

# Режимні характеристики туманів і суцільної низької хмарності в аеропорту «Львів» за даними наземних спостережень

Олексій С. Густенко , Інна А. Хоменко 

Одеський державний екологічний університет, вулиця Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

## Реферат

Тумани та низька суцільна хмарність є небезпечними погодними явищами, які дуже часто призводять до втрати часу, грошей і навіть людських життів під час авіаційних перевезень. Вони становлять значну небезпеку для авіації, особливо під час зльоту та посадки літаків, а також при польоті повітряних суден на низьких висотах через суттєве обмеження видимості. Прогноз низької суцільної хмарності і туманів є одним із найскладніших питань авіаційної метеорології через схожість механізмів утворення цих явищ, складність і недетермінованість процесів в межовому шарі атмосфери, а також сильну залежність появи туманів і низької хмарності від місцевих умов. Через наведені обставини дані аеродромних спостережень, які саме і є одним з основних джерел інформації щодо локальних метеорологічних умов, є необхідною основою для встановлення локальних статистичних залежностей, які дозволять розмежувати обидва явища і прогнозувати їхні характеристики. Для отримання режимних характеристик низької суцільної хмарності і туманів та встановлення локальних залежностей, які дозволили б удосконалити методи прогнозу туманів і низької суцільної хмарності в аеропорту «Львів», використано дані тригодинних наземних метеорологічних спостережень в коді METAR за період 2010–2020 рр. На основі створеної бази даних METAR отримано річний, сезонний і добовий розподіл туманів і низької суцільної хмарності, а також розподіл повторюваностей різних метеорологічних величин при туманах і суцільній низькій хмарності. Застосовуючи статистичний підхід, виявлено емпіричні залежності наявності туману/суцільної низької хмарності від комплексу потенціальних локальних предикторів – відносної вологості і температури повітря на рівні двох метрів. Отримані результати можуть бути використані для забезпечення моделей прогнозу погоди архівними даними та удосконалення статистичних прогнозів туманів і суцільної низької хмарності.

## Ключові слова

Суцільна низька хмарність, туман, дані наземних спостережень, METAR, Львів

Надійшла до редакції: 29 грудня 2023 / Прийнята: 14 березня 2024 / Опублікована онлайн: 20 березня 2024

## Fog and overcast low-level stratiform cloud characteristics at the airport of Lviv from surface observations

Oleksii S. Hustenko, Inna A. Khomenko

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., Odessa, 65016, Ukraine

## Abstract

Fog and low-level stratiform clouds have been identified as hazardous weather phenomena, resulting in various losses, including time, money, and, most importantly, human lives in aviation transportation. Fog and low-level stratus pose substantial risks to aviation, especially during takeoff, landing, and low-level flying, due to conditions of reduced visibility. Forecasting low-level stratiform clouds and fog is a challenging aspect of aviation meteorology due to the similarity in the mechanisms of their formation, complex and non-deterministic processes in the atmospheric boundary layer, and their high dependence on local conditions. Given these challenges, weather observations, a primary source of information on local meteorological conditions, can be utilized to establish statistical dependencies of fog/low-level stratus characteristics, enabling the differentiation of both phenomena and the improvement of their forecast accuracy. To find the characteristics of fog and low-level stratiform clouds and identify local dependencies for enhancing the forecast of these phenomena at Lviv Airport, Ukraine, three-hourly METARs information from the airport's Meteorological Station for the period 2010–2020 were analyzed. Employing a statistical approach, the annual, seasonal, and diurnal distribution of fog and low-level stratiform clouds, along with their frequency distribution associated with various meteorological parameters, were determined. Applying a statistical approach, the empirical relationship between the occurrence of fog/overcast low-level stratus and a set of potential local predictors, namely 2 m air temperature and relative humidity, was identified. The results obtained can be instrumental in providing historical data to weather forecast models and improving the accuracy of forecasts for fogs and low-level stratus.

## Keywords

Overcast low-level stratiform clouds, fog, surface observational weather data, METAR, Lviv

Received: 29 December 2023 / Accepted: 14 March 2024 / Published online: 20 March 2024

## 1. Вступ

Низька хмарність і туман, які обмежують дальність видимості, є основними факторами, які ускладнюють зліт і приземлення повітряних суден та їх польоти на малих висотах. Саме поєднання мінімальних значень

дальності видимості і верхньої межі хмарності визначають можливість безпечного приземлення або зльоту літака, або мінімум погоди (Наказ Державної авіаційної служби України від 05 вересня 2017 р.). Оскільки точний і своєчасний прогноз низької хмарності та туманів практично повністю визначає

безпеку польотів, безперервність і вчасність авіаційних перевезень, а також відсутність фінансових втрат, то розуміння фізичних механізмів і комплексного характеру цих явищ, а також вдосконалення існуючих та пошук нових методів їх прогнозу, є однією з основних завдань авіаційної метеорології (Gultere, 2019; Michaelides, 2008).

Завдання прогнозування висоти нижньої межі хмарності (ВНМХ) і туману є надзвичайно складним з декількох причин. Хоча сучасні моделі з високим розділенням в низці випадків передобчислюють кількість хмарності і наявність туману, але дуже часто якість прогнозу цих параметрів є незадовільною (Gultere 2019). Окрім того, параметри туманів і низької хмарності, зокрема ВНМХ, надзвичайно мінливі як в просторі, так і в часі, і сильно залежать від місцевих умов (Gultere 2007; Pauli 2020; Stolaki 2009). Тому дуже часто до прогнозу низької хмарності та туману застосовується комбінований фізико-статистичний прогноз (Gultere 2019), при якому на основі вихідних даних моделі за допомогою вбудованих в модель схем постпроцесінгу надається прогноз параметрів туману та низької хмарності (Herzogh 2015). Застосування такого підходу веде до необхідності встановлення локальних зв'язків між вихідними даними чисельних моделей і характеристиками низької хмарності.

В силу зазначених обставин, дані аеродромних спостережень є необхідною основою для встановлення локальних залежностей, які дозволять розмежувати обидва явища і прогнозувати їхні характеристики.

## 2. Матеріали і методи

Для метеорологічного забезпечення авіації значущою для польотів вважається хмарність з нижньою межею до 1500 м або купчасті, купчасто-дощові чи потужні купчасті хмари на будь-якій висоті. Оскільки фізичні механізми формування конвективноподібної і шарувато-подібної хмарності кардинально відрізняються, то розглядати їх має сенс окремо. Водночас туман можна розглядати як хмарну систему, яка належить до загального класу низьких шарувато-подібних хмар (Cotton 1989). З огляду на це в даній роботі в якості об'єкту дослідження було обрано тумани і суцільну низьку неконвективну хмарність з нижньою межею не вище 1500 м, для вивчення режиму яких в міжнародному аеропорту «Львів» ім. Данила Галицького було залучено дані стандартних метеорологічних спостережень біля поверхні землі в коді METAR за період 2010–2020 рр. (Архів метеорологічних даних спостережень в коді METAR).

Хоча при утворенні туманів і суцільної низької неконвективної хмарності провідну роль відіграють мікрофізичні процеси, проте реалізація того чи іншого механізму утворення явища залежить від властивостей повітряних мас, перш за все від вертикального розподілу температури і характеристик вологості.

Таким чином, магістральним напрямом прогнозування наявності явища – туману чи низької суцільної хмарності – є прогнозування полів метеорологічних величин за допомогою чисельних моделей, а потім, за допомогою вбудованих в модель схем постпроцесінгу, реалізація того або іншого алгоритму визначення характеристик туману або суцільної низької хмарності (Andersen, 2020).

Отже, для отримання нових методів прогнозу туманів і суцільної низької хмарності, а також для уточнення методів, що вже використовуються на практиці, необхідно продовжувати дослідження у напрямку встановлення діапазонів для мінливості різних метеорологічних параметрів, що визначають властивості повітряних мас, за різних фізико-географічних умов.

## 3. Результати

### 3.1. Особливості річного і добового ходу туманів і суцільної низької хмарності.

За весь розглядуваний період було зареєстровано усього 5109 випадки суцільної низької хмарності та 741 випадків туманів в аеропорті «Львів». Випадок визначався як метеорологічний строк, в якій спостерігалось явище (суцільна низька хмарність або туман).

В періоді 2010–2020 рр. суцільна хмарність з нижньою межею не вище 1500 м реєструється найчастіше взимку – 44,14 % загальної кількості випадків, а найрідше влітку, коли її повторюваність становить лише 8,30 %. Високу появу низької суцільної хмарності взимку можна пояснити активізацією циклонічної активності взимку, а також значною повторюваністю умов, які сприяють виникненню підінверсійної хмарності (шаруваті і шарувато-купчасті хмари).

Низька суцільна хмарність найчастіше спостерігається взимку з максимумом повторюваності між 3-ю і 6-ю годиною ранку (6,0 %) та мінімумом о 12 год. (4,9 %) (рис. 1).

Восени найбільша повторюваність суцільної хмарності припадає на передранкові і ранкові години і коливається в межах від 4,3 % (06 год.) до 4,0 % (03 і 09 год.), а найменші ймовірності появи низької хмарності реєструються від 15 год. (2,8 %) до 18 год. (3,0 %). Восени суцільна хмарність може спостерігатись дещо рідше, ніж взимку, оскільки в цю пору року більш послаблена циклонічна діяльність.

Навесні повторюваність суцільної хмарності менша, ніж восени, і має мінімум о 18 годині (1,7 %), а максимум з повторюваністю припадає на ранкові години з 6 год. по 9 год. (2,8 %).

Влітку низька суцільна хмарність реєструється найрідше: її повторюваність коливається в межах від 0,3 % о 21 год. до 1,9 % о 6 год.

Повторюваність туманів, на відміну від низької суцільної хмарності, найчастіше має місце в осінній сезон року – 39,81 % від загальної кількості випадків (рис. 2), а мінімум також реєструється влітку –

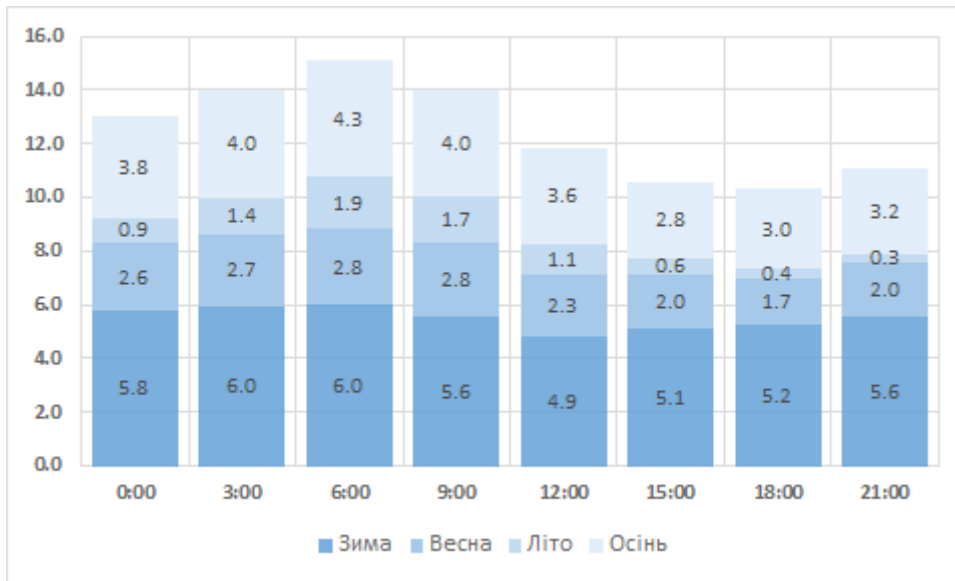


Рис. 1. Добовий хід повторюваності суцільної низької хмарності за даними стандартних метеорологічних спостережень в різні сезони року.  
 Fig. 1. Occurrence of low-level stratus as dependent on the hour of the day in the seasons of the year.

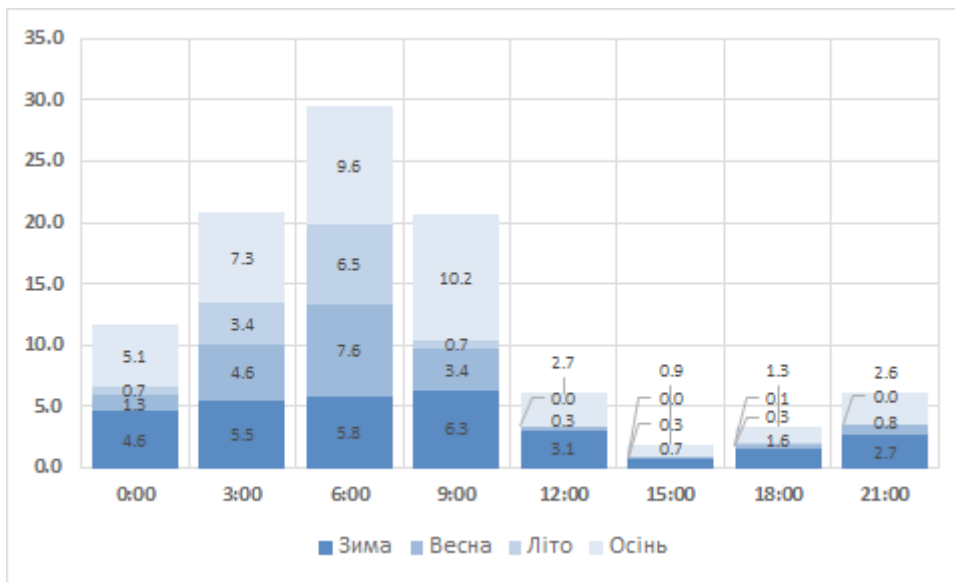


Рис. 2. Добовий хід повторюваності туманів за даними стандартних метеорологічних спостережень в різні сезони року.  
 Fig. 2. Occurrence of fog as dependent on the hour of the day in the seasons of the year.

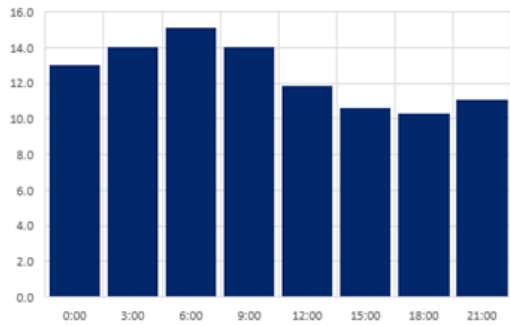
11,33 %. Взимку тумани можуть спостерігатись практично в третині всіх строків спостережень (30,36 %).

Добовий хід туманів чітко виражено в усі сезони року. Максимум повторюваності туманів восени припадає на ранкові години о 6 год. (9,6 %) і о 9 год. (10,2 %). Найрідше восени тумани реєструються вдень з 12 по 18 год. з мінімумом повторюваності о 15 год. (0,9 %).

Схожий добовий хід туманів спостерігається і в інші сезони року: ймовірність появи туману є менша у післяполудневі та вечірні часи, а більшою – у нічні та ранкові часи, що вказує на те, що найбільшу роль при формуванні туманів відіграє радіаційне вихолодження. Влітку тумани, як і суцільна низька хмарність, реєструється вкрай рідко. Туман влітку спостерігається частіше в момент сходу Сонця (6,5 % о 6 год.), а вдень (12 та 15 години) і у ввечері (21 год.) туман взагалі відсутній.

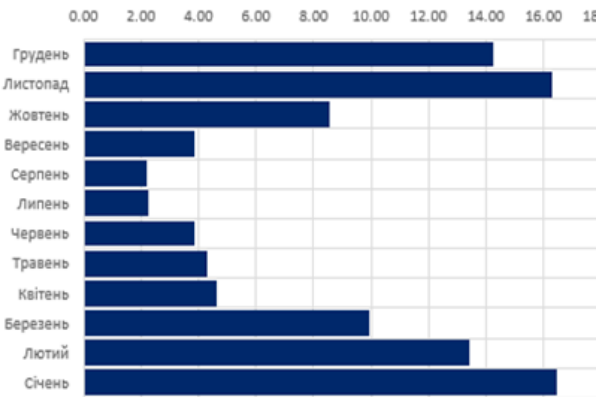
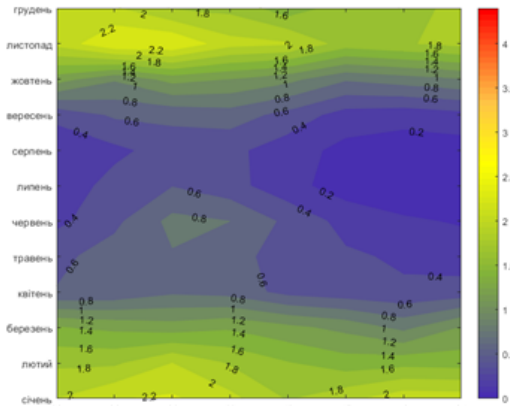
На рис. 3 і 4 представлено розподіл повторюваності низької суцільної хмарності і туманів як функції години доби і місяця року. З рис. 3 можна бачити, що суцільна низька хмарність найчастіше реєструється з жовтня по березень – на цей період припадає 79 % всіх випадків, а максимальна повторюваність низької хмарності у 16,3 % і 16,4 % має місце в листопаді і січні відповідно. Найчастіше низька суцільна хмарність формується в листопаді і січні з 3 по 6 год. ранку – двовимірна ймовірність її появи в цей час становить 2,2 %, найрідше вона реєструється з червня по вересень у післяобідні і вечірні години – 0,0-0,1%, але навіть в літні місяці ймовірність утворення суцільної низької хмарності в ранкові години не знижується до нуля.

Тумани мають найбільшу повторюваність в осінні місяці – 40% усіх випадків (рис. 4), для зимових місяців повторюваність туманів становить вже 30%. Найбільш



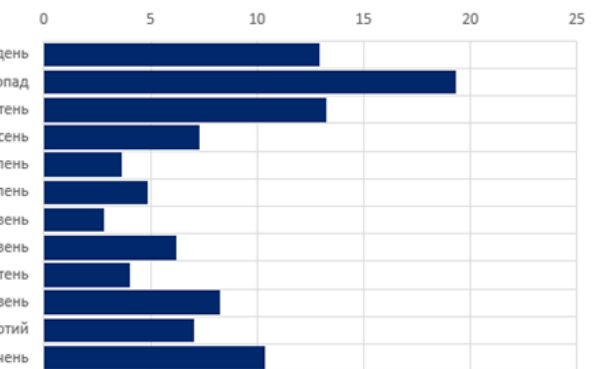
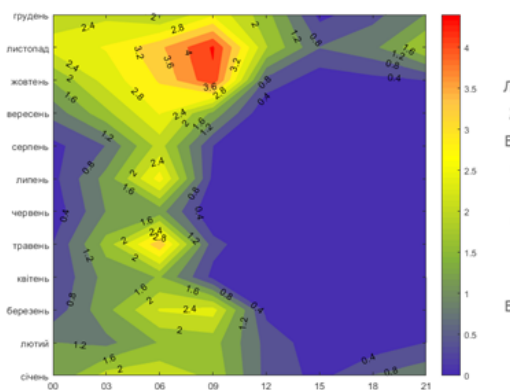
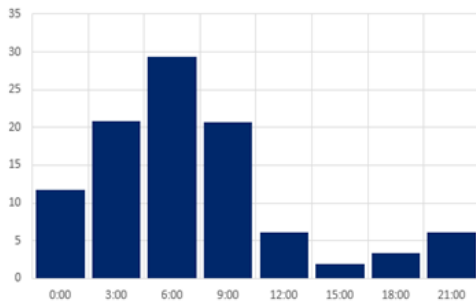
**Рис. 3.** Повторюваність суцільної хмарності з ВНМХ  $\leq 1500$  м як функція часу доби і місяця року. Відповідний розподіл суцільної низької хмарності за місяцем показано праворуч знизу, а розподіл повторюваності за часом надано у лівій частині рисунку.

**Fig. 3.** Frequency distributions of low-level stratiform cloud, as a function of the time of the day and the month of the year. The corresponding monthly distribution of low-level stratus frequencies is shown on the right, and the frequency distribution with respect to the time of day is shown in the top panel of the figure.



**Рис. 4.** Повторюваність туманів як функція часу доби і місяця року. Відповідний розподіл туманів за місяцем показано праворуч знизу, а розподіл повторюваності за часом надано у лівій частині рисунку.

**Fig. 4.** Frequency distributions of fog as a function of the time of the day and the month of the year. The corresponding monthly distribution of fog event frequencies is shown on the right, and the frequency distribution with respect to the time of day is shown in the top panel of the figure.



сприятливі умови для формування туману створюються в жовтні і листопаді в ранкові години – їх повторюваність сягає максимуму (двовимірна ймовірність їх появи сягає 3,6-4,0 %). Причому в ранкові години і навіть влітку двовимірна ймовірність туманів становить 2,4-2,8 %. З лютого по жовтень в післяобідні і вечірні години ймовірність утворення туманів падає до нуля. Порівнюючи розподіли туманів і низької суцільної хмарності, можна бачити, що в місяці, на які припадає 79 % випадків низької хмарності, тумани реєструються в 71 % випадків, що вказує на схожість фізичних механізмів формування туманів і суцільної низької хмарності в Львівському регіоні.

### 3.2. Інформативність температури і відносної вологості повітря як індикаторів (!) низької хмарності і туманів.

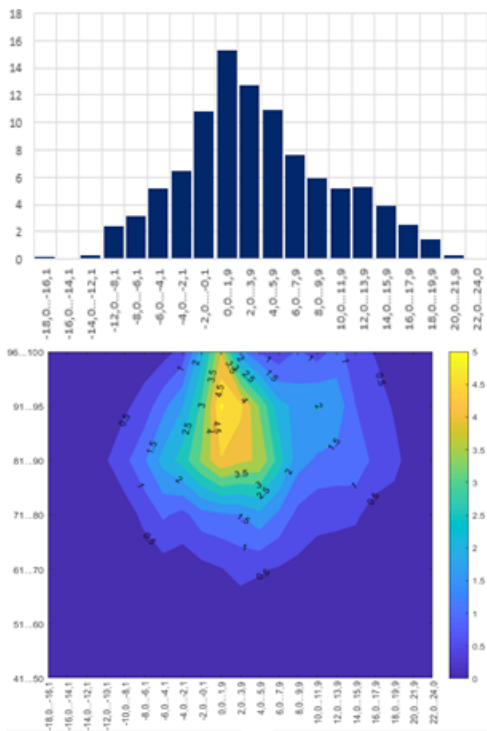
Утворення суцільної низької хмарності і туману значною мірою визначається температурою повітря і насиченістю повітря водяною парою, і, таким чином, за особливостями розподілу температури і вологості повітря можуть бути визначені області в яких формування низької хмарності і туману є найбільш ймовірним, знайдені порогові значення для їх розмежування.

Для визначення найбільш сприятливих для формування туману/суцільної низької хмарності температурно-вологісних умов було обчислено

двовимірні повторюваності комплексу таких метеорологічних величин як температура і відносна вологість повітря на рівні 2 м при цих явищах (рис. 5, 6).

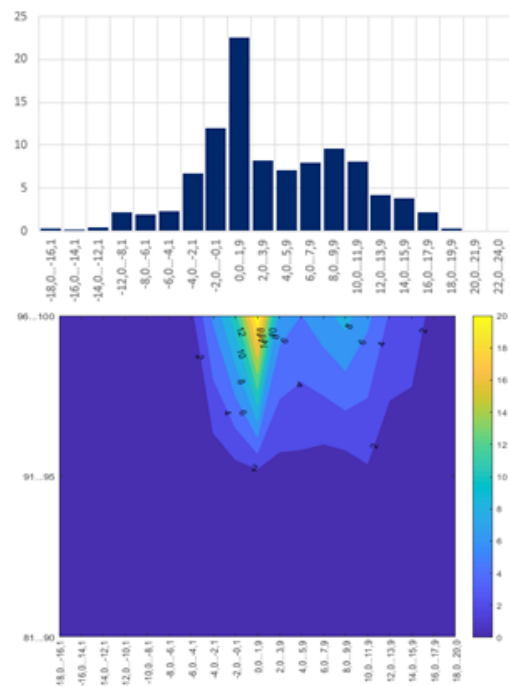
Формування суцільної низької хмарності не відбувається при відносній вологості меншій за 40 % та температурах вищих за 24 °С та нижчих за 18 °С (рис. 5). Але при низьких значеннях відносної вологості (41-50 %) суцільна низька хмарність реєструється вкрай рідко – менше, ніж в одному відсотку випадків (0,14 %). Більше, ніж в половині всіх випадків (65,3 %), суцільна низька хмарність спостерігається при досить високих значеннях вологості повітря – від 81 до 95 %.

Найбільші двовимірні повторюваності суцільної низької хмарності припадають на область, окреслену ізотермами -2,0 та 5,9 °С і ізолініями відносної вологості у 81 та 95 % – 32,3 % всіх випадків, з яких 56,5 % випадків спостерігаються при відносній вологості 81-95 % та температурі повітря 0-1,9 °С. Слід зауважити, що при високій відносній вологості 91-100 % суцільна низька хмарність не спостерігається при досить низьких та високих температурах. Наприклад, при відносній вологості 96-100 % суцільна низька хмарність не реєструється при температурах повітря нижчих за -10 та вищих за 20 °С.



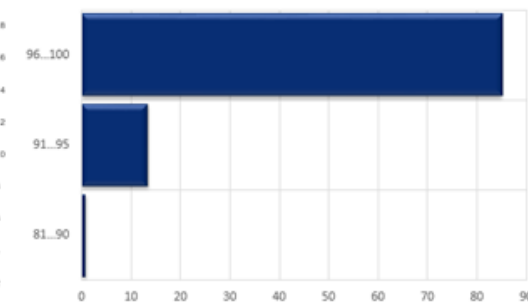
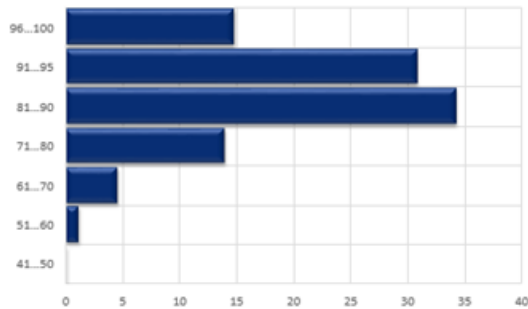
**Рис. 5.** Повторюваність низької суцільної хмарності як функція температури і відносної вологості, виміряних на висоті 2 м. Відповідний розподіл суцільної низької хмарності за відносною вологістю показано праворуч, а розподіл повторюваності за температурою надано у верхній частині рисунку.

**Fig. 5.** Frequency distribution of low-level stratus as a function of air temperature and relative humidity near the surface. The corresponding distribution of low-level stratus with respect to relative humidity is shown on the right, and the frequency distribution with respect to temperature is given at the top of the figure.



**Рис. 6.** Повторюваність туманів як функція температури і відносної вологості, виміряних на висоті 2 м. Відповідний розподіл туманів за відносною вологістю показано праворуч, а розподіл повторюваності за температурою надано у верхній частині рисунку.

**Fig. 6.** Frequency distribution of fog events as a function of air temperature and relative humidity near the surface. The corresponding distribution of fog events with respect to relative humidity is shown on the right, and the frequency distribution with respect to temperature is given at the top of the figure.



Між відносною вологістю та появою туманів (рис. 6) спостерігається тісніший зв'язок: відносна вологість змінюється в межах 80-100 %, причому 99 % всіх випадків реєструються в діапазоні 91-100 %, з яких 85 % припадає на інтервал 96-100 %.

Зміна температури повітря біля поверхні землі під час туманів відбувається в тих самих межах, що і для низької суцільної хмарності. Найбільші двовимірні ймовірності виникнення туманів спостерігаються в межах від -2,0 до 2,0 °C при відносній вологості 96-100 % (32,5 % всіх випадків).

Такий розподіл повторюваності туманів і низької хмарності залежно від температури і відносної вологості вказує на спорідненість цих явищ і може викликати деякі складності з ідентифікацією цих явищ при прогнозуванні, особливо при високих значеннях відносної вологості.

### 3.3. Висота нижньої межі низької суцільної хмарності.

Суцільна низька хмарність визначається перш за все висотою нижньої межі хмарності, тому найважливішою характеристикою є повторюваність висоти нижньої межі хмарності за різними градаціями.

Найбільша кількість випадків суцільної низької хмарності в аеропорту Львів в усі сезони припадає на градацію 100-200 м (рис. 7). Особливо часто суцільна низька хмарність з нижньою межею 100-200 м реєструється влітку (28,77 %) і восени (24,57 %). Хоча взимку і навесні вона має також значну повторюваність – 18,54-18,55 %.

Наступна за повторюваністю є градація у 300-600 м. Найчастіше така хмарність спостерігається взимку (25,7 %). За своїм походженням така хмарність взимку є фронтальною. Слід відзначити, що у градації 0-50 м навесні і влітку низька суцільна хмарність відсутня, взимку цей показник становить лише 0,27 %, а восени – 0,20 %. Проте для Львова є досить характерною дуже низька суцільна хмарність – в більшості випадків висота нижньої межі низької суцільної хмарності нижча за 600 м: 58,9 % випадків навесні і 76,4 % влітку, що вказує на досить небезпечні умови для польотів навіть влітку.

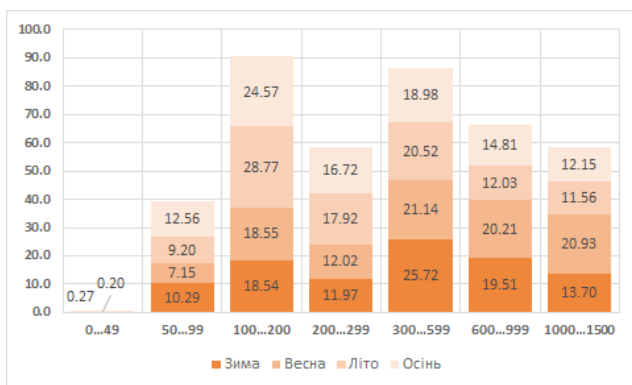


Рис. 7. Повторюваність ВНМХ при суцільній низькій хмарності в різні сезони року.

Fig. 7. Frequency distribution (%) of low-level stratus as dependent on the height of the cloud base in the seasons of the year.

### 3.4. Метеорологічна дальність видимості при тумані.

Інтенсивність туману визначається його тривалістю і ступенем щільності туману (Stolaki, 2009). За метеорологічною дальністю видимості (МДВ), яка визначає ступінь щільності туману, тумани можна поділити на слабкі (з видимістю 500-1000 м), помірні (з видимістю 200-500 м), сильні (видимість становить 50-100 м) і дуже сильні (з видимістю меншою від 50 м).

Максимум повторюваності туману за рік і в усі сезони року припадає на градацію 0-100 м, тобто найчастіше спостерігаються сильні і дуже сильні тумани: ймовірність появи таких туманів найменша навесні (23,36 %), а найбільша восени (31,86 %) (рис. 8).

В усі сезони в 65 % і більше усіх випадків туманів реєструється мінімум видимості 400 м або нижче, що відповідає помірним, сильним і дуже сильним туманам. Найчастіше такі тумани трапляються навесні (72,99 % від усіх випадків туманів навесні), а найрідше – взимку (65,33 % від усіх випадків туманів взимку).

Тумани, дальність видимості в яких становить 901-1000 м спостерігаються вкрай рідко, в 0,79 % всіх випадків. Отримані результати є досить важливими, оскільки демонструють серйозність проблеми в аеропорту Львів, оскільки незважаючи на сезон і тип туману, тумани, які спостерігаються, зазвичай, є дуже щільними.

### 3.5. Швидкість та напрямок вітру.

Напрямок і швидкість вітру, які визначаються циркуляційними умовами і пов'язані з характером адвекції, можуть тією чи іншою мірою асоціюватися з підвищеною або зниженою повторюваністю туману/низької суцільної хмарності.

Залежність повторюваності шаруватоподібної хмарності з ВНМХ ≤1500 м від швидкості вітру в більшості випадків суттєво змінюється залежно від сезону року (рис. 9). Протягом року найбільша повторюваність такої хмарності припадає на градацію швидкості вітру 3...4 мс<sup>-1</sup>.

В усі сезони більше ніж 80 % всіх випадків низької суцільної хмарності спостерігається при швидкості вітру

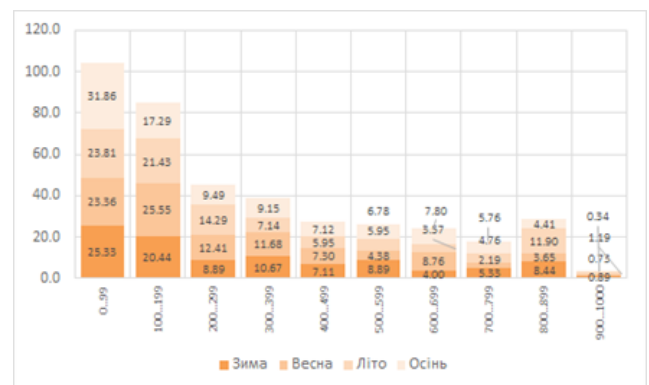


Рис. 8. Повторюваність метеорологічної дальності видимості під час туману в різні сезони року.

Fig. 8. Frequency distribution of fog as dependent on meteorological visibility in the seasons of the year.

4 м/с і нижче: влітку має місце найбільша кількість таких випадків – 93,87 %, взимку такі випадки реєструються рідше, аніж в інші сезони – у 81,93 %.

Тільки взимку при суцільній хмарності з нижньою межею  $\leq 1500$  м спостерігаються швидкості вітру понад 10 м/с, восени і навесні цей показник не перевищує 10 м/с, влітку максимальна швидкість вітру при низькій суцільній хмарності становить 6 м/с. На відміну від багатьох аеродромів, для яких є характерною висока повторюваність низької хмарності з ВНМХ  $\leq 1500$  м для швидкостей вітру  $> 8$  м/с, у Львові, навпаки, при цих швидкостях спостерігається суттєве зниження повторюваності.

При штилях і швидкостях вітру  $\leq 2$  м/с суцільна низька хмарність спостерігається приблизно в половині всіх випадків: частка таких випадків коливається від 54,25 % влітку до 45,99 % взимку.

Зовсім інший характер має розподіл повторюваності швидкості вітру при туманах (рис. 10). Тумани формуються при менших швидкостях вітру: швидкість вітру не перевищує 6 м/с взимку і восени, 4 м/с – навесні і 2 м/с – влітку. В усі сезони року найчастіше при туманах

реєструються штилі з максимумом повторюваності влітку (77,38 %) і мінімумом повторюваності взимку – 37,33 %. В середньому за рік майже половина (53,52 %) всіх випадків туманів реєструються при штилі.

Взимку і восени також мають місце два локальних максимуми повторюваності туманів: при швидкостях 2 і 3...4 мс<sup>-1</sup>.

Залежність для туманів і суцільної низької хмарності простежується не тільки від швидкості вітру, але і від напрямку вітру (рис. 11).

Восени і взимку переважає перенесення низької шаруватоподібної хмарності із західного і межуючого з ним західно-північно-західного напрямку, на які припадає 22, 3% всіх випадків взимку і 24,9 % всіх випадків восени, та з протилежних до них напрямків – південно-східного і південно-південно-східного, що вказує на формування низької суцільної хмарності при перенесенні теплого повітря – 23,6 % взимку і 26,9 % восени. Висока повторюваність суцільної низької хмарності навесні і влітку спостерігається при напрямках вітру від західного до північного: 68,6 % всіх випадків влітку і 46,8 % навесні.

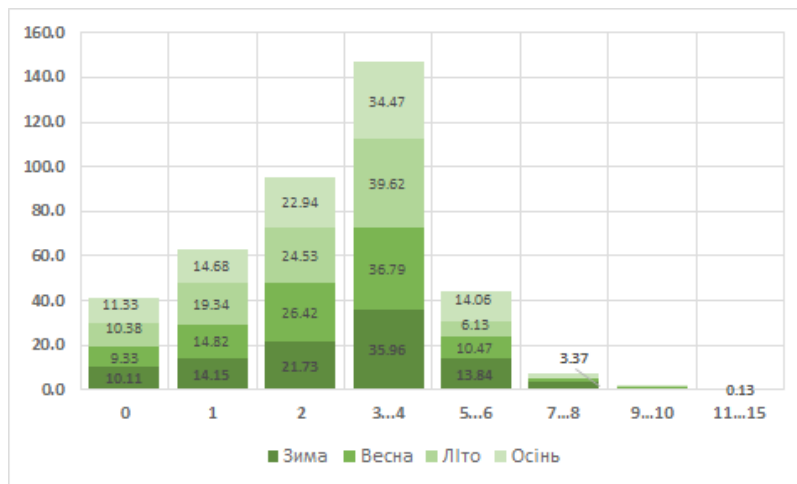


Рис. 9. Повторюваність швидкості вітру при суцільній низькій хмарності в різні сезони року.  
 Fig. 9. Frequency distribution of wind speeds, m/s, associated with low-level stratiform clouds in the seasons of the year.

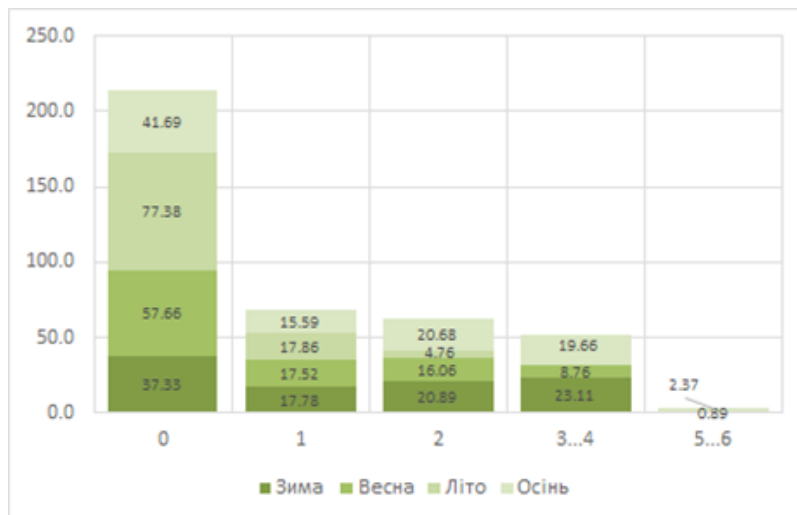
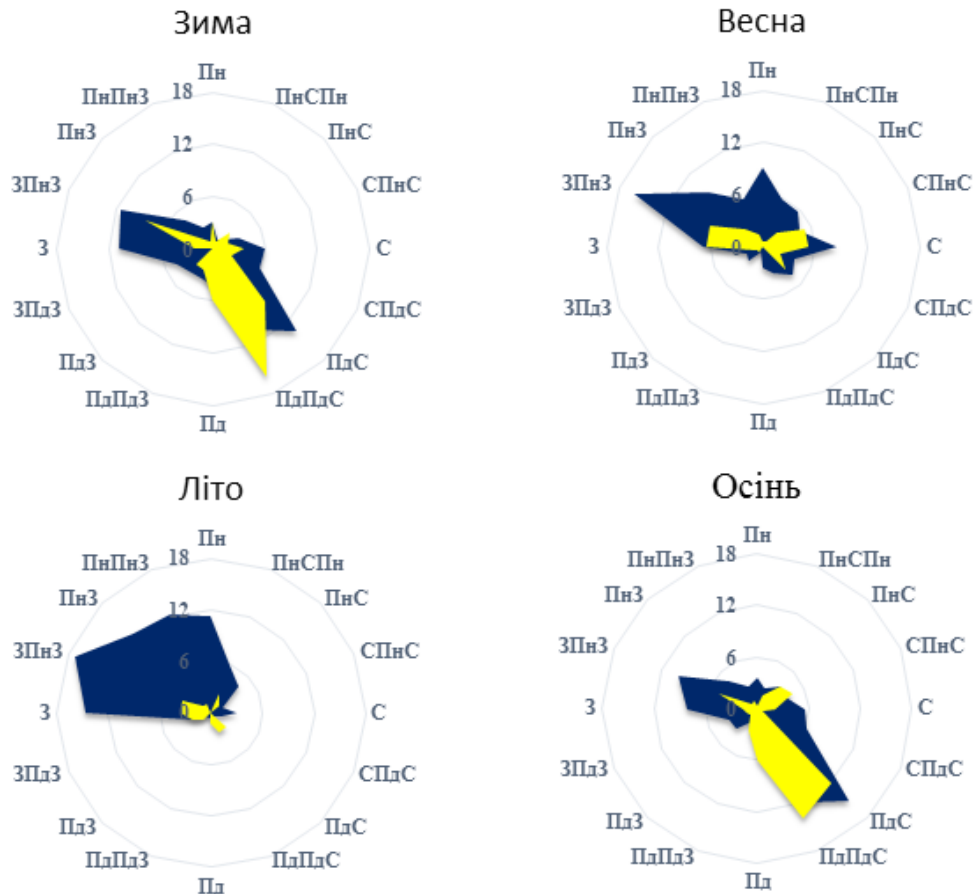


Рис. 10. Повторюваність швидкості вітру при туманах в різні сезони року.  
 Fig. 10. Frequency distribution of wind speeds associated with fogs in the seasons of the year.



**Рис. 11.** Повторюваність (%) напрямків вітру при суцільній низькій хмарності і туманах в різні сезони року. Синій колір відповідає суцільній низькій хмарності, жовтий – туманам.

**Fig. 11.** Frequency distribution (%) of wind directions associated with low-level stratiform clouds and fogs in the seasons of the year. The blue color corresponds to low-level stratiform clouds, while yellow represents fog.

Тумани найчастіше мають місце в зимовий і осінній періоди при південно-східних і південно-південно-східних вітрах, на які припадає практично чверть всіх випадків – 24,4 % взимку і 26,1 % восени, що відповідає адвекції теплого повітря, яке рухаючись на північ поступово охолоджується і його температура сягає температури точки роси. Влітку більшість випадків туманів має місце при перенесенні повітря із заходу і межуючих з ним напрямків – західно-північно-західного і західно-південно-західного – 9,52 % всіх випадків туманів літку. 4,8 % всіх випадків туманів літку реєструються також при південно-східному і південно-південно-східному вітру. Навесні тумани зазвичай спостерігаються при західному-північно-західному і західному напрямках – 13,1 % всіх випадків та східному і східно-північно-східному напрямках – 10,2 % всіх випадків.

#### 4. Висновки

Особливості річного та добового ходу низької хмарності в аеропорту м. Львів виявили найбільшу повторюваність низької хмарності в листопаді і січні;

з максимумом повторюваності в нічні і передранкові години, а мінімумом – в післяполудневі години. Влітку суцільна низька хмарність реєструється вкрай рідко – максимум двовимірної ймовірності становить 0,86 % в червні і припадає на ранкові години.

Річний хід туманів показав найбільшу повторюваність в жовтні і листопаді і яскраво виражений добовий хід, характерний для всіх сезонів року, з максимальною появою туману у передранкові і ранкові години.

Ймовірність появи низької суцільної хмарності виявляє досить тісну статистичну залежність від температури і вологості біля поверхні землі: найбільші двовимірні ймовірності припадають на область, окреслену ізотермами  $-2,0$  та  $5,9$  °C і ізолініями відносної вологості у 81 та 95 %.



Між відносною вологістю та появою туманів спостерігається більш тісний зв'язок: найбільші двовимірні ймовірності появи туману отримано в діапазоні 96-100 % для відносної вологості і  $0-2$  °C з а температурою повітря.

Більше, ніж у 65 % усіх випадків туманів реєструється мінімум видимості 400 м або нижче, що свідчить про серйозність проблеми, оскільки незважаючи на сезон і тип туману, вони, зазвичай, є досить інтенсивні і щільні.

Аналіз виявив наявність статистичних зв'язків низької хмарності і туманів з напрямком і швидкістю вітру. У всі сезони року найбільша повторюваність низької хмарності припадає на градацію швидкості вітру 3...4 м/с. Найбільша кількість випадків суцільної низької хмарності навесні й влітку реєструється при напрямках вітру від північного до західного, а взимку і восени – при південно-східному і також переважає вітер західного напрямку.

Тумани, навпаки, в усі сезони найчастіше утворюються під час штилів. Найбільш часто спостерігаються тумани взимку і восени при південно-південно-східних напрямках вітру, а навесні і влітку тумани найчастіше утворюються при західному напрямку вітру, але також часто мають місце вітри східних напрямків.

### ORCID iD

Oleksii S. Hustenko  <https://orcid.org/0009-0006-1289-3354>  
Inna A. Khomenko  <https://orcid.org/0000-0002-8982-5417>

### Список посилань

Andersen, H., Cermak, J., Fuchs, J., Knippertz, P., Gaetani, M., Quinting, J., Sippel, S., and Vogt, R.: Synoptic-scale controls of fog and low-cloud variability in the Namib Desert, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 3415–3438, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-20-3415-2020>.

- Cotton, W. R., and R. A. Anthes, 1989: Storm and Cloud Dynamics. *Academic Press*, 883 pp.
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P.D. et al. A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869–1921 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>.
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Muller, M.D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G. and Cober, S.G. (2007). Fog research: a review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 164(6-7), 1121–1159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>.
- Herzogh, P., Wiener, G., Bateman, R., Cowie, J., & Black, J. (2015). Data fusion enables better recognition of ceiling and visibility hazards in aviation. *Bulletin American Meteorology Society*, 96, 526–532. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00111.1>.
- Michaelides, S. and Gultepe, I. (Eds.): Short range forecasting methods for fog, visibility and low clouds, *Office for Official Publications of the European Communities*, Luxembourg, 2008.
- Pauli, E., Andersen, H., Bendix, J., Cermak, J., & Egli, S. (2020). Determinants of fog and low stratus occurrence in continental central Europe - a quantitative satellite-based evaluation. *Journal of Hydrology*, 125451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125451>.
- Stolaki, S.N., Kazadzis S.A., Foris D.V., and Karacostas Th.S. (2009). Fog characteristics at the airport of Thessaloniki, Greece. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, pp. 1541–1549. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1541-2009>.
- Archived METAR/SPECI Observations.* <http://rp5.ua/>.
- Order of State Aviation Administration of Ukraine on the Approval of the Flight Rules of Aviation in the Airspace of Ukraine “Meteorological Services for Civil Aviation.* <https://ips.ligazakon.net/document/RE30960?an=5045>.