

СКОРОСТЬ ВИХРЕВОЙ ДИССИПАЦИИ КАК МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ МЕТЕООБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ

А.Р. Иванова, Н.П. Шакина, Н.И. Комасько,
Е.Н. Скриптунова, А.А. Завьялова, У.О. Соколова



ФГБУ «Гидрометцентр России»

Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва,
19-21 ноября 2024 г.

Турбулентность как причина авиационных происшествий

- По данным Федерального авиационного агентства США болтанка самолетов как результат действия турбулентности является основной причиной травм борпроводников и пассажиров воздушного судна в результате происшествий без смертельного исхода. Ежегодно 58 человек в США получают травмы в случаях болтанки, будучи непристегнутыми.
- По данным Управления гражданской авиации Китая, в период с 2017 по 2021 год произошло более 1700 инцидентов, связанных с турбулентностью

- **PIREP** - сводки содержат 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, что не позволяло оценить реальную картину возмущенности атмосферы вокруг ВС.

Степень воздействия на воздушное судно
(интенсивность турбулентности):



- **Умеренная** – небольшие изменения в высоте воздушного судна. Контроль над судном сохраняется все время. Изменения воздушной скорости незначительны.
- **Сильная** – резкие изменения в пространственном положении и/или высоте. На короткое время может теряться контроль над ВС. Велики изменения воздушной скорости.
- **Экстремальная** – эффекты более выражены, чем для сильной турбулентности.



- **1941 г.** - А.Н. Колмогоров «Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса», введено понятие интервала равновесия
- **1948 г.** - Теодор фон Карман разработал эмпирическую формулу, описывающую энергетический спектр линейки масштабов, включающей инерционный интервал
- **1964 г.** – Пол Маккриди, обсуждая возможность стандартизации интенсивности атмосферной турбулентности, воздействующей на ВС вне зависимости от типа самолета, предложил использовать теорию Колмогорова для введения понятия коэффициента диссипации энергии, ϵ . Эта величина на инерционном интервале связывает статистическое количество вихрей с их размером. Энергетический спектр турбулентности в любом направлении будет пропорционален $\epsilon^{2/3} \lambda^{5/3}$ (λ - длина волны), и обычно распространяется на турбулентные возмущения на масштабах от нескольких сантиметров до 200-300 м
- **1994 г.** – специалисты Национального центра по атмосферным исследованиям США, базируясь на теоретических положениях об инерционном интервале, предложили первый алгоритм определения в полете EDR *in situ*
- **2001 г.** – Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) был принят метод определения EDR *in situ* в качестве стандарта для автоматических сообщений о турбулентности коммерческими самолетами, а сама характеристика EDR утверждена как стандартный показатель атмосферной турбулентности
- **2024 г.** – с 26 ноября после реформы ВСЗП согласно регламенту ИКАО турбулентность на эшелонах по маршруту полета определяется через единицы EDR

Paul McCready, 1964

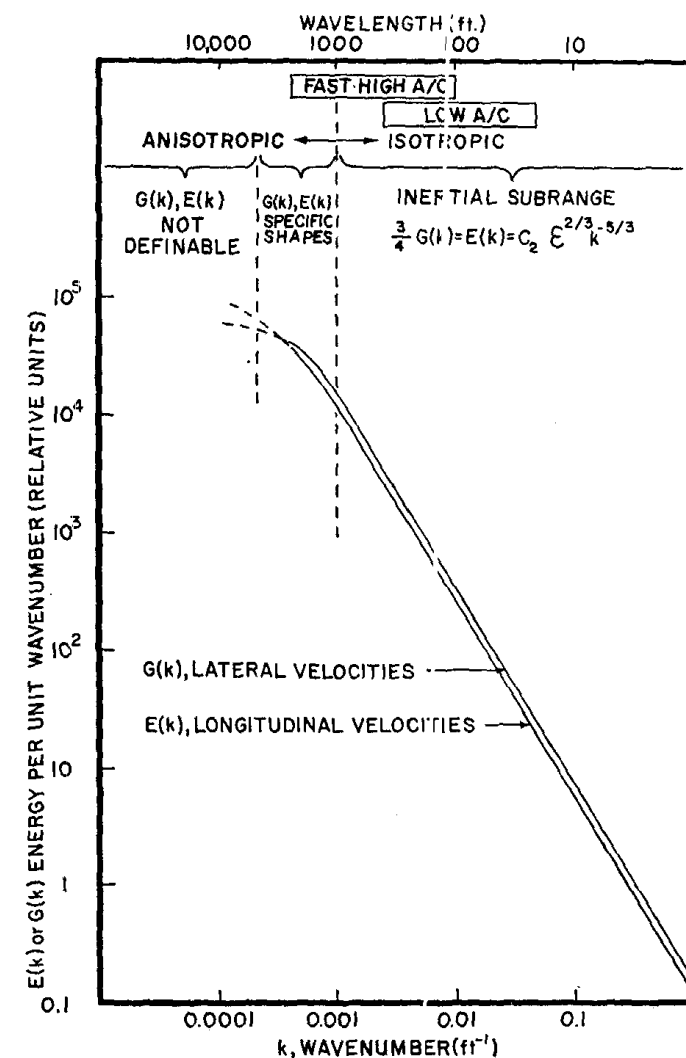


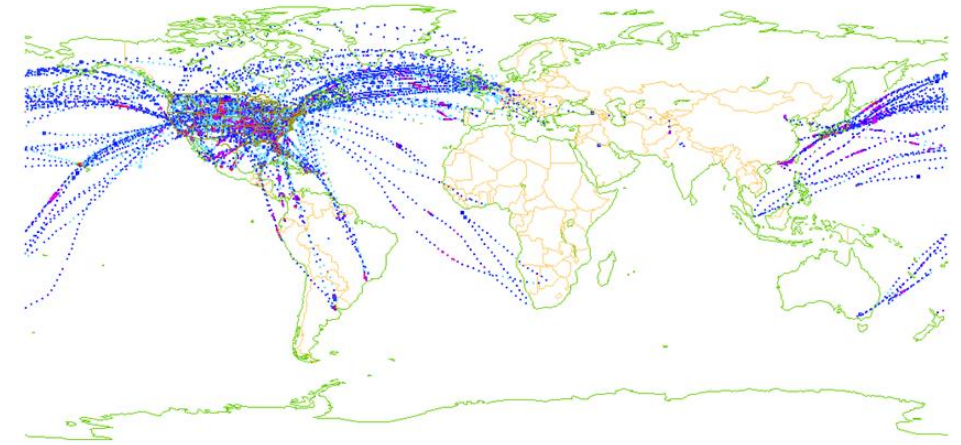
FIG. 1. Atmospheric turbulence power spectra and the wavelength ranges of importance for aircraft.

Методы определения EDR *in-situ*

Основаны на данных :

- об ускорении ВС (акселерометрический)
- о скорости ВС и параметрах полета: углах скольжения, атаки, крена (TAMDAR, QAR)

**EDR –
кубический корень из
скорости вихревой
диссипации**



Алгоритм NLR

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

V_a – воздушная скорость с
фильтрацией нижних частот, σ_ω –
стандартное отклонение изменений
вертикального ветра после
полосовой фильтрации в окне $\omega_1 -$
 ω_2

Алгоритм NCAR

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

γ^2 – поправочный коэффициент, N –
кол-во частот, S_ω – спектр мощности
верт. скорости, S_{model} – спектр
эталонной модели

Градации интенсивности турбулентности:

- отсутствие: $EDR_{max} \leq 0,10 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$
- слабая: $0,10 \leq EDR_{max} < 0,20 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$;
- умеренная: $0,20 \leq EDR_{max} < 0,45 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$;
- сильная: $EDR_{max} \geq 0,45 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$;

Климатология :

- Вся турбулентность ($EDR \geq 0,10 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$) – 10%
- Сильная турбулентность – 10⁻⁵%

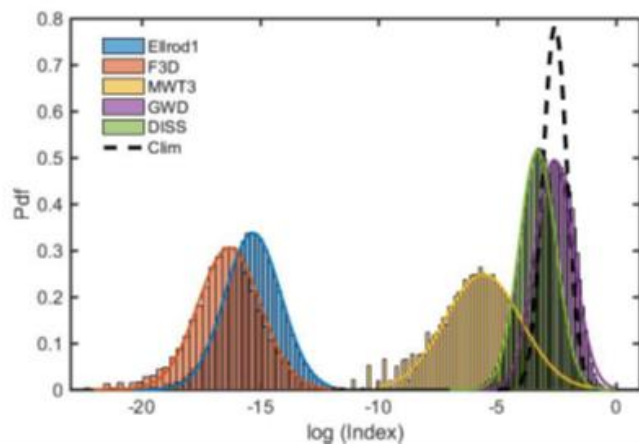
Опасное влияние на ВС - обязательна к передаче
информация об умеренной (MOD) и сильной
(SEV) турбулентности

Прогнозирование EDR

- Турбулентность, не связанная с конвекцией (non-CIT)
- Краткосрочный прогноз
- Модель ЧПП
- Диагностики ТЯН и ГВ

Алгоритм IFS:

$TURB = 0.66 \cdot DISS + GWD$, где индекс волнового напряжения, GWD связанный с подсеточным влиянием не орографических гравитационных волн, $DISS$ – общая скорость турбулентной диссипации



Алгоритм GTG:

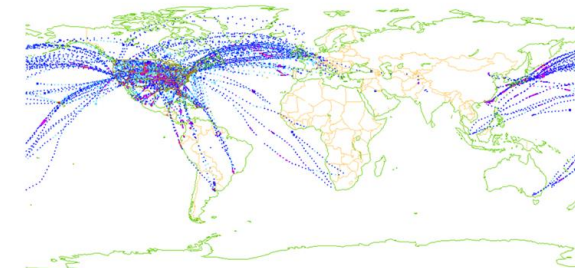
Ансамблевый прогноз с использованием 40 индексов SAT и их комбинаций и 14 характеристик MWT

- Турбулентность, индуцируемая конвекцией (CIT)

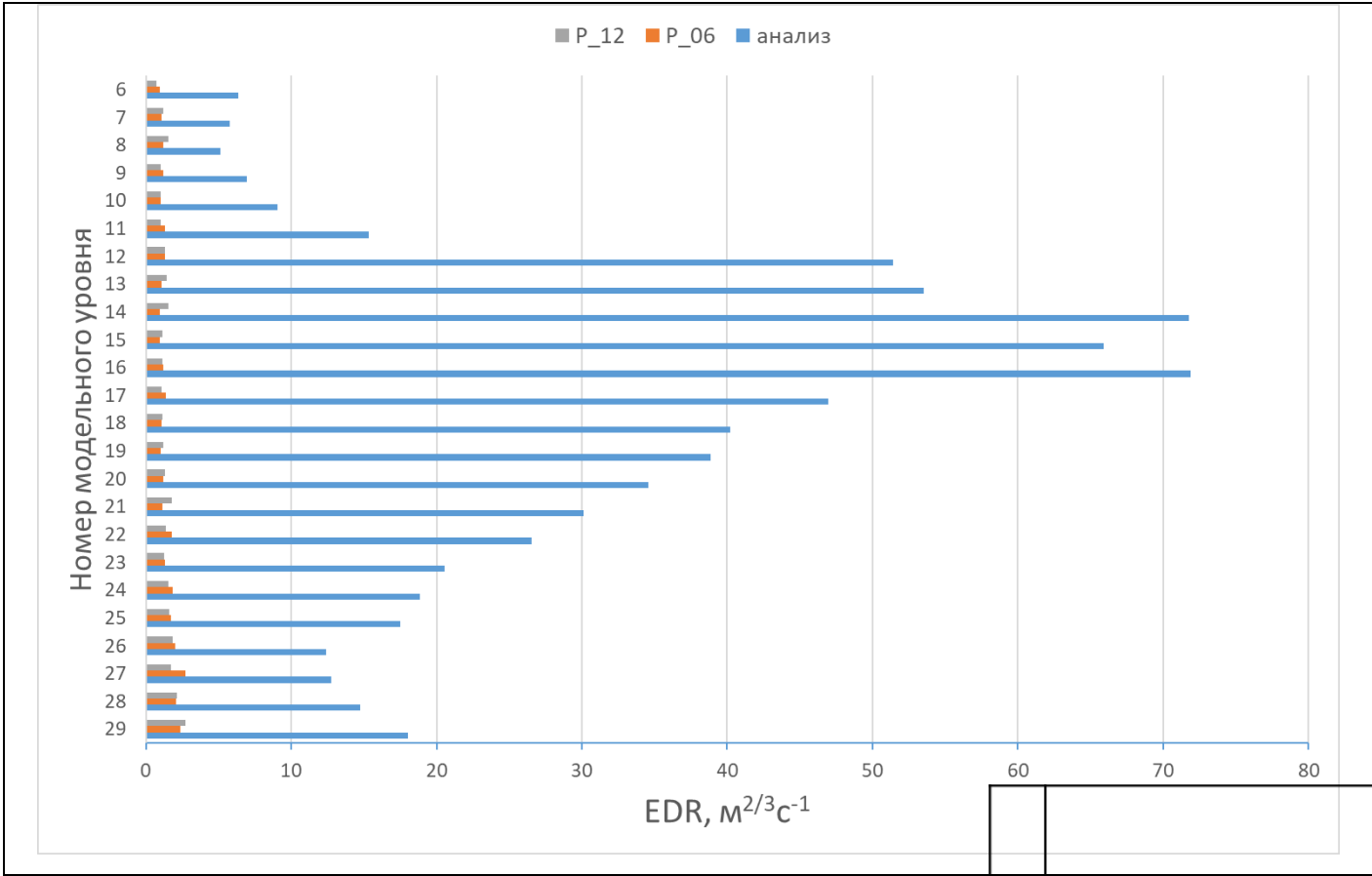


- Наукастинг
- Блендинг (ЧПП 1-2 ч + наблюдения)

AMDAR – Aircraft Meteorological Data Relay – передача метеорологических данных с самолета



EDR на модельных уровнях в начальных (голубой) и прогностических (оранжевый – на 6 ч, серый – на 12 ч) полях модели COSMO-RuENA6.6. Результат работы модуля «Турбулентность» в модели COSMO-Ru-ENA6.6

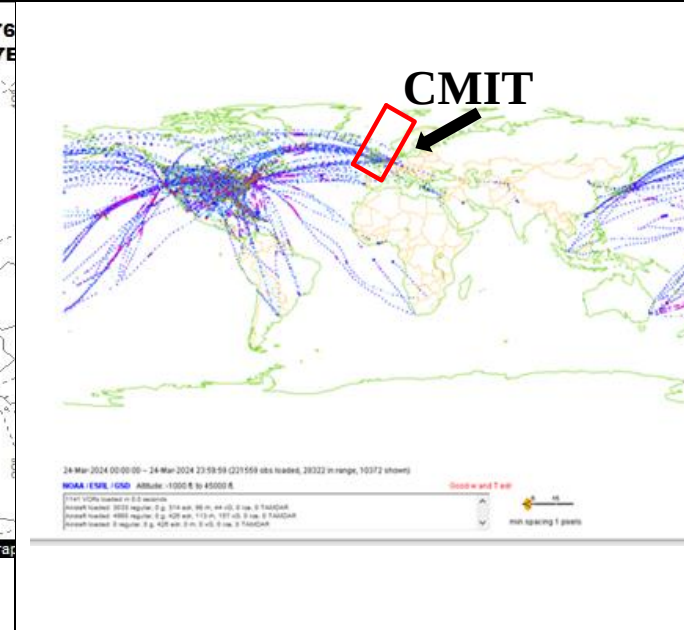
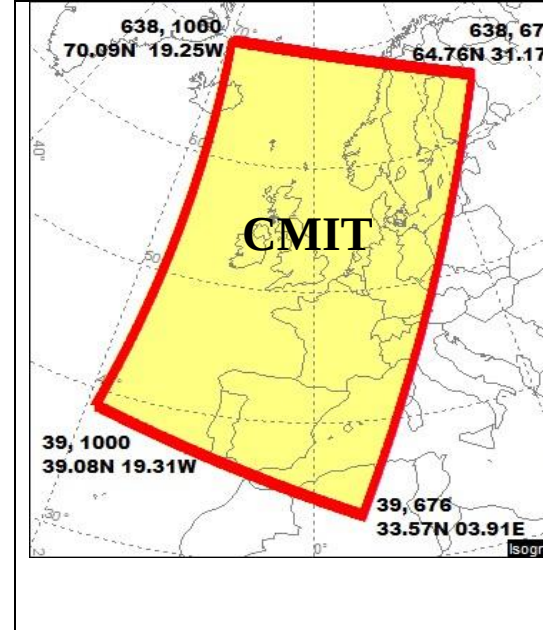
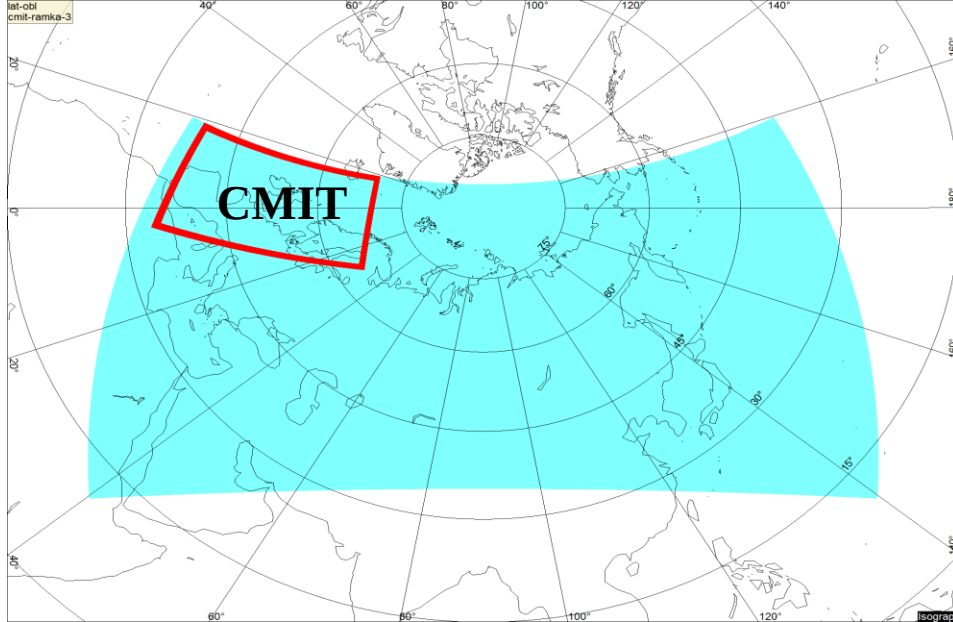


EDP – eddy dissipation potential в модели ICON:

Достоинства: Хорошее разрешение и параметризация разрушения горных волн, сдвига ветра в СТ, глубокой конвекции

Недостатки: отсутствие описания горизонтальных градиентов вертикальной скорости и индуцируемых струей подсеточных инерционно-гравитационных волн

		Анализ			
Прогноз на 6/12 ч		1 - нулевая	2- слабая	3- умеренная	4- сильная
	1	99.11/99.01	64.31/66.94	65.07/68.40	44.17/47.71
	2	0.83/0.93	33.14/30.73	29.76/27.93	41.91/39.58
	3	0.05/0.06	2.49/2.28	4.95/4.30	12.84/11.70
	4	0.0001/0.001	0.05/0.05	0.22/0.20	1.08/1.01



Голубое поле – область прогнозирования модели COSMO-Ru6ENA. Красной рамкой выделена область сбора возможной информации об EDR (регион CMIT).

AC#9757 CMH-->BOS starting at 23-Sep-2010 11:12:40 with 51 obs

ascent sounding starting at 23-Sep-2010 11:12:40

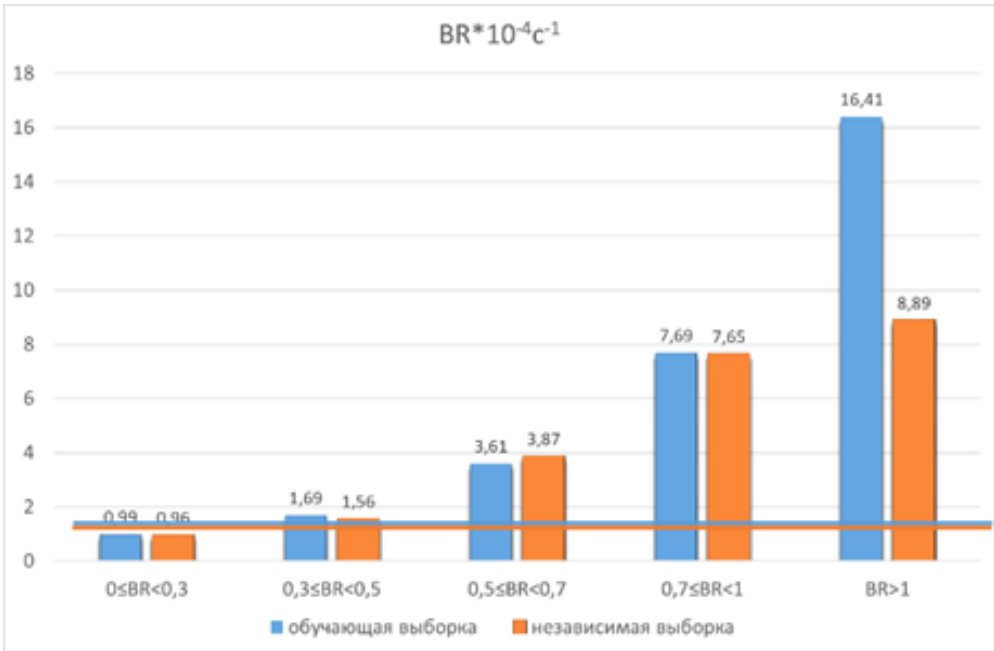
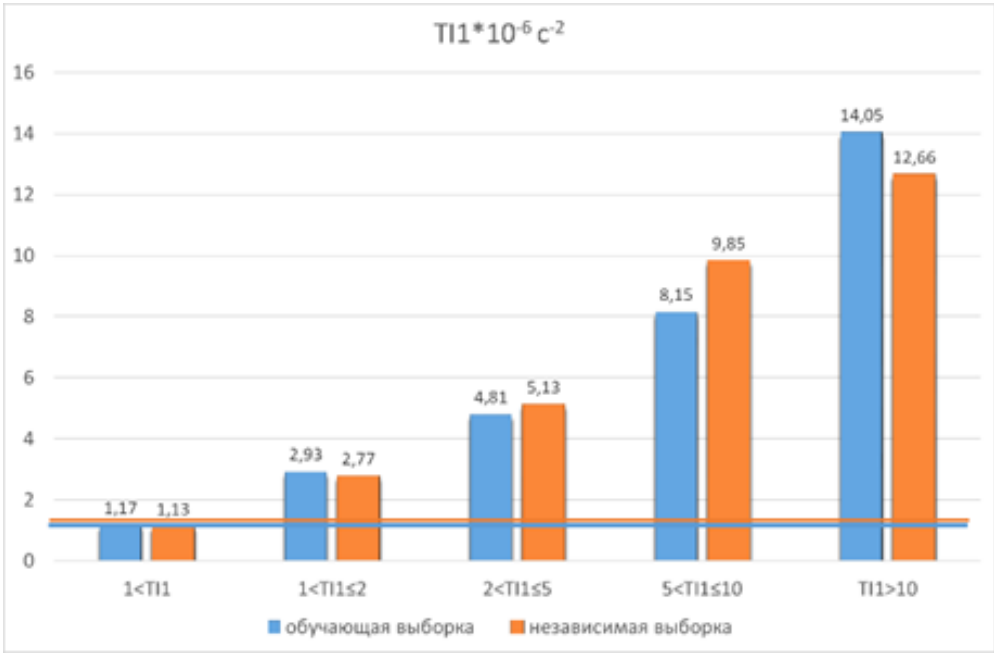
descent sounding ending at 23-Sep-2010 12:38:34

S F HHMM	lat/lon	Alt	wd/ws	t / td	edr	ice
4 2 1112	40.0000/-82.8960	590	---°/---	17.5/17.50±1.9	---/---	0
4 0 1113	39.9980/-82.8690	1250	224°/012	21.0/21.00±0.3	---/---	0
4 0 1113	39.9980/-82.8620	1540	231°/013	21.7/21.70±0.3	0.45/0.65	0
4 0 1113	39.9980/-82.8540	1800	228°/012	21.7/21.10±0.3	0.45/0.95	0
4 2 1113	39.9980/-82.8440	2070	---°/---	20.7/18.90±0.4	0.65/0.95	0
4 2 1113	39.9980/-82.8310	2330	---°/---	20.2/17.90±0.6	0.35/0.95	0
4 2 1113	39.9980/-82.8180	2590	---°/---	20.2/16.80±0.6	0.65/0.95	0
4 0 1114	39.9960/-82.8030	2850	257°/023	20.7/14.90±0.7	0.95/0.95	0
4 2 1114	39.9960/-82.7880	3120	---°/---	21.0/14.50±0.7	0.95/0.95	0
4 2 1114	39.9940/-82.7750	3280	---°/---	20.5/16.20±0.6	0.35/0.95	0
4 0 1114	39.9920/-82.7220	4330	271°/032	18.5/14.20±0.6	0.95/0.95	0

Количество собранных сводок EDR над регионом CMIT (март 2021-февраль 2024):

- **Всего** 519 767(100%)
- **Нулевая** 485 345 (93,4%)
- **Слабая** 29 729 (5,7%)
- **Умеренная** 4 681 (0.2%)
- **Сильная** 12 (0.002%)

Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва,
19-21 ноября 2024 г.



Анализ однопараметрических и двухпараметрических распределений для случаев умеренной турбулентности, подтвержденных значениями EDR

индекс Элрода + индекс Брауна $(Br = \sqrt{(0.3\zeta_a^2 + D_{sh}^2 + D_{st}^2)})$

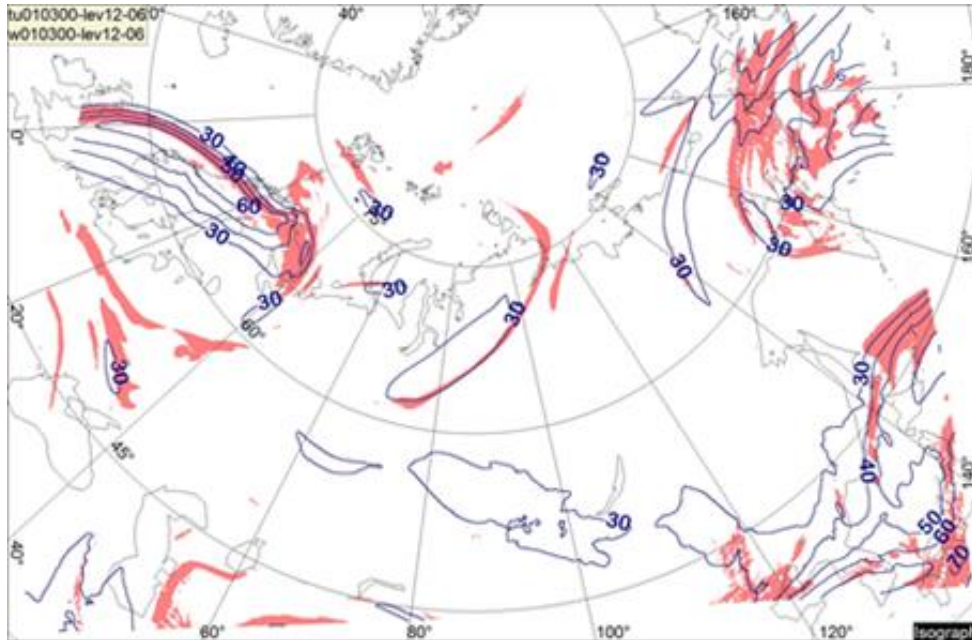
$TI1, 10^{-6} \text{ c}^{-2}$		$Br, 10^{-4} \text{ c}^{-1}$			Всего
		0...1	1...2	≥ 2	
0.0–1.0	Число узлов	6570220	4175116	382104	11127440
	Число сл. EDR	59455	53018	9514	121987
	Повт. сл. EDR, %	0.90	1.27	2.49	1.10
1.0–5.0	Число узлов	55790	740261	717134	1513185
	Число сл. EDR	2072	23195	28499	53766
	Повт. сл. EDR, %	3.71	3.13	3.97	3.55
≥ 5	Число узлов	0	1336	120074	121410
	Число сл. EDR	0	237	12409	12646
	Повт. сл. EDR, %	0.00	17.74	10.33	10.42
Всего	Число узлов	6626010	4916713	1219312	12762035
	Число сл. EDR	61527	76450	50422	188399
	Повт. сл. EDR, %	0.93	1.55	4.14	1.48

Индекс Элрода

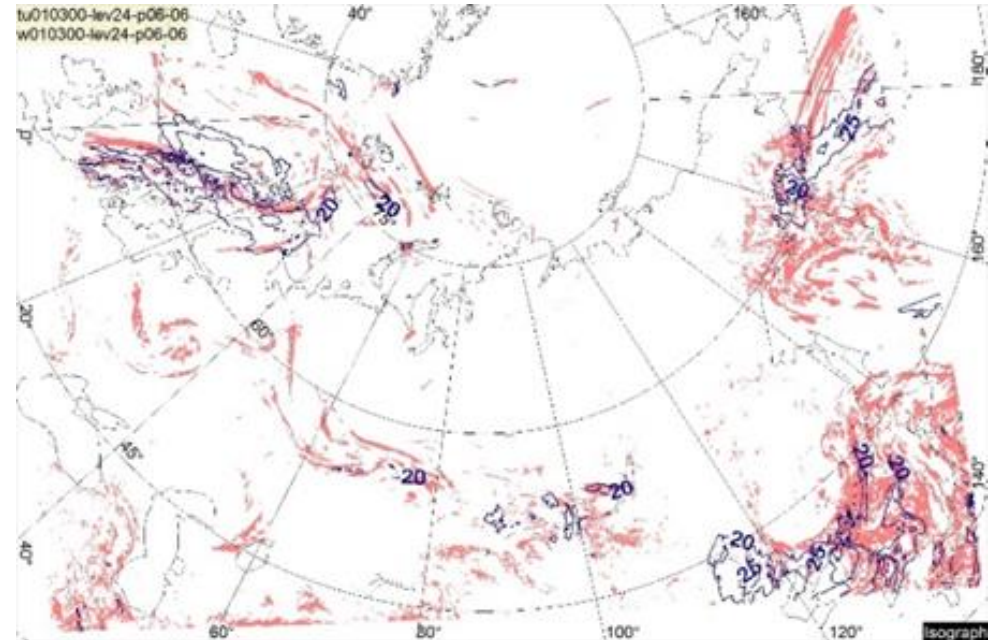
$$TI1 = D \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right]$$
$$D = \sqrt{D_{sh}^2 + D_{st}^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2}$$

Пример карт прогноза умеренной и сильной турбулентности ($EDR \geq 0,2 \text{ м}^{2/3} \cdot \text{с}^{-1}$) на эшелонах полета

FL290



FL100



Техническая комиссия ИКАО, А41-WP/235, июль 2022 г.

- Рекомендация по разработке прикладных стандартов в отношении турбулентности в полете.
- «...разработанная ИКАО система категорий турбулентности в полете не позволяет точно определить турбулентность для различных типов воздушных судов, что затрудняет принятие экипажем надлежащих мер реагирования»
- 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

Спасибо за внимание!

