

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА СТРУКТУРА ЗОН ТУРБУЛЕНТНОСТІ ЯСНОГО НЕБА ВИСОКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

Ключові слова: турбулентність ясного неба, зсуви вітру, струминна течія, вісь улоговини циклону

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. В авіації поняття «турбулентності ясного неба» (або Clear Air Turbulence) останнім часом набуває значного поширення у зв'язку з низкою льотних подій, зумовлених цим явищем. Експерти авіації описують турбулентність як випадковий, непередбачуваний рух, що відбувається між шарами повітря з різними швидкостями [11].

Турбулентність ясного неба постійно існує у всій товщі тропосфери і здебільшого не чинить помітного впливу на динаміку польоту літака. Проте в деяких випадках спостерігаються її досить значні (екстремальні) значення, які можуть впливати на літальні апарати будь-якого класу, що підтверджується статистикою льотних подій. Щороку у світовій цивільній авіації за різними підрахунками фіксується від 750 до 1500 випадків турбулентності ясного неба. Більшість їх не спричиняє ніякої шкоди пасажиром і екіпажу, проте затримки рейсів через турбулентність зумовлюють збитки авіакомпаній. Так, лише у США щорічні збитки становлять близько 500 млн. доларів на рік [9].

Різка зміна швидкості або напряму польоту літального апарату або одночасно його швидкості і напряму можлива як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Вплив турбулентності на політ літака є найбільш суттєвим на висотах близьких до його стелі, оскільки у даному випадку стійкість і керованість літака значно знижуються. Саме тому турбулентність ясного неба відноситься до категорії небезпечних зовнішніх впливів середовища.

На відміну від обмерзання і грози, які можуть бути виявлені візуально або за допомогою бортових технічних засобів, турбулентність ясного неба явище невидиме і часто раптове [5]. Отже, турбулентність ясного неба є однією з небезпечних пасток для пілотів повітряних суден, оскільки вони не можуть завчасно попередити пасажирів про загрозу.

Авіаційна спільнота, щоб забезпечити стандарт для звітності та опису турбу-

лентності, класифікувала турбулентність за інтенсивністю відповідно до її впливу на літаки наступним чином:

Light: переміщує вільні об'єкти, але не створює жодних труднощів для переміщення по кабіні.

Moderate: достатньо сильна, ускладнює переміщення по кабіні. Пасажири обов'язково повинні бути в ременях безпеки.

Severe: Пасажирів сильно штовхає, пересування по кабіні неможливе (Моррісон, 2001).

Extreme: літак сильно підкидує і його практично неможливо контролювати (AFN 1-203, 1997) [11].

У роботі саме ця класифікація і буде використовуватися для визначення найбільш інтенсивних зон турбулентності.

На сьогодні для прогнозу CAT розраховують індекси турбулентності ясного неба як в Україні так і за кордоном, зокрема у Великій Британії, США та Канаді.

Таким чином, *актуальність* дослідження зумовлюється впливом турбулентності ясного неба на режим, безпеку польоту літальних апаратів та рентабельність авіаційних рейсів.

Метою даної роботи є визначення просторово-часової структури зон інтенсивної турбулентності ясного неба.

Результати дослідження. Для діагнозу зон турбулентності ясного неба обиралися зони струминних течій, наявність яких визначалася за даними карт максимального вітру за загальноприйнятою методикою. У якості зон з потенційно можливою наявністю CAT розглядалися області, де спостерігалася швидкість вітру понад 100 м/с, а вісь струминної течії мала суттєву деформацію.

Для виявлення зон з максимальними значеннями CAT відносно вісі улоговини та струминної течії, робилися просторові розрізи за схемою, наведеною на рис.1: перший перпендикулярно вісі улоговини, наступний – уздовж вісі струминної течії на різних відстанях від неї. За базовий розріз брався той, де інтенсивність CAT була найбільшою. Наступні вертикальні розрізи атмосфери

будувалися за принципом відстеження у часі траєкторії переміщення зони з максимальними значеннями САТ поблизу струминної течії. Для тих пунктів радіозондування, де так атмосфери зони спостерігалися, будувалися вертикальні профілі зсуву, напрямку та швидкості вітру [7].

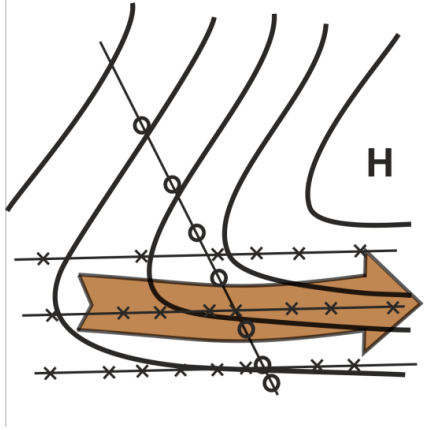


Рис. 1 – Схема побудови просторових розрізів струминної течії: пряма з кружечками – розріз перпендикулярний вісі улоговини; пряма з хрестиками – розрізи паралельні вісі струминної течії. Затушована стрілка – струминна течія

Для аналізу обрана синоптична ситуація з 27.04.2017 р. по 30.04.2017 р., коли над Європою спостерігалася арктична струминна течія з максимальними швидкостями вітру на осі від 40 до 43 м/с, яка огинала глибoku висотну улоговину з віссю, орієнтованою уздовж північного узбережжя Європи.

Як було зазначено вище, лінія першого вертикального розрізу атмосфери перетинає вісь висотної улоговини (рис. 2), яка супроводжується струминною течією, і дозволяє ідентифікувати зону з екстремально високи-

ми значеннями (XTR) інтенсивності САТ біля вісі струминної течії між ізобаричними поверхнями 250 та 200 гПа (рис.2а). Зазначена зона розташована між станціями радіозондування з індексами 11747 (220 гПа) та 11520 (240 гПа) і локалізована у передній частині улоговини.

Крім того, на станції 11520, у нижній частині тропосфери виділяється зона з високими (S-X) значеннями САТ. Характерно, що обидві ці зони знаходяться поблизу шарів з яскраво вираженим вертикальним зсувом вітру, який у першому випадку утворюється за рахунок змін швидкості вітру, а у другому – за рахунок різких змін його напрямку з висотою (рис. 3).

Побуваний розріз уздовж вісі СТ показав максимальні значення САТ на тій же станції (не наводиться).

Графік зміни швидкості вітру з висотою (рис. 3) на вищезазначеній станції показали, що зона екстремальних значень САТ (вище 10 км) має струминноподібний профіль, який зумовлює зсув вітру, який видно на рис. 3 в.

Через 12 годин (рис. 4) на станції 11520 відзначається послаблення інтенсивності САТ до значень SVR. У той же час екстремальні значення САТ (XTR) зберігаються східніше – на станції 11747, тобто зона турбулентності зменшила свої горизонтальні розміри і розташовується дещо вище (поблизу рівня 180 гПа). Очевидно, це пояснюється зниженням інтенсивності самої струминної течії (з 62 до 43 м/с), зменшенням інтенсивності вертикальних зсувів вітру та вертикальними коливаннями самої струминної течії.

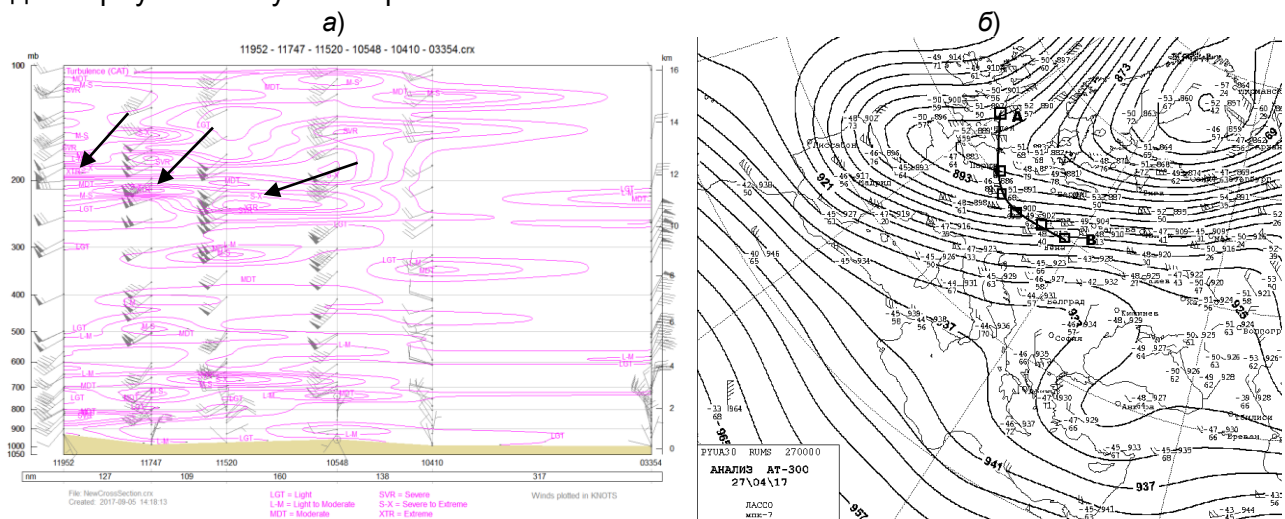


Рис. 2 – Вертикальний розріз атмосфери за 00 СГЧ 27.04.17 а) через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-11520-10548-10410-03354 та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками на рис.а) позначені області з критичними значеннями САТ (XTR)

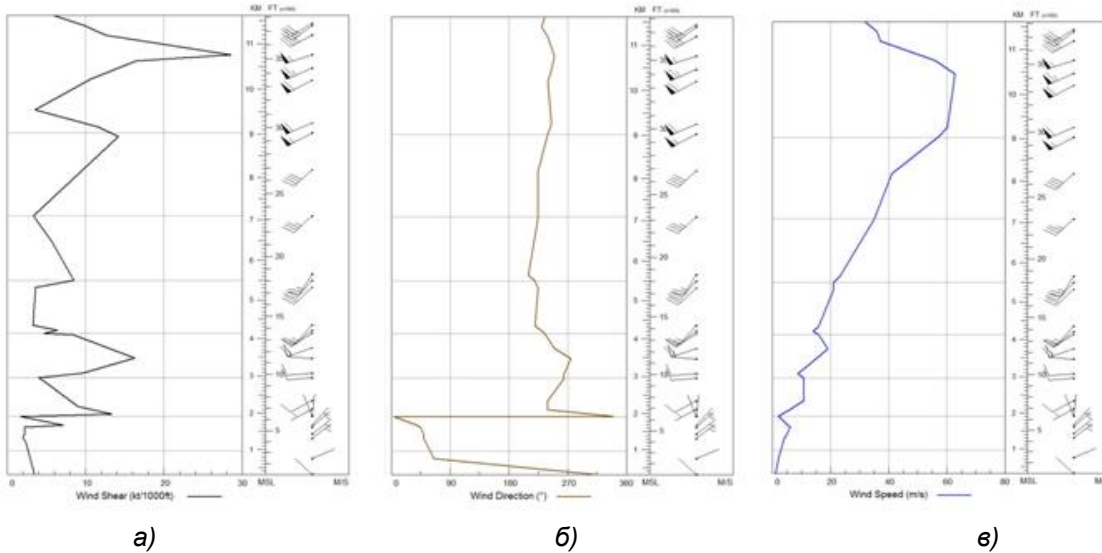


Рис. 3 – Вертикальні профілі зсуву вітру (а), напрямку (б) та швидкості вітру (в) на ст. 11520 за 00 СГЧ 27.04.2017 р.

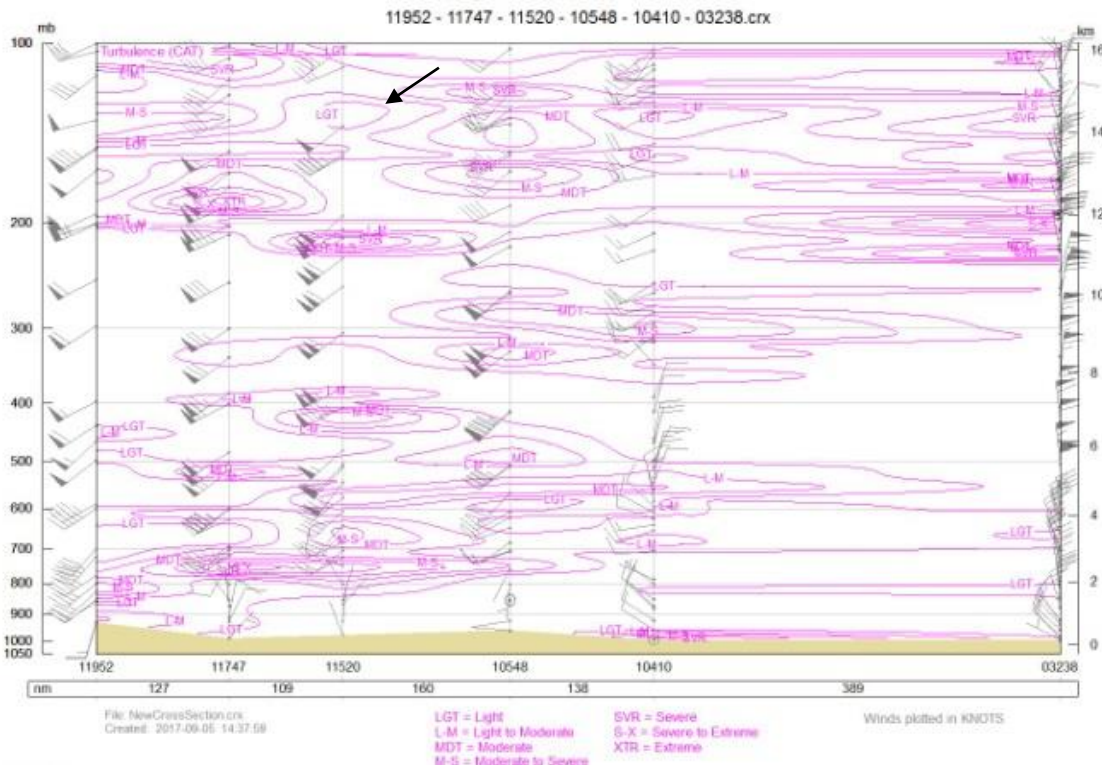


Рис. 4 – Вертикальний розріз атмосфери за 12 СГЧ 27.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-10548-10410-03238. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

Максимум зони турбулентності (S-X), що спостерігався у нижній частині тропосфери, перемістився на ст. 11747. При цьому, яскраво виражений максимум у вертикальному профілі зсуву вітру, який утворився за рахунок змін його швидкості, зберігається (рис. 5).

28.04.2017 р. за 00 СГЧ зона з високими значеннями САТ зміщується на схід до станцій 11520 та 10548 (рис.6а) разом з обертальним рухом вісі висотної улоговини (рис. 6б), розташовуючись у шарі між ізобарними поверхнями 300 та 200 гПа та зберіга-

ючи свою інтенсивність (XTR). Таке розташування зони турбулентності приводить нас до дещо несподіваного висновку – інтенсивність САТ не залежить від кількісних показників вертикального профілю вітру (збереження інтенсивності супроводжується зменшенням значень швидкості вітру і її вертикального градієнту (рис. 7 а, в). Іншими словами, зона найбільш інтенсивної турбулентності зміщується ближче до вісі улоговини, не втрачаючи при цьому своєї інтенсивності.

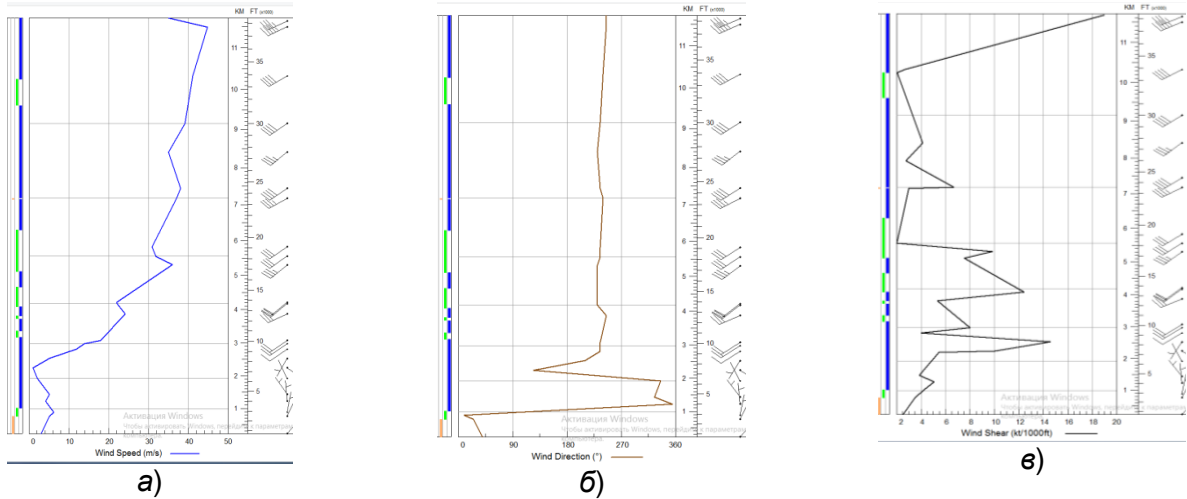


Рис. 5 – Вертикальні профілі зсуву вітру (а), напрямку (б) та швидкості вітру (в) на ст. 11747 за 12 СГЧ 27.04.2017 р.

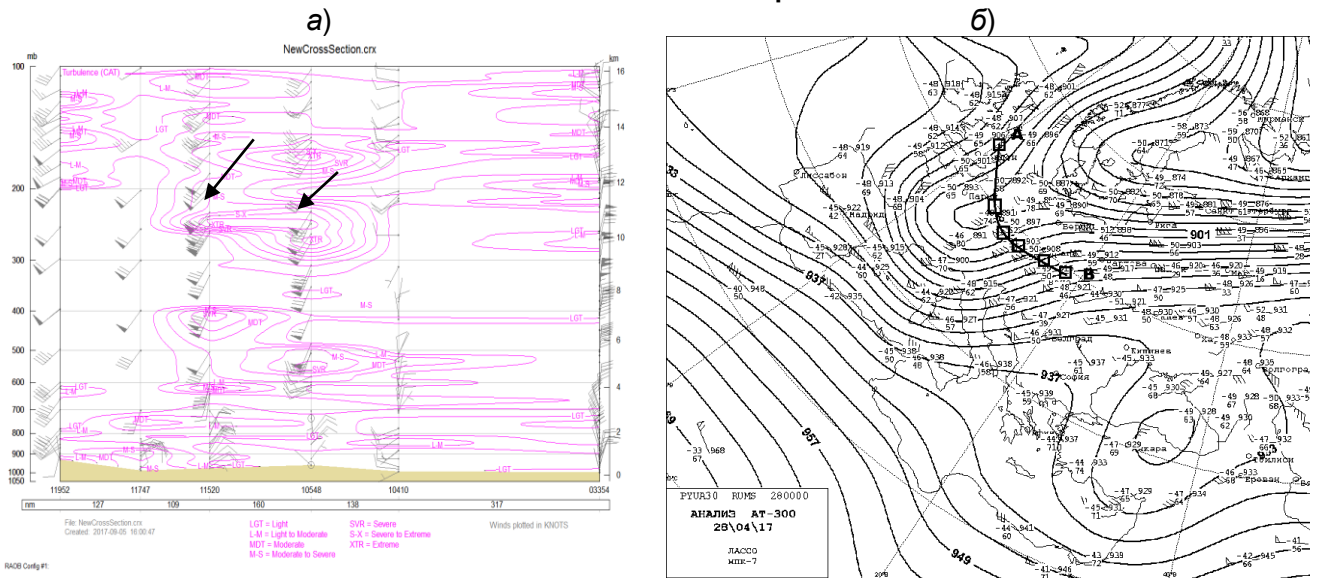


Рис. 6 – Вертикальний розріз атмосфери за 00 СГЧ 28.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-11520-10548-10410-03354. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

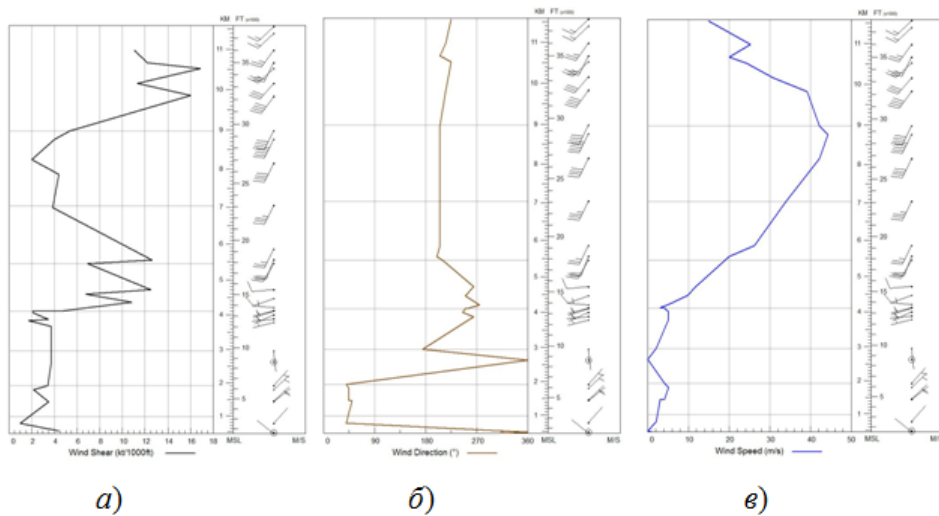


Рис. 7 – Вертикальні профілі зсуву вітру (а), напрямку (б) та швидкості вітру (в) на ст. 10548 за 00 СГЧ 28.04.2017 р.

Проте через 12 годин (12 СГЧ 28.04.2017) спостерігається повернення розташування зони турбулентності відносно вісі улоговини, а саме: область зі значеннями *XTR* спостерігається на станціях 11952, 11747 та 11520 (рис. 8) з наявністю зсуву вітру на тих самих рівнях (рис. 9).

При цьому паралельно зі збільшенням швидкості вітру на вісі СТ з 43 до 50 м/с зона інтенсивної САТ займає своє «початкове» розташування у шарі 250-200 гПа зі збереженням інтенсивності. Вочевидь, такий процес зумовлюється адаптацією поля вітру до поля геопотенціалу – при перебудові

останнього, максимуми СТ зменшують свою висоту та інтенсивність, а потім з часовим лагом близько 12 годин відновлюються. Аналогічна трансформація характерна і для зон турбулентності, які, як зазначалося, є похідними від параметрів вітру.

Протягом 29.04.17 вісь улоговини продовжує свій обертально-поступальний рух на схід (рис.10 б), а зона зі значеннями турбулентності суттєво зменшує свої горизонтальні розміри, осередок *XTR* опускається до рівня 300 гПа (рис. 10 а), тобто знову відбувається процес перебудови.

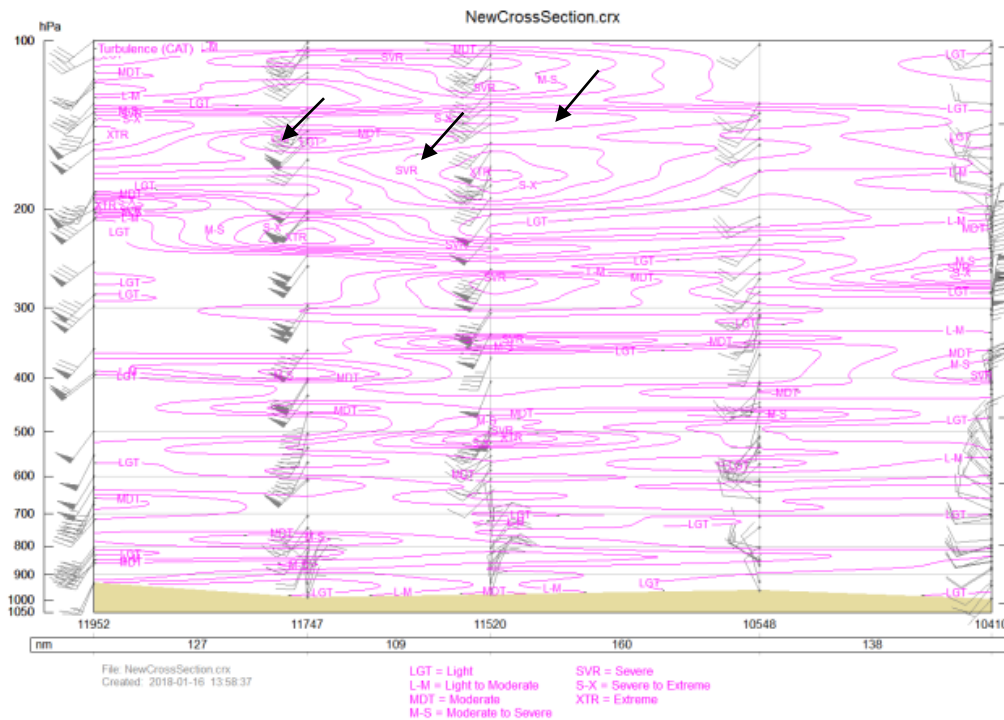


Рис. 8 – Вертикальний розріз атмосфери за 12 СГЧ 28.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-11520-10548-10410-03354. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

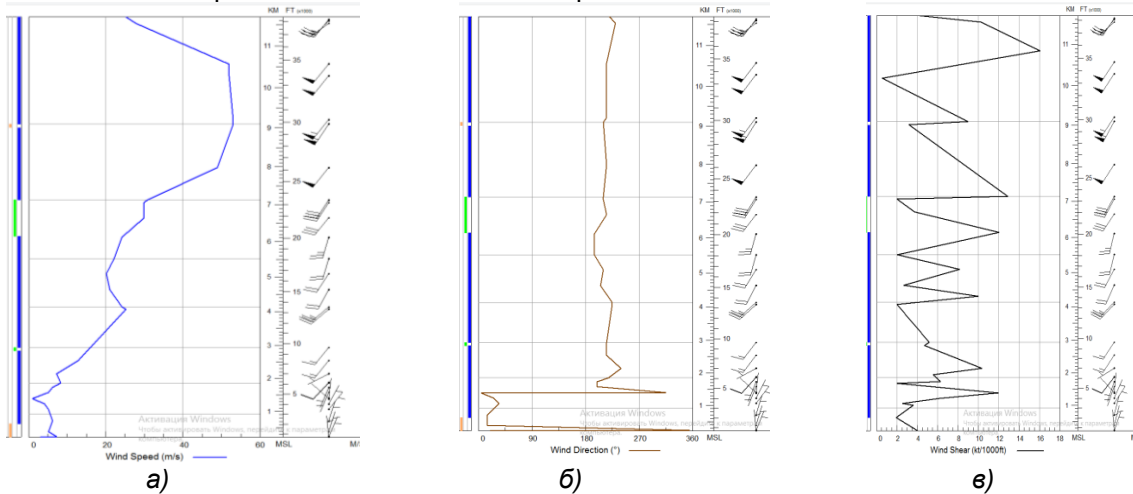


Рис. 9 – Вертикальні профілі зсуву вітру (а), напрямку (б) та швидкості вітру (в) на ст. 11747 за 12 СГЧ 28.04.2017 р.

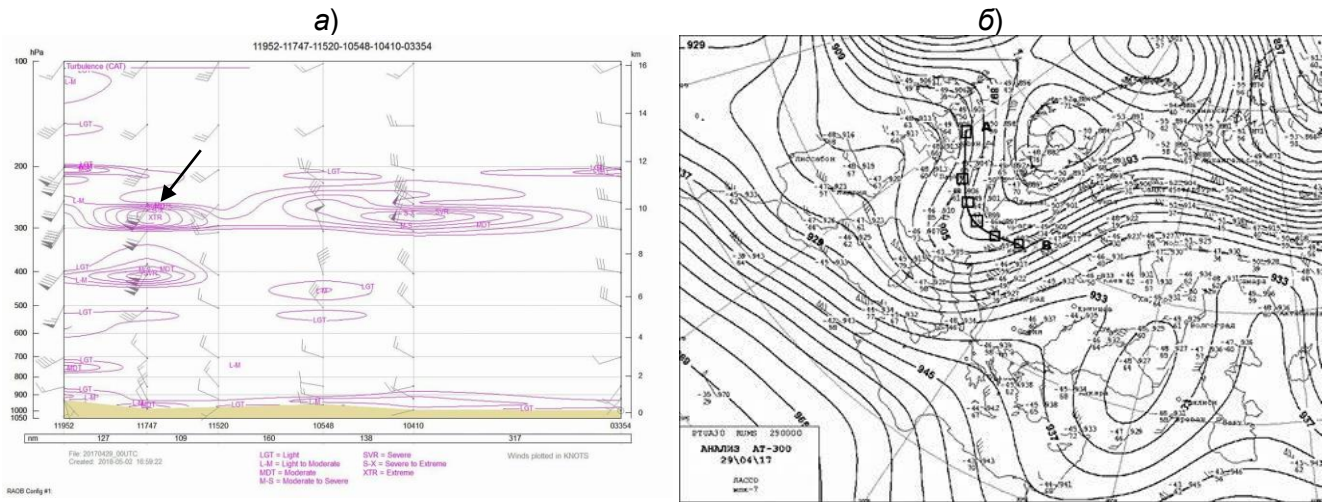


Рис. 10 – Вертикальний розріз атмосфери за 00 СГЧ 29.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-11520-10548-10410-03354. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

Через 12 годин 29.04.17 на вертикальному розрізі по зазначеним станціям зони з екстремальними значеннями турбулентності не спостерігаються (рис.11). У 00 СГЧ 30.04.17 вісь висотної улоговини суттєво змістилася у східному напрямку (рис. 12 б) і вже проходила за лінією Варшава – Белград, а у її передній частині спостерігалася струминна течія з швидкостями вітру близько 40 м/с.

У результаті побудови розрізу вздовж вісі СТ (перпендикулярні розрізи не показали

наявність максимумів САТ) вдалося виявити дві станції (рис.12 а) з екстремальними значеннями САТ (XTR). Обидві станції, як і в попередніх випадках, відмічаються в передній частині улоговини.

Таким чином, підтверджується попередній висновок, що в результаті перебудови поля геопотенціалу (з 29.04.17) відбувається поступова адаптація поля вітру до нього, що і зумовило 30.04.17 р. появі осередків екстремальних значень САТ.

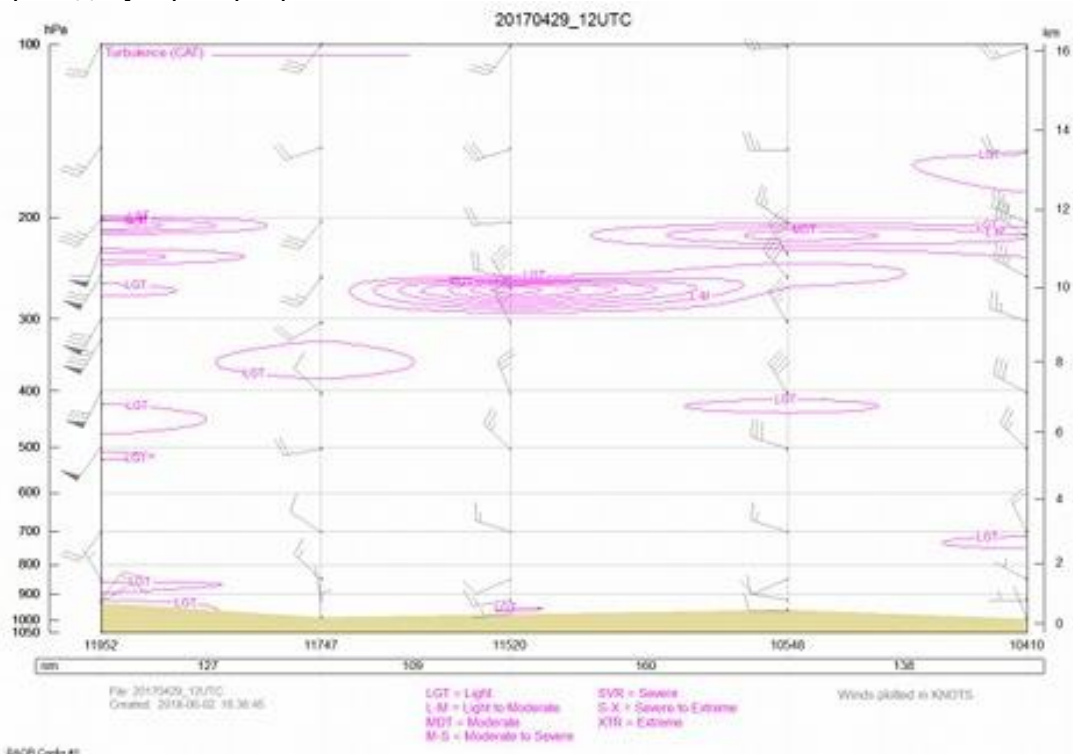


Рис. 11 – Вертикальний розріз атмосфери за 12 СГЧ 29.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 11952-11747-11520-10548-10410-03354. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

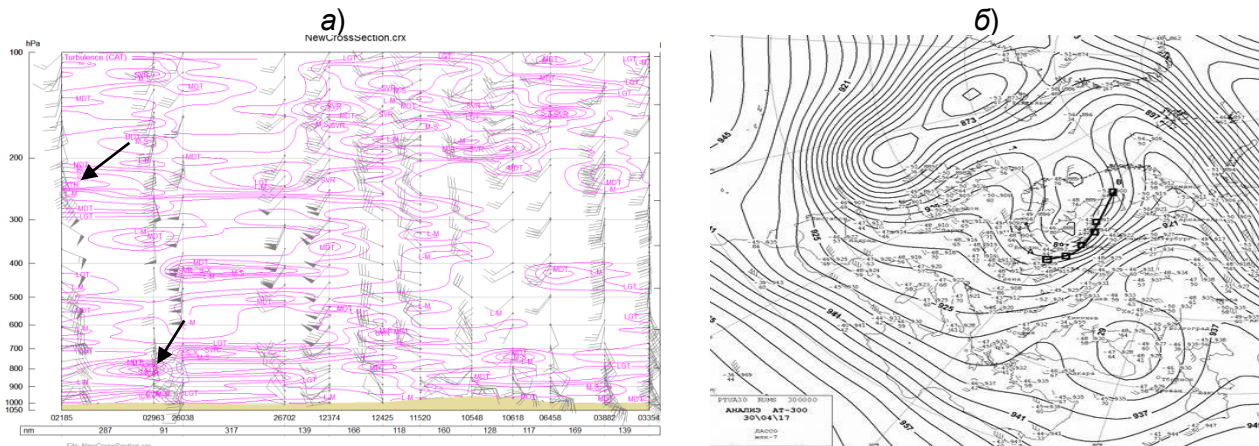


Рис. 12 – Вертикальні розрізи атмосфери за 00 СГЧ 30.04.17 через пункти радіозондування атмосфери 02185-02963-26038-26702-12374-12425. та його розташування на карті АТ-300 б). Стрілками позначені області з критичними значеннями САТ

Висновки

1. Зони екстремальних значень САТ можуть утворюватися в умовах зсуву вітру як у нижній половині тропосфери, так і у верхній. У першому випадку зсув вітру характеризується посиленням швидкості вітру з висотою, у другому – послабленням.
2. Інтенсивність зони САТ залежить від інтенсивності струминної течії та величини вертикального зсуву вітру, який вона зумовлює. Зменшення інтенсивності струминної течії зумовлює зменшення інтенсивності турбулентності ясного неба у місцях її існування при збереженні конфігурації баричного рельєфу.
3. Зона найбільш інтенсивних значень САТ розташовується у передній частині

улоговини з циклонічної сторони струминної течії біля її вісі.

4. Зміна положення вісі улоговини не зумовлює одночасну зміну розташування зони САТ відносно неї. Трансформація просторової структури зони інтенсивної турбулентності відбувається протягом 12 годин після перебудови поля геопотенціалу.

5. На початку перебудови поля геопотенціалу, зони турбулентності зменшують свою інтенсивність та опускаються до рівня вісі СТ (300 гПа). При збереженні конфігурації поля геопотенціалу, з'являються екстремальні значення ХТР (САТ), які розташовуються вище вісі СТ.

Список літератури

1. Advisory Circular Clear Air Turbulence Avoidance // U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration - Date: 3/22/16 AC No: 00-30C – [Режим доступу] – https://www.faa.gov/documentLibrary/media/AdvisoryCircular/AC_00-30C.pdf.
2. Ellrod G. P. Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence Trend Term / Gary P. Ellrod, John A. Knox // AMS Journal Online. – 2010. – [Режим доступу] – <http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2009WAF2222290.1>.
3. Lee D. R. Clear air turbulence forecasting techniques / Lee D. R., Stull R. S., Irvine W. S. // Air Weather Service Tech. Note AFGWC/TN-79/001 (REV) ; Air Force Global Weather Central, Offutt AFB, NE, 1984: – 16 p.
4. Sinclair P. C. Infrared Detection of High Altitude Clear Air Turbulence / P. C. Sinclair, P. M. Kuhn // USA, Tech Note 205, Dec 91.
5. Астапенко П. Д. Погода и полеты самолетов и вертолетов / Астапенко П. Д., Баранов А. М., Шварев И. М. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 276 с.
6. Богаткин О. Г. Практикум по авиационной метеорологии / Богаткин О. Г., Говердовский В. Ф., Еникеева В. Д. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 184 с.
7. Борисов А. П. Опасные для авиации явления погоды: уч. пособие / А. П. Борисов, А. И. Штыфура. – Ворошиловград, 1983. – 112 с.
8. Воробьев В. И. Струйные течения в высоких и умеренных широтах / В. И. Воробьев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – 233 с.
9. Катастрофа среди ясного неба: насколько опасна турбулентность – [Режим доступу] – <https://indicator.ru/article/2017/05/03/opasna-li-turbulentnost>.
10. Солонин С. В. Аэроисноптические условия и прогноз болтанки самолетов в стратосфере / С. В. Солонин, О. Г. Богаткин // Материалы научно-исследовательских работ по авиационной метеорологии. 1966.– Вып. 9. – С. 51-71.
11. Golding W. L. Turbulence and Its Impact on Commercial Aviation / Wayne L. Golding // Journal of Aviation/Aerospace Education & Research, Volume 11 Number 2 JAAER Winter 2002 P.13.

Мищенко Н. М., Романенко С. Е., Шанюк О. В. Просторово-часова структура зон турбулентності ясного неба високої інтенсивності. В представленій роботі проведений просторово-часовий аналіз найінтенсивніших зон турбулентності ясного неба (CAT), які чинять безпосередній вплив на режим польоту майже усіх типів повітряних суден та позначається на рентабельності авіаперевезень. Дослідження проводилося шляхом побудови вертикальних розрізів атмосфери перпендикулярно та паралельно вісі улоговини, з якою пов'язана струминна течія. Це дало змогу дослідити просторово-часову трансформацію зон з екстремально високими значеннями турбулентності. Зокрема, встановлені висоти їх розташування, положення відносно вісі улоговини, просторові розміри та закономірності змін цих характеристик при перебудові поля геопотенціалу. Зміна положення вісі улоговини не зумовлює одночасну зміну розташування зони CAT відносно неї. Трансформація просторової структури зони інтенсивної турбулентності відбувається протягом 12 годин після перебудови поля геопотенціалу.

Побудова вертикальних профілів напрямку і швидкості вітру та його зсуву дала змогу визначити метеорологічні умови, за яких відбувається формування зон екстремально високої турбулентності. Так, зони турбулентності, які розташовуються у верхній тропосфері, формуються в умовах струминноподібного профілю вітру і не змінюють його напрямку. Нижньотропосферні зони турбулентності, натомість, формуються в умовах різких змін як напрямку, так і швидкості вітру.

Ключові слова: турбулентність ясного неба, зсуви вітру, струминна течія, вісь улоговини циклону.

Mishchenko N. M., Romanenko S. E., Shanyuk O. V. Spatial-temporal structure of zones of turbulence of a clear sky of high intensity. In the presented work, a spatial-temporal analysis of the most intense clear sky turbulence zones (CAT) has been conducted, which have a direct impact on the flight mode of almost all types of aircraft and affects the profitability of air transportation.

The study was carried out by constructing vertical sections of the atmosphere perpendicular to and parallel to the axis of the basin, which is associated with the current flow. This made it possible to investigate the spatial-temporal transformation of zones with extremely high values of turbulence. In particular, the height of their location, the position relative to the axis of the basin, the spatial dimensions and patterns of changes in these characteristics are established at the redevelopment of the field of geopotential. Changing the position of the axillary basin does not result in a simultaneous change in the location of the CAT zone relative to it. The transformation of the spatial structure of the zone of intense turbulence occurs within 12 hours after the reconstruction of the field of geopotential. Construction of vertical profiles of the direction and wind speed and its displacement allowed to determine the meteorological conditions under which the formation of zones of extreme high turbulence occurs. Thus, the turbulence zones, which are located in the upper troposphere, are formed under conditions of a jet-like wind profile and do not change its direction. Nizhnyotropospheric zones of turbulence, instead, are formed in conditions of sharp changes in both direction and wind speed.

The result also found that the zones of extreme values of SATs can be formed under conditions of wind displacement in the lower half of the troposphere, and in the upper. In the first case, the windshift is characterized by an increase in the speed of the wind with a height, in the second - a weakening. The intensity of the SAT zone depends on the intensity of the jet stream and the magnitude of the vertical wind shear that it causes. Reducing the intensity of the jet stream leads to a decrease in the intensity of the turbulence of the clear sky in its places of existence while preserving the configuration of the baroque relief. The zone of the most intense values of SAT is located in the anterior part of the basin with cyclonic side of the jet stream near its axis.

Keywords: clear sky turbulence, wind shear, jet flow, axis of the basin of the cyclone.

Мищенко Н. М., Романенко С. Е., Шанюк А. В. Пространственно-временная структура зон турбулентности ясного неба высокой интенсивности. В представленной работе проведен пространственно-временной анализ интенсивных зон турбулентности ясного неба (CAT), которые оказывают непосредственное влияние на режим полета почти всех типов воздушных судов и сказывается на рентабельности авиаперевозок.

Исследование проводилось путем построения вертикальных разрезов атмосферы перпендикулярно и параллельно оси ложбины, с которой связано струйное течение. Это позволило исследовать пространственно-временную трансформацию зон с экстремально высокими значениями турбулентности. В частности, установлены высоты их расположения, положение относительно оси ложбины, пространственные размеры и закономерности изменений этих характеристик при перестройке поля геопотенциала. Изменение положения оси ложбины не вызывает одновременное изменение положения зоны CAT в отношении нее. Трансформация пространственной структуры зоны интенсивной турбулентности происходит в течение 12 часов после перестройки поля геопотенциала.

Построение вертикальных профилей направления и скорости ветра и его смещения позволила определить метеорологические условия, при которых происходит формирование зон экстремально высокой турбулентности. Так, зоны турбулентности, которые располагаются в верхней тропосфере, формируются в условиях струеподобного профиля ветра и не меняют его направления. Низкотропосферные зоны турбулентности, при этом, формируются в условиях резких изменений как направления, так и скорости ветра.

Ключевые слова: турбулентность ясного неба, оползни ветра, струйная течение, ось ложбины циклона.

Надійшла до редколегії 03.04.2018