [6] интенсивность турбулентности предложено определять через максимальное значение EDR ( $EDR_{max}$ ) по следующим критериям:

- сильная, когда  $EDR_{max} \geq 0.45 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- умеренная, когда  $0,20 \leq EDR_{max} < 0.45 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- слабая, когда  $0,10 \leq EDR_{max} < 0.20 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- нулевая, когда  $EDR_{max} \leq 0.10 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Несмотря на принятие EDR в качестве стандарта ИКАО, некоторые авиакомпании (например, австралийские, новозеландские и часть европейских) в качестве объективно измеряемой характеристики интенсивности турбулентности до сих пор практикуют использование характеристики DEVG (извлеченная эквивалентная скорость вертикальных порывов) со значениями 2.0, 4.5 и 9 м/с для обозначения порогов слабой, умеренной и сильной интенсивности [30, 42]. Доказано, что DEVG может быть преобразована в величину EDR с использованием уравнения второго порядка:

$$EDR = a \cdot (DEVG)^2 + b \cdot (DEVG) + c, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа воздушного судна. Так, например, в [26] приведены следующие значения для самолетов Boeing:  $a = 0.0031$ ,  $b = 0.0286$ ,  $c = 0.0114$ .



## Повторяемость зон интенсивной турбулентности в атмосфере

Климатология параметра EDR в верхней тропосфере и нижней стратосфере была представлена в [42] по данным определения EDR *in situ* самолетами авиакомпании United Airlines и Delta Airlines в различные месяцы периода 2004–2013 гг. Выборка, относящаяся к FL200 (~6 км) и более высоким эшелонам, включала в себя более 130 млн сообщений об EDR *in situ*, рассчитанных по алгоритму, основанному на скорости ветра. Оказалось, что высокие значения EDR действительно наблюдаются очень редко (отчасти этот результат обусловлен стратегией обхода опасных зон, эффект которой трудно измерить количественно). Максимумы осредненных по высоте значений EDR были обнаружены на высотах 3 км и в зоне верхнетропосферных струйных течений (~11 км). Лишь в 10 % случаев значения EDR превысили порог «слабой» категории интенсивности турбулентности ( $> 0.1 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ ), повторяемость значений EDR  $> 0.5 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$  (сильная турбулентность) составила всего  $2 \cdot 10^{-5} \%$ . Для сравнения, анализ Национального совета по безопасности на транспорте США за 10 лет (2009–2018 гг.) отметил всего 49 происшествий без смертельного исхода, связанных с сильной турбулентностью [39]. По данным [44], оценивавшим статистику EDR в феврале 2005 г. над территорией США, число случаев с сильной турбулентностью ( $\text{EDR}_{\text{max}} > 0.45 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) составило 0.17 % по выборке из более чем 1.3 млн значений. При этом количество субъективных сообщений пилотов PIREP о сильной турбулентности за тот же период было в 8 раз больше (1.3 %).

## Прогнозирование EDR

*Метод GTG.* Разработанный в NCAR метод картирования прогностических характеристик турбулентности (GTG – graphical turbulence guidance) в стандартных единицах EDR [25, 43] предполагает логнормальное распределение плотности вероятности как для EDR, так и для диагностик турбулентности, получаемых по выходным данным модели численного прогноза погоды (ЧПП). Поиск пороговых значений для категорий интенсивности турбулентности производится путем сопоставления рассчитанных диагностик с сообщениями пилотов или с данными определения EDR *in situ*. Конвертация прогнозируемых моделью параметров в единицы EDR происходит отдельно для «неконвективной» турбулентности (в ясном небе, ТЯН, и орографической) [43], отдельно – для турбулентности, связанной с конвективной облачностью (convective-induced) на масштабах наукастинга, с заблаговременностью до 2 часов [38]. В первом случае использовались более 40 диагностик ТЯН (и их комбинаций) и 14 диагностик турбулентности, связанной с горными волнами, производился ансамблевый прогноз на базе моделей с быстрым циклом обновления. Во втором случае применялась технология блендинга. К модельному прогнозу EDR на 1 или 2 ч добавлялась (с определённым весом) информация о наблюдаемой EDR,

полученная по данным аэродромных наблюдений о ветре и его порывах, извлеченная из данных сети доплеровских радаров NEXRAD и бортовых сообщений.

*Прогнозирование турбулентности в модели ЕЦСПП.* Описание данного алгоритма подробно изложено в [14]. Так как в настоящее время в IFS (интегрированной прогностической системе) Европейского центра среднесрочных прогнозов отсутствует прогноз турбулентной кинетической энергии, невозможно получить непосредственно прогностические поля EDR. По этой причине было исследовано распределение вероятности для некоторых предикторов турбулентности, которое затем сопоставлялось с климатическим распределением EDR для выбора наиболее пригодных параметров. В качестве предикторов были выбраны:

– индекс Эллрода – Кнаппа (называемый также индексом TI или индексом Эллрода) [10];

– индекс волнового напряжения, GWD, связанный с подсеточным влиянием не орографических гравитационных волн;

– общая скорость турбулентной диссипации IFS в единицах EDR, которая выводится из физических тенденций модели для горизонтального импульса (DISS). DISS включает в себя вклад тенденций от схемы вертикальной диффузии (диссипация за счет турбулентного перемешивания, орографического волнового сопротивления, орографического блокирования и конвективного переноса импульса).

Исследование климатических распределений указанных выше параметров обнаружило, что они все подчиняются логнормальному закону, однако для двух последних оно наиболее близко к климатическому распределению EDR.

В качестве параметра турбулентности CAT2, включенного в 2021 г. в оперативную схему IFS для прогнозирования турбулентности в ясном небе в единицах EDR, используется соотношение:

$$\text{CAT2} = 0.66 \cdot \text{DISS} + \text{GWD}. \quad (4)$$

Результаты верификации ансамблевого прогноза на сутки этой величины на сетке с шагом 18 км с 15 членами ансамбля показали, что значение показателя ранговой оценки непрерывной вероятности (continues ranked probability score) не превышает  $0.03 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Поскольку градации интенсивности турбулентности фиксируются, как правило, через  $0.1 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$ , такие результаты можно считать вполне успешными.

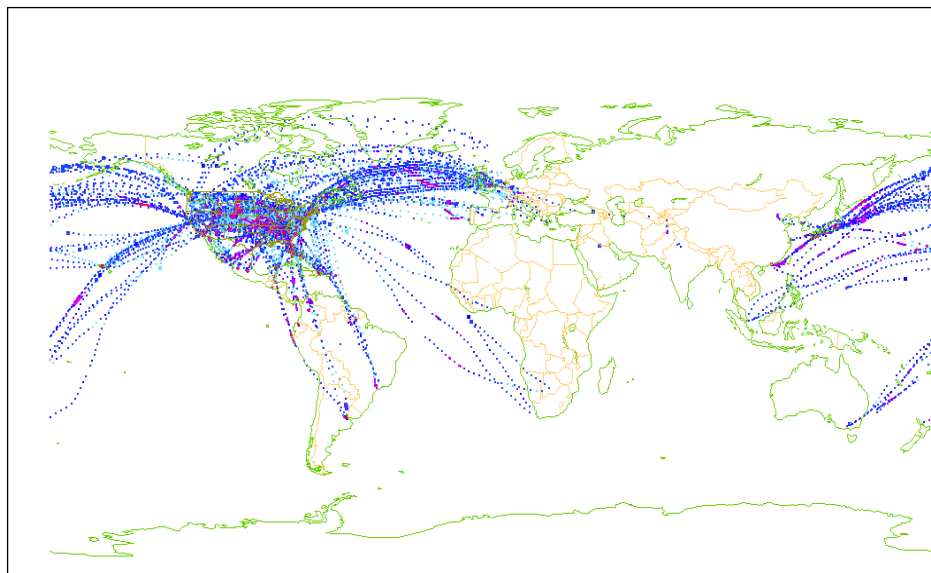
*Прогнозирование потенциала вихревой диссипации глобальной моделью Немецкой службы погоды.* Продукт численного прогнозирования Немецкой службы погоды, DWD, названный EDP (eddy dissipation potential) – «потенциалом вихревой диссипации» – по своему физическому смыслу формально идентичен EDR. Его измененное название подразумевает именно конкретный прогностический продукт, реализованный схемой параметризации турбулентности TURBDIFF в рамках модели численного

прогноза погоды ICON [21]. Анализ недостатков данной схемы позволил обнаружить следующее. Было доказано, что такие источники турбулентности, как разрушение горных волн, сдвиг ветра в струйных течениях, глубокая конвекция в модели хорошо разрешаются и параметризуются. Гораздо сложнее описывать фронтальную конвекцию, так как в схеме отсутствует описание горизонтальных градиентов вертикальной скорости и индуцируемых струей подсеточных инерциально-гравитационных волн. Тем не менее, сравнение в течение года прогностических значений EDP с данными наблюдений EDR *in-situ* позволило установить, что прогноз EDP по качеству превзошел прогноз индекса турбулентности Эллрода, традиционно используемого для метеообеспечения авиации.

Численный прогноз параметра EDR используется не только для оценки турбулентного состояния атмосферы при полетах ВС, но и для оценки вихревой безопасности с точки зрения скорости разрушения вихрей спутного следа на аэродроме. Например, в целях смягчения последствий вихревой турбулентности в аэропорту Мемфис (США) применяется прогноз по модели WRF со схемой замыкания турбулентной кинетической энергии Мэллора – Ямады – Янича, которая оказалась более эффективной, чем схема Бужо – Лакаррере [11].

Значительная сложность в прогнозировании характеристик турбулентности обусловлена подсеточным масштабом данного явления и часто – коротким временем жизни областей турбулентности. В этом смысле современные методы искусственного интеллекта [22, 29, 31, 35, 36, 47] могут расширить возможности численного прогноза EDR. Очевидно, что в областях со значительным количеством данных наблюдений *in situ*, как, например, территория США или северной Атлантики, проще сформировать обучающую выборку и верифицировать результаты. Так, в [36] приведен пример технологии машинного обучения для прогнозирования EDR. Здесь для реализации прогноза авиационной турбулентности на верхних уровнях (в слое от 6 до 14 км) исследовалась успешность применения методов случайного леса (RF) и деревьев регрессии (regression trees) с градиентным бустингом (GBRT). Для обучения модели, управляемой данными, использовались прогностические переменные и параметры турбулентности, извлекаемые из модели ЧПП с быстрым обновлением и высоким пространственным разрешением (3 км). Применение машинного обучения позволило существенно сократить ошибки в градации слабой турбулентности и более точно разделять (дискриминировать) прогностические значения EDR по категориям интенсивности.

К сожалению, над территорией Российской Федерации, представители которой более 20 лет тому назад объявили о намерениях присоединиться к программе передачи метеорологических данных с борта самолета (AMDAR – Aircraft Meteorological Data Relay), до сих пор констатируется практически полное отсутствие информации об EDR (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение областей передачи данных об EDR с борта воздушных судов (*in situ*) за сутки 25 апреля 2024 г. (обозначены синими точками). Информация с сайта <https://ruc.noaa.gov/amdar/java/>.

**Fig. 2.** Areas of aircraft EDR *in situ* data relay within 25 April 2024 (blue and red points). Reference source: <https://ruc.noaa.gov/amdar/java/>.

### Заключение

Проблемы предотвращения попадания воздушных судов в зоны интенсивной турбулентности обусловлены трудностями их обнаружения и прогнозирования из-за масштабов и нестационарности этого явления. Довольно продолжительное время предпринимались попытки описать турбулентное состояние атмосферы объективно, независимо от реакции на него самолета и находящихся в нем людей, пока в 2001 г. ИКАО не выбрала в качестве стандарта турбулентности параметр EDR, связанный со скоростью диссипации турбулентной кинетической энергии. Пороговые значения EDR, разделяющие градации интенсивности турбулентности, пересматривались несколько раз. С 2007 г. отказались от учета средних за период времени значений параметра EDR при оценке интенсивности турбулентности, с тех пор она определяется только по максимальным значениям.

EDR является не измеряемым, а вычисляемым параметром, для определения которого используются различные исходные данные и предположения. Не существует единой методики расчета скорости вихревой диссипации.

В настоящее время действует программа распознавания турбулентности IATA Turbulence Aware Международной организации воздушного транспорта IATA (International Air Transport Association) [<https://viewer-turb-aware.iata.org/>]. Она предусматривает глобальное информирование ВС в полете о турбулентном состоянии атмосферы через управление данными (data-driven). Такими данными служит информация о параметре EDR, получаемая на борту ВС в режиме реального времени, передаваемая на единую глобальную платформу и обрабатываемая там в течение 30 секунд. После этого данные о турбулентности могут распространяться любому заинтересованному потребителю, в том числе и другим бортам в полете с помощью средств визуализации [40].

Прогнозирование параметра EDR в моделях ЧПП осуществляется чаще всего с применением ансамблевого прогноза, иногда с использованием методов машинного обучения. Прогнозирование турбулентности в глобальном масштабе по маршруту полета на сегодняшний день выполняется центрами Всемирной системой зональных прогнозов ИКАО для девяти слоев, отцентрированных по эшелонам полета FL100, FL140, FL180, FL240, FL270, FL300, FL340, FL390, FL450 [6]. С ноября 2024 г. предполагается передавать глобальные прогнозы турбулентности в единицах EDR на сетке  $0.25 \times 0.25^\circ$  для каждого из 36 эшелонов (от FL100 до FL450) с заблаговременностью до 48 часов.

Несмотря на настойчивое внедрение ИКАО характеристики EDR в качестве стандарта для определения турбулентности, не так давно возник вопрос о необходимости корректировки стандартов.

На 41-й сессии Ассамблеи ИКАО в 2022 году Техническая комиссия предложила выработать рекомендации по разработке прикладных стандартов в отношении турбулентности в полете. Было указано, что «разработанная ИКАО система категорий турбулентности в полете не позволяет точно определить турбулентность для различных типов воздушных судов, что затрудняет принятие экипажем надлежащих мер реагирования» [7]. Таким образом, именно «независимость» характеристики EDR от типа воздушного судна стала помехой в некоторых процедурах управления полетом. Было подчеркнуто, что при эксплуатации различных типов воздушных судов члены экипажа по-разному воспринимают одинаковые значения EDR.

Восприятие экипажем болтанки может определяться нагрузкой на воздушное судно. Экипаж должен принимать соответствующие меры при встрече с турбулентностью на основе диапазона режимов полета и запаса маневренности воздушного судна под нагрузкой. Поэтому необходимо установить соотношение между EDR и нагрузкой на воздушное судно,  $G$ , которое будет использоваться для преобразования прогнозируемых значений погодной турбулентности в величину, характеризующую ее корректное восприятие экипажем.

Будущий прикладной стандарт определения турбулентности в полете предусматривает использование особого индекса турбулентности, который будет способен дополнять существующий стандарт для представления

информации об интенсивности турбулентности. Индекс турбулентности будет получен в результате преобразования прогнозируемого значения EDR и значения, связанного с нагрузкой, EDR-G, по разрабатываемым в настоящее время формулам с учетом соответствующего типа воздушного судна.

### Список литературы

1. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 336 с.
2. Волков В.В., Струнин М.А., Струнин А.М. Определение сдвига ветра и интенсивности турбулентности по данным самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 117-129.
3. Голицын Г.С. Методические основы теории турбулентности и морского волнения // Лекции лауреатов Демидовской премии (1993–2004). Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2006. С. 122-137.
4. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР. 1941. Т. 30, № 4. С. 299-303.
5. Копров Б.М. Из истории исследований пограничного слоя в Институте физики атмосферы АН СССР // Известия РАН. ФАО. 2018. Том. 54, №. 3. С. 330-343.
6. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации: Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, 2018.
7. Рекомендации по разработке прикладных стандартов в отношении турбулентности в полете // Рабочий документ 41-й Ассамблеи ИКАО, A41-WP/2351 TE/82 1/8/22. [https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp\\_235\\_ru.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_235_ru.pdf)
8. Смалихо И.Н., Банаш В.А., Фалиц А.В., Руди Ю.А. Определение скорости диссипации турбулентной энергии из данных, измеренных лидаром “Stream Line”, в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2015. Том. 28, № 10. С. 901-907. DOI: 10.15372/AOO20151006
9. Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Живоглотов Д.Н. и др. Опыт исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с помощью беспилотного летательного аппарата // Известия РАН. ФАО. 2021. Том. 57, №. 5. С. 602-610. DOI: 10.31857/S0002351521050047
10. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада, 2016. 312 с.
11. Ahmad N.N., Proctor F.H. Estimation of Eddy Dissipation Rates from Mesoscale Model Simulations // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 Jan 2012, Nashville, TN, USA. 24 p. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120000925>
12. Airborne Measurements for Environment Research: Methods and Instruments / Ed. Wendisch M., Brenguier J.-L., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2013. DOI:10.1002/9783527653218
13. Aviation turbulence: Processes, Detection, Prediction / Ed.: Sharman R., Lane T. Springer, 2016. 523 p. DOI 10.1007/978-3-319-23630-8
14. Bechold P., Bramberger M., Dörnbrack A., Isaksen L. & Leutbecher M. Experimenting with a Clear Air Turbulence (CAT) index from the IFS // ECMWF 2021. Technical Memorandum No. 874.
15. Chan P.W. Measurement of Eddy Dissipation Rate by a Mini-sodar for Aviation Application: Comparison with Tower Measurement // Preprints, 11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., P4.9. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81174.pdf>

16. Chan P.W. Generation of an Eddy Dissipation Rate Map at the Hong Kong International Airport Based on Doppler Lidar Data // J. Atmos. Ocean. Technol. 2011. Vol. 28. P. 37-49. DOI: 10.1175/2010JTECHA1458.1
17. Cornman L., Morse C.S., Cuning G. Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in-situ aircraft measurements // Journal of Aircraft. 1995. Vol. 32, no.1. P. 171-177.
18. Emanuel M., Sherry J., Cornman L., Robinson P. In Situ Performance Standard for Eddy Dissipation Rate // Proceedings of 16th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 5-9 Jan 2013, Austin, USA. <https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Paper219007.html>
19. Frech M. A simple method to estimate the eddy dissipation rate from SODAR/RASS measurements // 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, AMS, Portland, Paper 6.13, 2004. 4 p.
20. Gao Z., Wang H., Qi K., Xiang Z., Wang D. Acceleration-based in situ eddy dissipation rate estimation with flight data // Atmosphere. 2020. Vol. 11. P. 1247. DOI: 10.3390/atmos11111247
21. Göeke T., Machulskaya E. Aviation turbulence forecasting in DWD with ICON: methodology, case studies and verification // Mon. Wea. Rev. 2021. Vol. 149. P. 2115-2130. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0383.1
22. Hon K.K., Ng C.W., Chan P.-W. et al. Machine learning based multi-index prediction of aviation turbulence over the Asia-Pacific // Machine Learning with Applications. 2020. DOI: 10.1016/j.mlwa.2020.100008
23. Huang R., Sun H., Wu Ch., Wang Ch., Lu B. Estimating Eddy Dissipation Rate with QAR Flight Big Data // Applied Science. 2019. Vol. 9, no. 23. P. 5192. DOI: 10.3390/app9235192
24. Karman von T. Progress in statistical theory of turbulence // Journal of Marine Research. 1948. Vol. 7. P. 252-264.
25. Kim S.-H., Chun H.-Y. Comparison of Turbulence Indicators Obtained from In Situ Flight Data // J. Appl. Met. Clim. 2017. Vol. 56. P. 1609-1623.
26. Kim S.-H., Chun H.-Y., Kim J.-H., Sharman R.D., Strahan M. Retrieval of eddy dissipation rate from derived equivalent vertical gust included in Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) // Atmos. Meas. Tech. 2020. Vol. 13. P. 1373-1385. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1373-2020>
27. Kim S.-H., Kim J., Kim J.-H., Chun H.-Y. Characteristics of the derived energy dissipation rate using the 1 Hz commercial aircraft quick access recorder (QAR) data // Atmos. Meas. Tech. 2022. Vol. 15. P. 2277-2298. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2277-2022>
28. Ko H.-C., Chun H.-Y., Wilson R., Geller M.A. Characteristics of Atmospheric Turbulence Retrieved From High Vertical-Resolution Radiosonde Data in the United States // J. Geophys. Res.: Atmospheres. Vol. 124. P. 7553-7579. <https://doi.org/10.1029/2019JD030287>
29. Lee D.B., Chun H.-Y., Kim S.-H., Sharman R. D., Kim J.-H. Development and Evaluation of Global Korean Aviation Turbulence Forecast Systems Based on an Operational Numerical Weather Prediction Model and In Situ Flight Turbulence Observation Data // Wea. Forecast. 2022. Vol. 37. P. 371-392. DOI: 10.1175/WAF-D-21-0095.1
30. Lee J.C.W., Leung C.Y.Y., Kok M.H., Chan P.W. A Comparison Study of EDR Estimates from the NLR and NCAR Algorithms // Atmosphere. 2022. Vol. 13. P. 132. <https://doi.org/10.3390/atmos13010132>
31. Lee Y., Kim S.-H., Noh Y.-J., Kim J.-H. Deep Learning-Based Summertime Turbulence Intensity Estimation Using Satellite Observations // J. Atmos. Ocean. Technol. 2023. Vol. 40. P. 1433-1447. DOI: 10.1175/JTECH-D-22-0137.1
32. McCready P.B. Standardization of Gustiness Values from Aircraft // J. Appl. Meteorol. 1964. Vol. 3. P. 439-449.
33. Meischner P., Baumann R., Höller H., Jank T. Eddy Dissipation Rates in Thunderstorms Estimated by Doppler Radar in Relation to Aircraft In Situ Measurements // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. Vol. 18. P. 1609-1626.
34. Meymaris G., Sharman R., Cornman L., Deierling W. The NCAR in-situ Turbulence detection algorithm // NCAR Technical Note. NCAR/TN-560+EDD, June 2019.

35. Mizuno S., Ohba H., Ito K. Machine learning-based turbulence-risk prediction method for the safe operation of aircrafts // *Journal of Big Data*. 2022. <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00584-5>
36. Muñoz-Esparza D., Sharman R., Deierling W. Aviation Turbulence Forecasting at Upper Levels with Machine Learning Techniques Based on Regression Trees // *J. Appl. Met. Clim.* 2020. Vol. 59. P. 1883-1899. DOI: 10.1175/JAMC-D-20-0116.1
37. Oude Nijhuis A.C.P., Unal C.M.H., Krasnov O.A., Russchenberg H.W.J., Yavorov A.G. Velocity-Based EDR Retrieval Techniques Applied to Doppler Radar Measurements from Rain: Two Case Studies // *J. Atmos. Ocean. Techn.* 2019. Vol. 36. P. 1696-1710.
34. Pearson J.M., Sharman R.D. Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence. Part I: Nowcasting Convective Turbulence and Nonconvective Turbulence // *J. Appl. Met. Clim.* 2017. Vol. 56. P. 339-351. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0205.1
39. Preventing Turbulence-Related Injuries in Air Carrier Operations Conducted Under Title 14 Code of Federal Regulations Part 121 // National Transportation Safety Board. Safety Research Report. NTSB/SS-21/01. Washington, D.C. Adopted August 10, 2021.
40. Robeck V. IATA Turbulence Aware // IATA AACO Technical Forum, Kuwait, 1-2 Oct 2019. <https://www.aaco.org/events/aaco/aaco-technical-forum>
41. Robinson P., Buck B., Bowles R., Boyd D., Cornman L. Optimization of the NCAR In Situ Turbulence Measurement Algorithm // 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit: Reno, Nevada. 10-13 January 2000. <https://www.researchgate.net/publication/269068707>
42. Sharman R.D., Cormann L.B., Meymaris G., Pearson J., Farrar T. Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence // *J. Appl. Met. Clim.* 2014. Vol. 53. P. 1416-1431. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0329.1
43. Sharman R.D., Pearson J.M. Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence. Part I: Forecasting Nonconvective Turbulence // *J. Appl. Met. Clim.* 2017. Vol. 56. P. 317-338. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0205.1
44. Takacs A., Holland L., Huefle R., Brown B., Holmes A. Using in situ eddy dissipation rate (EDR) observations for turbulence forecast verification // Report to the FAA Aviation Weather Research Program (October 2005). Research Applications Laboratory, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO. 28 pp.
45. Thielicke W., Hübert W., Müller U., Eggert M., Wilhelm P. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. Vol.14. P. 1303-1318. <https://doi.org/10.5194/amt-14-1303-2021>.
46. Wang G., Yang F., Wu K., Ma Y., Peng C., Liu T., Wang L.-P. Estimation of the dissipation rate of turbulent kinetic energy: A review // *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 229. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116133>
47. Zhuang Z., Zhang H., Chan P.-W., Tai H., Deng Z. A Machine Learning-Based Model for Flight Turbulence Identification Using LiDAR Data // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. P. 797. <https://doi.org/10.3390/atmos14050797>.

## References

- Vinnichenko N.K., Pinus N.Z., Shmeter S.M., Shur G.N. Turbulentnost' v svobodnoj atmosfere. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1968, 336 p. [in Russ.].
- Volkov V.V., Strunin A.M., Strunin M.A. Determination of wind shear and turbulence intensity according to YAK42-d "Roshydromet" research aircraft data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, № 9, pp. 640-649. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-9-117-129
- Golitsyn G.S. Metodicheskie osnovy teorii turbulentnosti i morskogo volneniya. *Lektsii laureatov Demidovskoy premii* (1993-2004). Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2006, pp. 122-137 [in Russ.].
- Kolmogorov A.N. Lokal'naya struktura turbulentnosti v neshzimaemoy vyazkoy zhidkosti pri ochen' bol'shikh chislah Reynol'dsa. *Doklady AN SSSR*, 1941, vol. 30, no. 4, pp. 299-303 [in Russ.].
- Koprov B.M. From the history of boundary-layer studies at the Institute of Atmospheric Physics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 382-392. DOI: 10.7868/S0003351518030091



6. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoy aeronavigatsii: Prilozhenie 3 k Konventsii o mezhdunarodnoy grazhdanskoj aviatsii. ICAO, 2018 [in Russ.].
7. Rekomendatsii po razrabotke prikladnyh standartov v otnoshenii turbulentsnosti v polete // Rabochiy dokument 41-y Assamblei ICAO, A41-WP/2351 TE/82 1/8/22. Available at: [https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp\\_235\\_ru.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_235_ru.pdf) [in Russ.].
8. Smalikho I.N., Banakh V.A., Falits A.V., Rudi Yu.A. Determination of the turbulent energy dissipation rate from data measured by a "Stream Line" lidar in the atmospheric surface layer. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2015, vol. 28, no. 10, pp. 901-905. DOI: 10.15372/AOO20151006 [in Russ.].
9. Chechin D.G., Artamonov A.Yu., Bondukov N.E., Zhivoglotov D.N. et al. Opyt issledovaniya turbulentnoy struktury atmosfernogo pogranichnogo sloja s pomoshhyu bespilotnogo letatel'nogo apparata.. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 526-532. DOI: 10.31857/S0002351521050047
10. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovaniye meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 312 p. [in Russ.].
11. Ahmad N.N., Proctor F.H. Estimation of Eddy Dissipation Rates from Mesoscale Model Simulations. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 Jan 2012, Nashville, TN, USA. 24 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120000925>
12. Airborne Measurements for Environment Research: Methods and Instruments. Ed. Wendisch M., Brenguier J.-L., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2013. DOI: 10.1002/9783527653218.
13. Aviation turbulence: Processes, Detection, Prediction. Ed.: Sharman R., Lane T. Springer, 2016. 523 p. DOI 10.1007/978-3-319-23630-8
14. Bechtold P., Bramberger M., Dörnbrack A., Isaksen L. & Leutbecher M. Experimenting with a Clear Air Turbulence (CAT) index from the IFS. ECMWF 2021. *Technical Memorandum No. 874*.
15. Chan P.W. Measurement of Eddy Dissipation Rate by a Mini-sodar for Aviation Application: Comparison with Tower Measurement. Preprints. *11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., P4.9. Available at: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81174.pdf>
16. Chan P.W. Generation of an Eddy Dissipation Rate Map at the Hong Kong International Airport Based on Doppler Lidar Data. *J. Atm. Ocean. Techn.*, 2011, vol. 28. pp. 37-49. DOI: 10.1175/2010JTECHA1458.1.
17. Cornman L., Morse C.S., Cuning G. Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in-situ aircraft measurements. *Journal of Aircraft*, 1995, vol. 32, no. 1, pp. 171-177.
18. Emanuel M., Sherry J., Cornman L., Robinson P. In Situ Performance Standard for Eddy Dissipation Rate. *Proceedings of 16th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 5-9 Jan 2013, Austin, USA. Available at: <https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Paper219007.html>
19. Frech M. A simple method to estimate the eddy dissipation rate from SODAR/RASS measurements. *16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, AMS, Portland, Paper 6.13, 2004. 4 p.
20. Gao Z., Wang H., Qi K., Xiang Z., Wang D. Acceleration-based in situ eddy dissipation rate estimation with flight data. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, pp. 1247. DOI: 10.3390/atmos11111247.
21. Göeke T., Machulskaya E. Aviation turbulence forecasting in DWD with ICON: methodology, case studies and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 2021, vol. 149, pp. 2115-2130. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0383.1.
22. Hon K.K., Ng C.W., Chan P.-W. et al. Machine learning based multi-index prediction of aviation turbulence over the Asia-Pacific. *Machine Learning with Applications*, 2020. DOI: 10.1016/j.mlwa.2020.100008.
23. Huang R., Sun H., Wu Ch., Wang Ch., Lu B. Estimating Eddy Dissipation Rate with QAR Flight Big Data. *Applied Science*, 2019, vol. 9, no. 23, pp. 5192. DOI: 10.3390/app9235192.

24. Karman von T. Progress in statistical theory of turbulence. *Journal of Marine Research*, 1948, vol. 7, pp. 252-264.
25. Kim S.-H., Chun H.-Y. Comparison of Turbulence Indicators Obtained from In Situ Flight Data. *J. Appl. Met. Clim.*, 2017, vol. 56, pp. 1609-1623.
26. Kim S.-H., Chun H.-Y., Kim J.-H., Sharman R.D., Strahan M. Retrieval of eddy dissipation rate from derived equivalent vertical gust included in Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR). *Atmos. Meas. Tech.*, 2020, vol. 13, pp. 1373-1385. DOI: 10.5194/amt-13-1373-2020.
27. Kim S.-H., Kim J., Kim J.-H., Chun H.-Y. Characteristics of the derived energy dissipation rate using the 1 Hz commercial aircraft quick access recorder (QAR) data. *Atmos. Meas. Tech.*, 2022, vol. 15, pp. 2277-2298. DOI: 10.5194/amt-15-2277-2022.
28. Ko H.-C., Chun H.-Y., Wilson R., Geller M.A. Characteristics of Atmospheric Turbulence Retrieved From High Vertical-Resolution Radiosonde Data in the United States. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, vol. 124, pp. 7553-7579. DOI: 10.1029/2019JD030287.
29. Lee D.B., Chun H.-Y., Kim S.-H., Sharman R. D., Kim J.-H. Development and Evaluation of Global Korean Aviation Turbulence Forecast Systems Based on an Operational Numerical Weather Prediction Model and In Situ Flight Turbulence Observation Data. *Wea. Forecast.*, 2022, vol. 37, pp. 371-392. DOI: 10.1175/WAF-D-21-0095.1.
30. Lee J.C.W., Leung C.Y.Y., Kok M.H., Chan P.W. A Comparison Study of EDR Estimates from the NLR and NCAR Algorithms. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, pp. 132. DOI:10.3390/atmos13010132.
31. Lee Y., Kim S.-H., Noh Y.-J., Kim J.-H. Deep Learning-Based Summertime Turbulence Intensity Estimation Using Satellite Observations. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, 2023, vol. 40, pp. 1433-1447. DOI: 10.1175/JTECH-D-22-0137.1.
32. McCready P.B. Standardization of Gustiness Values from Aircraft. *J. Appl. Meteorol.*, 1964, vol. 3, pp. 439-449.
33. Meischner P., Baumann R., Höller H., Jank T. Eddy Dissipation Rates in Thunderstorms Estimated by Doppler Radar in Relation to Aircraft In Situ Measurements. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, 2001, vol. 18, pp. 1609-1626.
34. Meymaris G., Sharman R., Cornman L., Deierling W. The NCAR in-situ Turbulence detection algorithm. *NCAR Technical Note. NCAR/TN-560+EDD*, June 2019.
35. Mizuno S., Ohba H., Ito K. Machine learning-based turbulence-risk prediction method for the safe operation of aircrafts. *Journal of Big Data*. 2022. DOI: 10.1186/s40537-022-00584-5.
36. Muñoz-Esparza D., Sharman R., Deierling W. Aviation Turbulence Forecasting at Upper Levels with Machine Learning Techniques Based on Regression Trees. *J. Appl. Met. Clim.*, 2020, vol. 59, pp. 1883-1899. DOI: 10.1175/JAMC-D-20-0116.1.
37. Oude Nijhuis A.C.P., Unal C.M.H., Krasnov O.A., Russchenberg H.W.J., Yavorov A.G. Velocity-Based EDR Retrieval Techniques Applied to Doppler Radar Measurements from Rain: Two Case Studies. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, 2019, vol. 36, pp. 1696-1710.
38. Pearson J.M., Sharman R.D. Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence. Part I: Nowcasting Convective Turbulence and Nonconvective Turbulence. *J. Appl. Met. Clim.*, 2017, vol. 56, pp. 339-351. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0205.1.
39. Preventing Turbulence-Related Injuries in Air Carrier Operations Conducted Under Title 14 Code of Federal Regulations Part 121. National Transportation Safety Board. Safety Research Report. NTSB/SS-21/01. Washington, D.C. Adopted August 10, 2021.
40. Robeck V. IATA Turbulence Aware. *IATA AACO Technical Forum*, Kuwait, 1-2 Oct 2019. Available at: <https://www.aaco.org/events/aaco/aaco-technical-forum>.
41. Robinson P., Buck B., Bowles R., Boyd D., Cornman L. Optimization of the NCAR In Situ Turbulence Measurement Algorithm. *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*: Reno, Nevada. 10-13 January 2000. Available at: [www.researchgate.net/publication/269068707](http://www.researchgate.net/publication/269068707)
42. Sharman R.D., Cornman L.B., Meymaris G., Pearson J., Farrar T. Description and Derived Climatologies of Automated In Situ Eddy-Dissipation-Rate Reports of Atmospheric Turbulence. *J. Appl. Met. Clim.*, 2014, vol. 53, pp. 1416-1431. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0329.1.

43. Sharman R.D., Pearson J.M. Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence. Part I: Forecasting Nonconvective Turbulence. *J. Appl. Met. Clim.*, 2017, vol. 56, pp. 317-338. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0205.1.

44. Takacs A., Holland L., Huefite R., Brown B., Holmes A. Using in situ eddy dissipation rate (EDR) observations for turbulence forecast verification. *Report to the FAA Aviation Weather Research Program* (October 2005). Research Applications Laboratory, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO. 28 pp.

45. Thielicke W., Hübert W., Müller U., Eggert M., Wilhelm P. Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer. *Atmos. Meas. Tech.*, 2021, vol. 14, pp. 1303-1318. <https://doi.org/10.5194/amt-14-1303-2021>.

46. Wang G., Yang F., Wu K., Ma Y., Peng C., Liu T., Wang L.-P. Estimation of the dissipation rate of turbulent kinetic energy: A review. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 229. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116133.

47. Zhuang Z., Zhang H., Chan P.-W., Tai H., Deng Z. A Machine Learning-Based Model for Flight Turbulence Identification Using LiDAR Data. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, pp. 797. DOI: 10.3390/atmos14050797.

*Поступила 17.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024;  
принята в печать 17.06.2024.*

*Submitted 17.05.2024; approved after reviewing 06.06.2024;  
accepted for publication 17.06.2024.*