

## Режим суцільної низької хмарності та туманів в міжнародному аеропорту «Одеса»

Олексій Густенко<sup>1</sup>

аспірант,<sup>1</sup> Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна,

e-mail: [aleksey.gustenko96@gmail.com](mailto:aleksey.gustenko96@gmail.com),  <https://orcid.org/0009-0006-1289-3354>;

Інна Хоменко<sup>1</sup>

к. геогр. н., доцент,

e-mail: [innchom.ik@gmail.com](mailto:innchom.ik@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-8982-5417>

Метеорологічні спостереження на аеродромах є найціннішим джерелом інформації про погодні умови, включаючи небезпечні і рідкісні явища погоди. Спостереження проводяться з високою частотою в часі – від 30 хв і 1 год. (на аеродромах з інтенсивним повітряним рухом) до 3 год. Ця обставина, а також наявність інструментальних вимірювань висоти нижньої межі хмарності дозволяють використовувати аеродромні дані не тільки для складання кліматичних описів аеродромів, але і для дослідження режиму небезпечних явищ і розробки локальних прогностичних методик. Низька хмарність і туман, які обмежують дальність видимості, є основними чинниками, що утруднюють зліт і приземлення повітряних суден, а також їх польоти на малих висотах. Незважаючи на те, що сучасні моделі з високим розділенням прогнозують не тільки температуру і вологість, але в ряді випадків також кількість хмарності і наявність туманів, тим не менше прогноз низької хмарності і туманів, лишається однією з найскладніших задач в авіаційній метеорології через сильну залежність появи і розвитку суцільної хмарності і туманів від місцевих умов. Це веде до необхідності встановлення локальних зв'язків між вихідними даними чисельних моделей і характеристиками низької хмарності та туманів. В силу зазначених обставин детальний кліматологічний аналіз аеродромних даних є необхідною основою для поповнення чисельних моделей архівною інформацією та встановлення локальних залежностей, що дозволяють прогнозувати характеристики туманів і низької хмарності. В роботі виконано фізико-статистичний аналіз даних аеродромних спостережень за туманами і суцільною низькою неконвективною хмарністю з нижньою межею не вище за 1500 м, яка вважається небезпечною для здійснення польотів літаків, в місті Одеса за період з 2010 по 2021 рр. Дані містили спостереження в коді SYNOP з 2010 по 2012 рр. і спостереження в коді METAR/SPECI з 2013 по 2021 рр. для аеропорту м. Одеса. В роботі досліджено сезонні і добові розподіли туманів і низької хмарності. Визначено інтервали температур і відносної вологості, в яких повторюваність туманів і низької хмарності є найбільшою. В подальшому отримані характеристики можуть бути використані для встановлення залежностей між метеорологічними величинами, висотою нижньої межі хмарності і наявністю туманів різної інтенсивності і різного походження.

**Ключові слова:** туман, суцільна низька шаруватоподібна хмарність, фізико-статистичний аналіз, Одеса, METAR/SPECI, SYNOP.

**Як цитувати:** Густенко Олексій. Режим суцільної низької хмарності та туманів в міжнародному аеропорту «Одеса» / Олексій Густенко, Інна Хоменко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – Вип. 59. – С. 95-109. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-08>

**In cites:** Hustenko Oleksiy, Khomenko Inna (2023). Fog and low-level stratus characteristics at the airport of Odesa from surface observations. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 95-109. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-08> [in Ukrainian]

**Постановка проблеми.** Туман і низька хмарність мають неабияке соціально-економічне значення [35]. Погіршуючи видимість біля поверхні землі, туман становить загрозу для всіх видів транспорту, особливо в аеропортах [15, 20, 31, 32]. Туман і низька суцільна хмарність, які обмежують дальність видимості, дуже часто є основними причинами втрати часу, грошей і навіть людських життів під час авіаційних перевезень [10, 13, 24, 33]. Віднедавна інформація про туман потрібна при автономному керуванні автомобілем, а про туман і низьку хмарність – для застосування у виробництві сонячної енергії. Тому, як ніколи, потрібні вдосконалені системи підтримки прийняття рішень, адаптовані до широкого кола видів діяльності, на які впливає туман і низька хмарність [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хоча проблемі погіршення видимості та її впливу

на авіаційну безпеку в науковій літературі приділяється багато уваги з 1930-х років [16, 17], проте, і досі, найпоширенішими погодними явищами, що призводять до смертельних випадків в авіації, лишаються низька хмарність, туман, дощ і сніг [23]. Статистика аварій цивільної авіації в Сполучених Штатах Америки з 1982 по 2013 рік [2] свідчить про те, що, незважаючи на темпи зниження кількості аварій цивільної авіації через погоду, метеорологічні умови продовжують призводити до майже 100 смертельних випадків щорічно тільки в США. Лише 20% аварій цивільної авіації відбувається через інструментальні метеорологічні умови, під час яких пілоти в керуванні літаком покладаються лише на прилади, тобто за умов обмеженої видимості, проте саме ці умови призводять до більш, ніж 60% усіх смертельних випадків, спричинених погодними умовами. І хоча за

більш сучасними даними, наданими в звіті Національної ради з безпеки на транспорті за 2008-2020 рр. [25], частка смертельних інцидентів, пов'язаних з недостатньою видимістю або з низькою хмарністю, знизилася, але лишається все одно досить високою – 53% смертельних інцидентів. Ці результати вказують, що погіршення видимості, продовжує відігравати значну роль у низці смертельних катастроф цивільної авіації щороку, незважаючи на низку превентивних заходів, які вживаються в авіації, а отже, правильний і своєчасний прогноз цих явищ може значно зменшити їх вплив на авіакомпанії. Удосконалені прогнози допоможуть зменшити фінансові втрати, пов'язані із затримками в аеропортах, а також людські та фінансові втрати через аварії, які можна порівняти з втратами внаслідок торнадо [15].

Туман і низька шарувата хмарність – це суспензія дуже маленьких крапель води в повітрі поблизу поверхні землі [11, 38]. Єдиною відмінністю між ними є висота їхньої нижньої межі: туман формується від поверхні землі, а шаруваті хмари – на деякій висоті. Незважаючи на цю різницю, їх часто об'єднують у єдину категорію [6] і туман розглядають як шарувату хмару прямо над землею [21]. Основним критерієм визначення туману біля поверхні землі є дальність видимості менша за 1 км [38].

Механізми утворення туману та низьких шаруватих хмар є схожими [26]. Незважаючи на те, що більшість фізичних процесів, які викликають туман і низькі шаруваті хмари, вивчаються вже протягом відносно тривалого часу [8, 9, 15, 22, 24, 27, 36], їх точний прогноз залишається однією з найскладніших задач авіаційної метеорології через схожість механізмів утворення цих явищ, складність і недетермінованість процесів в граничному шарі атмосфери (наприклад, мікрофізичні процеси, поверхневі турбулентні потоки, радіаційні процеси, мезомасштабні циркуляції тощо), а також сильну залежність появи туманів і низької хмарності від місцевих умов [13].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Класичний підхід до прогнозування туману і шаруватой низької хмарності базується на моделях чисельного прогнозу погоди [12, 29]. Проте, моделювання цих явищ потребує досить високого горизонтального розділення моделі (в декілька кілометрів – [35]). В роботі [18] також підкреслюється той факт, що різноманітні фізичні процеси, пов'язані з туманом і низькими шаруватими хмарами, недостатньо адекватно описуються в чисельних моделях прогнозу погоди через складність основних фізичних процесів і відсутність достатньої вертикальної роздільної здатності в граничному шарі атмосфери [28, 32]. Окрім того, й досі немає згоди щодо єдиного

підходу, який допоміг би суттєво вдосконалити прогноз туманів і низької шаруватой хмарності у моделях чисельного прогнозу погоди з високою роздільною здатністю [4, 7, 30]. Тому, точний прогноз туману та низької шаруватой хмарності за допомогою чисельних моделей поки що залишається складною задачею, незважаючи на досягнення в цій області в останні роки [35].

Системи ансамблевого прогнозу стали потужними інструментами для оцінки невизначеності чисельних прогнозів. Створюючи кілька прогнозів, дисперсія, що характеризує ансамбль, може бути безпосередньо пов'язана з невизначеністю в прогнозі. Ще одна перевага систем ансамблевого прогнозу полягає в тому, що вони мають прямий доступ до імовірнісної інформації про виникнення, тривалість та інтенсивність туманів, що може допомогти кінцевим користувачам приймати більш обґрунтовані рішення [3]. Але досить часто помилки чисельних моделей в ансамблевих прогнозах зазвичай не компенсують одна одну, а мають тенденцію до накопичення [14].

Через ненадійність чисельних короткострокових прогнозів до прогнозу туманів і низької шаруватой хмарності дуже часто застосовуються комбіновані фізико-статистичні методи [14], які, завдяки врахуванню місцевих кліматичних умов і локальних географічних умов через архівні дані спостережень, надають важливу підтримку прогнозисту.

Взагалі, як показано в роботах [14, 18] раптові зміни погоди, зокрема появи туману і низької шаруватой хмарності, в невеликих часових і просторових масштабах, можна оцінити і досить точно спрогнозувати, лише якщо синоптик має доступ до детальних локальних (in situ) спостережень та спостережень, які надходять з районів формування явища (upstream), а також локальних даних спостережень за минулі роки, які слугують як для наповнення чисельних моделей, так і при застосуванні методу аналогового ансамблю [1], і навчанні систем штучного інтелекту [3].

Також дані локальних спостережень і спостережень, які надходять з районів формування явища, є дуже корисними в поглибленні нашого розуміння щодо механізмів утворення і руйнування цих явищ.

Без локальних прямих спостережень неможлива коректна інтерпретація даних дистанційного зондування і валідація чисельних методів прогнозу погоди для належної розробки прогностичних алгоритмів [12].

Таким чином, основним джерелом удосконалення чисельних, ансамблевих і фізико-статистичних прогнозів небезпечних явищ для авіації є дані прямих локальних спостережень, а в таких країнах, як Україна, де поки що немає станцій,

обладнаних приладами, які вимірюють мезо- і мікромасштабні характеристики, чи то не єдиним таким джерелом є дані станційних спостережень в кодї METAR/SPECI і SYNOP.

**Формулювання мети статті.** Метою статті є всебічне дослідження метеорологічних умов утворення низької суцільної хмарності і туманів в аеропорту Одеса.

Відповідно до поставленої мети було розв'язано такі задачі: (1) отримання режимних характеристик низької суцільної хмарності і туманів для аеропорту Одеса, (2) визначення двовимірних ймовірностей появи туманів і низької суцільної хмарності в залежності від місяця року і години доби й в залежності від температури і відносної вологості повітря біля поверхні землі.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

**Особливості річного і добового ходу туманів і суцільної низької хмарності.** В статті для

вивчення режиму туманів і суцільної низької хмарності в аеропорту м. Одеса використовувались дані наземних спостережень в кодї SYNOP за період 2010 – 2012 рр., і в кодї METAR/SPECI, які охоплювали період 2013–2021 рр. Для аналізу вибирались усі випадки з туманами, зокрема тумани з опадами, і усі випадки суцільної низької неконвективної хмарності з висотою нижньої межі не вище за 1500 м, яка саме є найнебезпечнішою для польотів літаків, особливо на етапі зльоту і посадки літака.

В аеропорту м. Одеса за період з 2010 по 2021 рр. максимум в річному ході повторюваності суцільної низької хмарності має місце взимку (53,8% від усіх випадків), а мінімум – влітку (лише 1,8% від усієї кількості випадків, рис. 1.а). Восени низька хмарність реєструється в два рази частіше (29,6%), аніж навесні (15,1% від усієї кількості випадків).

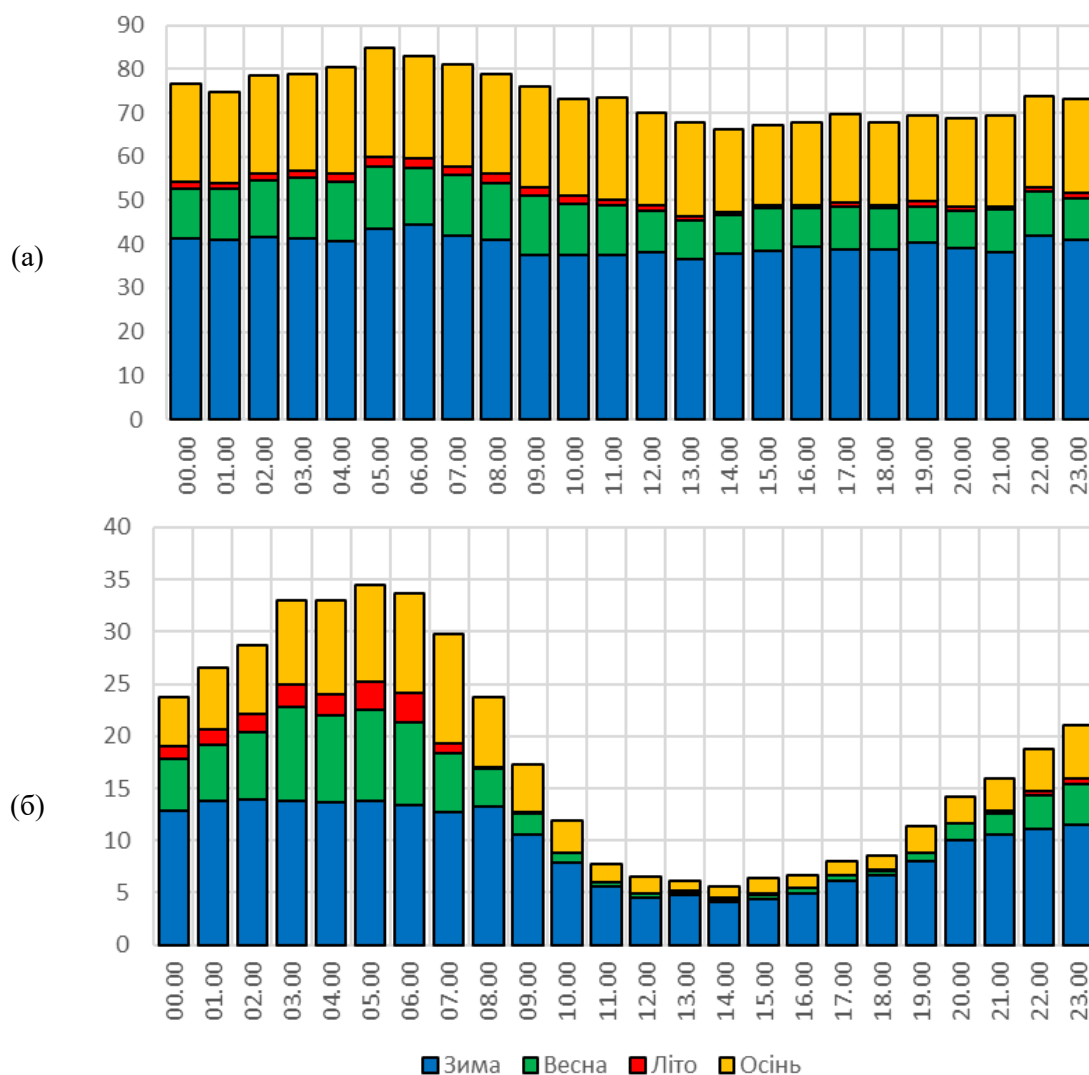


Рис. 1. Розподіл повторюваності (%) випадків суцільної низької хмарності (а) і туманів (б) в залежності від години доби за період 2010-2021 рр. в сезони року. Вздовж осі ОХ

відкладено години доби, вздовж осі ОУ – відсоток повторюваності /

Fig. 1. Frequency distribution (%) of low-level stratus throughout the day for the period 2010-2021 in the seasons of the year. The time of day is represented on the X-axis, and the percentage is indicated on the Y-axis

Добовий хід суцільної низької хмарності нечітко виражений, особливо взимку, що можна пояснити активною циклонічною діяльністю в цей період, а також частою появою стійкої стратифікації, яка сприяє виникненню підінверсійної хмарності.

Тумани, як і суцільна низька хмарність, найчастіше спостерігаються взимку, 53,3% усіх випадків (рис. 1б), саме в цей період мають місце найщільніші тумани з тривалістю до 4-х діб, що можна, як і у випадку суцільної шаруватої хмарності пояснити активною циклонічною діяльністю, коли в теплому секторі циклонів створюються сприятливі умови для винесення теплового вологого повітря з акваторії Чорного моря на холодну підстильну поверхню. Влітку тумани, як і суцільна низька хмарність, реєструється найрідше, лише 4% від усіх випадків. Восени тумани спостерігаються частіше (24,6%), ніж навесні (18,2% від кількості усіх випадків), що можна пояснити інтенсифікацією циклонічної діяльності.

Добовий хід туманів набагато краще виражений порівняно з суцільною хмарністю: в усі сезони, виключаючи зиму, максимум повторюваності

припадає на години перед сходом сонця і на сході сонця, що вказує на великий внесок радіаційного фактору в розвиток туманів. Взимку максимум повторюваності туманів є більш пролонгованим – з початку доби до 9 год. ранку за місцевим часом. Ймовірність виникнення туману в післяполудневі години є мінімальною в усі сезони року.

В роботі досліджено двовимірні ймовірності появи суцільної низької хмарності і туману в залежності від місяця року і часу доби (рис. 2, 3). Суцільна низька хмарність (рис. 2) найчастіше реєструється з жовтня по березень – на цей період припадає 90,5% всіх випадків, а максимальна повторюваність низької хмарності 20,6% і 20,9% має місце в листопаді і грудні відповідно, що вказує на тісний зв'язок появи суцільної низької хмарності з циклонічною діяльністю. Протягом всієї доби частота появи низької хмарності змінюється від максимальних значень 4,8–4,7% о 5 і 6 год. відповідно, тобто перед сходом сонця, і до мінімуму 3,7–3,8% від 13 до 16 год. за місцевим часом, тобто багаторічна добова амплітуда низької хмарності не перевищує 1,1%.

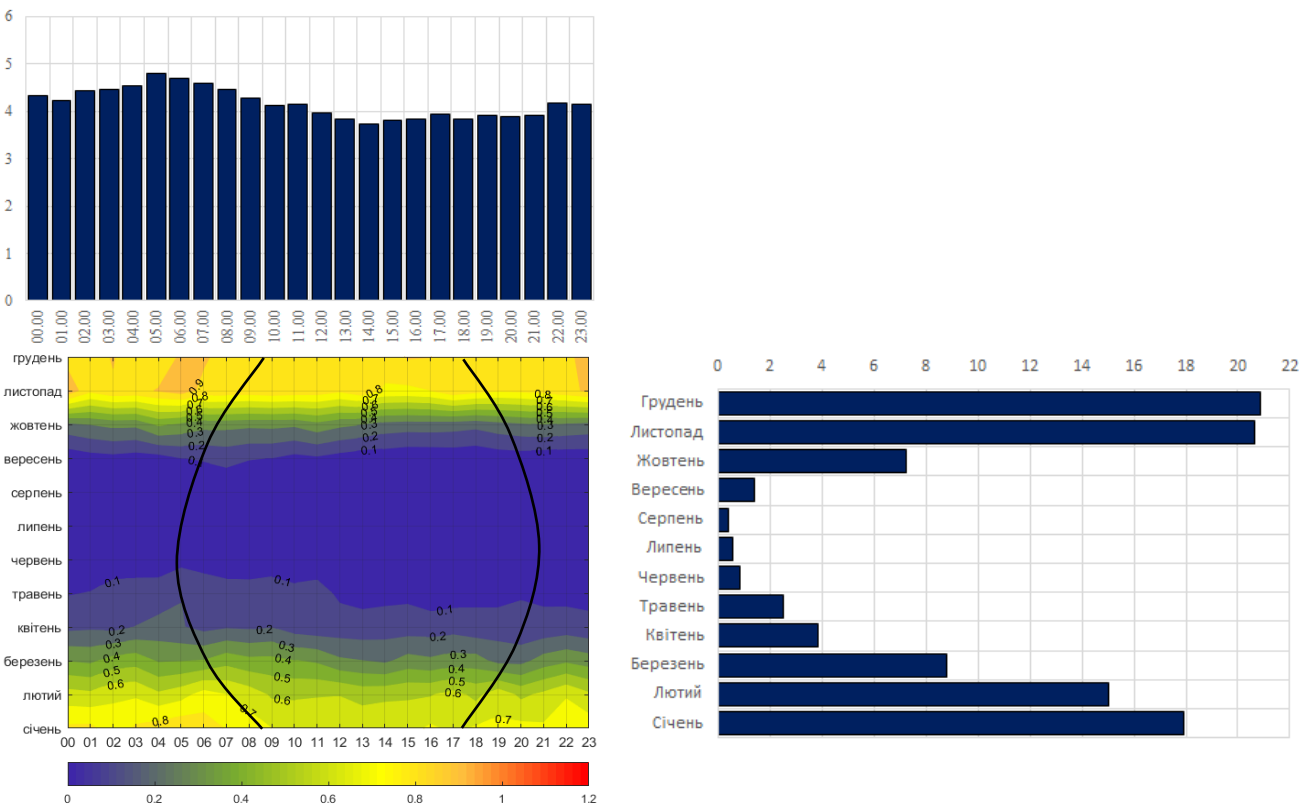


Рис. 2. Розподіл повторюваності суцільної хмарності з  $V_{NHX} \leq 1500$  м як функції часу доби і місяця року за період 2010–2021 рр. Відповідний розподіл суцільної низької хмарності за місяцем показано праворуч, а розподіл повторюваності за часом надано у верхній частині рисунку. Чорними суцільними лініями показано час сходу і заходу сонця /

Fig. 2. Frequency distributions of low-level stratiform cloud, as a function of the time of the day and the month of the year for the 2010–2021 period. 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. Times of sunrise and sunset (solid black lines) are indicated. The data cover the 2010–2021 period

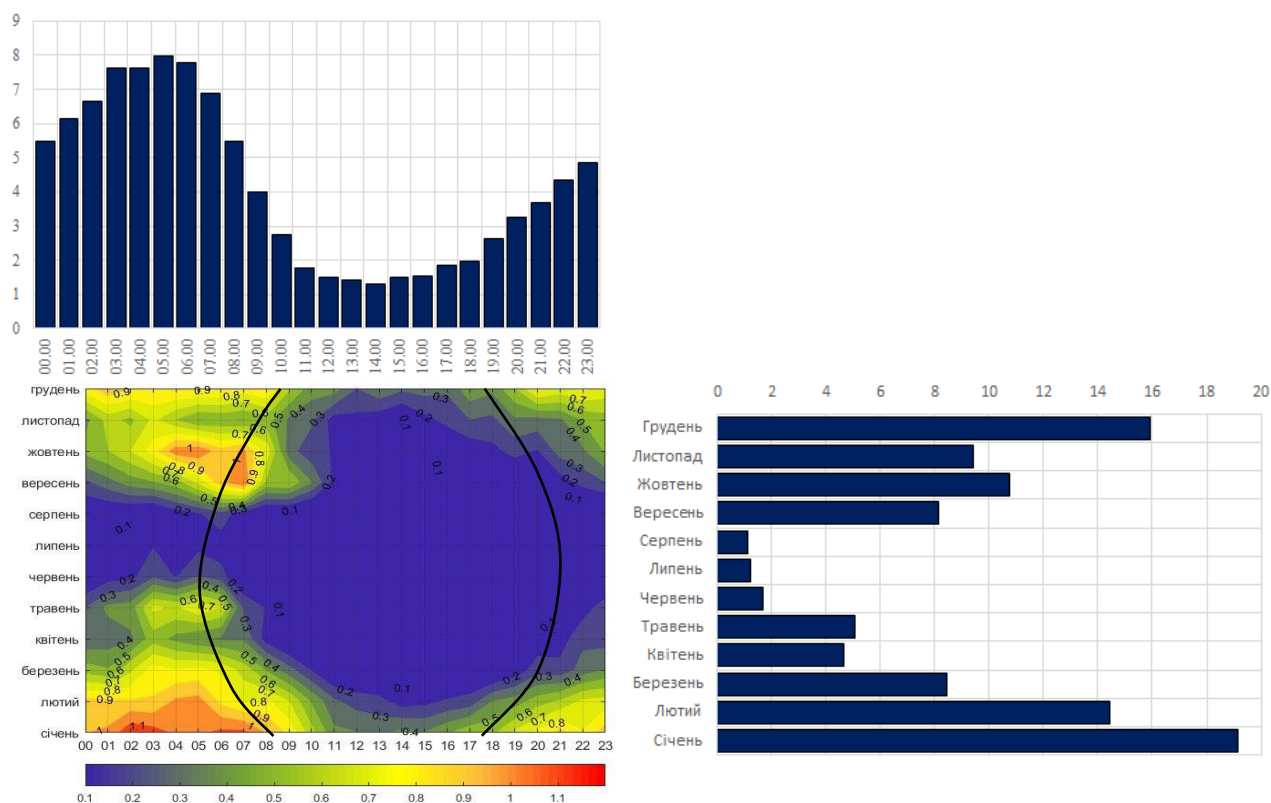


Рис. 3. Розподіл повторюваності туманів як функції часу доби і місяця року за період 2010–2021 рр. Відповідний розподіл суцільної низької хмарності за місяцем показано праворуч, а розподіл повторюваності за часом надано у верхній частині рисунку. Чорними суцільними лініями показано час сходу і заходу сонця /

Fig. 3. 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. Times of sunrise and sunset (solid black lines) are indicated. The data cover the 2010–2021 period

Максимальна двовимірна ймовірність появи суцільної низької хмарності сягає 0,97% на початку доби в листопаді, а мінімальні значення (0,01–0,07%) є характерними для літніх місяців протягом всієї доби, зокрема в липні 0 18 год. низька хмарність за весь досліджуваний період жодного разу не спостерігалась.

Порівнюючи розподіли туманів і низької суцільної хмарності, можна бачити, що в місяці, на які припадає 90,5% випадків низької хмарності, тумани реєструються усього в 67% випадків, що можна пояснити більшою залежністю туманів від місцевих умов і більшою різноманітністю механізмів утворення. З вересня по травень реєструється 96,0% всіх випадків туманів, а 90,9% випадків – з вересня по квітень.

Багаторічна добова амплітуда туманів набагато більша за відповідну амплітуду низької хмарності – 6,7%.

Поле двовимірних ймовірностей появи туману має яскраво виражений осередковий характер і показує тісну залежність появи туману від часу доби: найбільші двовимірні ймовірності появи туману (0,83–1,19%) припадають на нічні

години і години перед сходом сонця в січні і лютому, а також у вересні і жовтні недовзі перед сходом і після сходу сонця (0,95–1,10%). З травня по серпень більшу частину доби (з ранкових по вечірні години) тумани не реєструвалися жодного разу.

**Відносна вологість і температура біля поверхні землі при суцільній низькій хмарності і туманах.** Утворення суцільної низької хмарності і туману у великій степені визначається температурою повітря і насиченістю повітря водяною паром, і, таким чином, за особливостями розподілу температури і вологості повітря можуть бути визначені області, в яких формування низької хмарності і туману є найбільш ймовірним, і знайдені порогові значення для їх розділення.

В роботі в якості предикторів було обрано температуру і вологість повітря на рівні 2-х метрів і для визначення залежності між наявністю туманів/ суцільної низької хмарності і температурою й відносною вологістю знайдено двовимірні ймовірності появи цих явищ в температурно-вологісному полі (рис. 4, 5).

Формування суцільної низької хмарності не



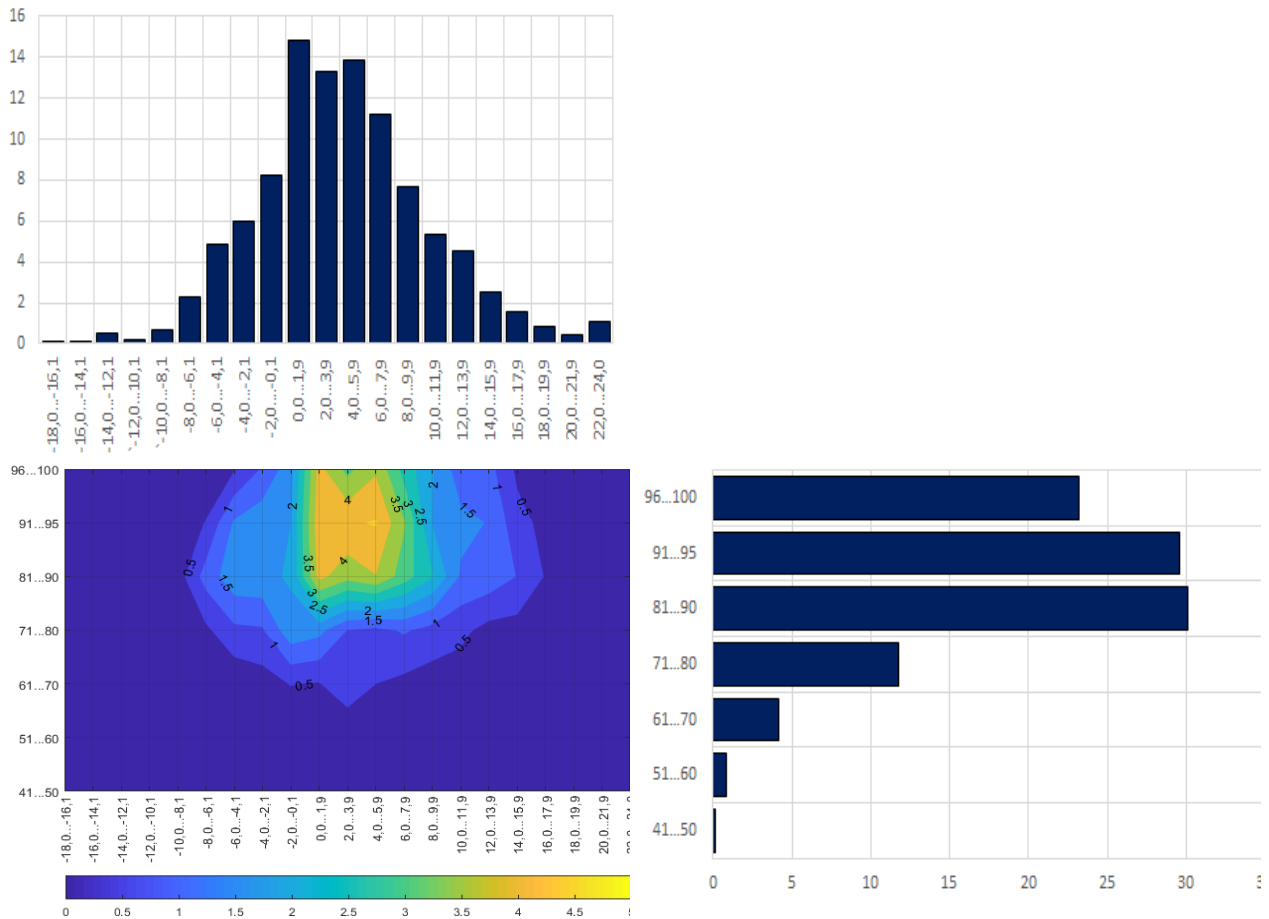


Рис. 4. Розподіл повторюваності низької суцільної хмарності як функції температури і відносної вологості, виміряних на висоті 2 м, за період 2010–2021 рр. Відповідний розподіл суцільної низької хмарності за відносною вологістю показано праворуч, а розподіл повторюваності за температурою надано у верхній частині рисунку /

Fig. 4. 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. The data cover the 2010–2021 period

відбувається при відносній вологості нижчій від 40% та температурах вищих за 24 та нижчих за  $-18^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). При відносній вологості 41–60% суцільна низька хмарність реєструється вкрай рідко (0,17%).

При відносній вологості повітря від 81 до 100% реєструється майже 83% всіх випадків суцільної низької хмарності, серед яких 52,1% мають місце при температурах при додатних температурах від 0,0 до  $+7,9^{\circ}\text{C}$ . Найбільша повторюваність припадає на область, окреслену ізотермами 0,0 та  $5,9^{\circ}\text{C}$  і ізолініями відносної вологості 91 та 95% (13,28% всіх випадків низької хмарності) з максимумом повторюваності (4,53%) в градаціях 91–95% за відносною вологістю та  $4,0\text{--}5,9^{\circ}\text{C}$  за температурою повітря. При значеннях відносної вологості 96–100% жодного випадку суцільної низької хмарності не було зареєстровано при температурах  $-12,0^{\circ}\text{C}$  і нижче, що можна пояснити активізацією ефекту Бержерона-Фіндайзена за цих умов і, як наслідок, швидкою кристалізацією хмар.

Між відносною вологістю та появою туманів спостерігається більш тісний зв'язок: відносна вологість змінюється в межах 80–100%, причому 99% всіх випадків реєструються в діапазоні 91–100%, з яких 79% припадає на інтервал 96–100% вологості повітря.

Тумани не спостерігаються при температурах вищих за  $24^{\circ}\text{C}$  та нижчих за  $-16^{\circ}\text{C}$ . Найбільші двовимірні ймовірності виникнення туманів спостерігаються в межах від 0 до  $5,9^{\circ}\text{C}$ , як і у випадку низької хмарності, але порівняно з низькою хмарністю, повторюваності в два рази більші (11,1–12,7%).

Такий розподіл повторюваності туманів і низької хмарності в залежності 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.

**Висота нижньої межі низької суцільної хмарності.** Повторюваність суцільної хмарності

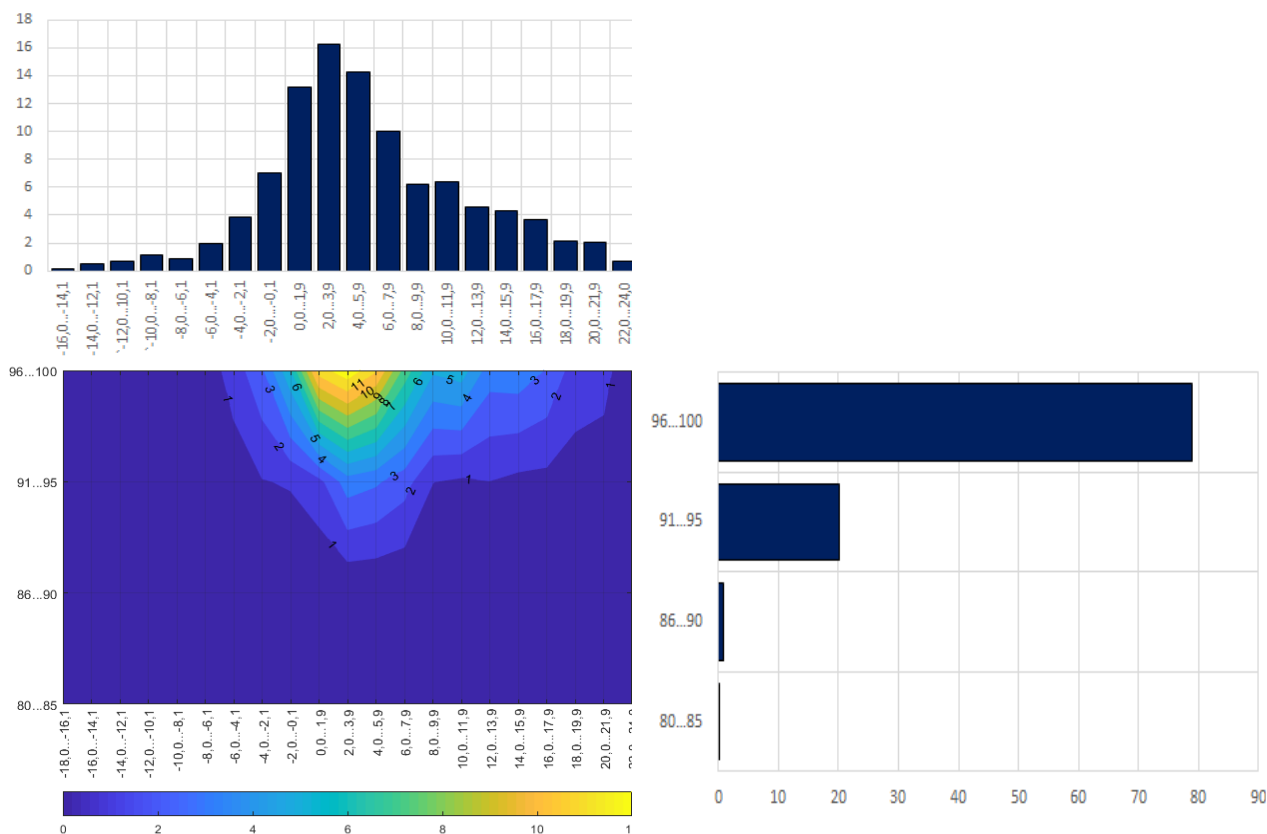


Рис. 5. Розподіл повторюваності туманів як функції температури і відносної вологості, вимірюваних на висоті 2 м, за період 2010–2021 рр. Відповідний розподіл туманів за відносною вологістю показано праворуч, а розподіл повторюваності за температурою надано у верхній частині рисунку /  
 Fig. 5. Frequency 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. The data cover the 2010–2021 period

взимку становить 53,6% від загальної кількості випадків, знижуючись поступово навесні до 15,1% і сягаючи свого мінімуму влітку – 1,8%. Це є досить очікуваний результат, оскільки від зими до літа температура підвищується найсильніше у нижніх шарах атмосфери, і умови для конденсації водяної пари тут стають влітку набагато менш сприятливими, аніж взимку, через що ймовірність утворення хмарності в нижніх шарах атмосфери різко зменшується.

Впродовж року розподіл суцільної низької хмарності характеризується максимумом повторюваності (79,3% від загальної кількості випадків) при висоті нижньої межі нижче 600 м, що лишається характерною особливістю розподілу впродовж всіх сезонів з максимумом взимку (83,3%) і мінімумом влітку (71,0% від сезонної кількості випадків). Взимку, частіше реєструються хмари з нижньою межею нижче за 300 м (55%). За своїм походженням така хмарність взимку в 74% випадків є фронтальною [41]. Навесні хмарність з межею нижче від 300 м спостерігається так само часто (50,2% від кількості випадків, які мають місце весною). Влітку цей відсоток суттєво зменшується і сягає 24,3%, а восени знову зростає

до 40,3%.

Найбільша кількість випадків низької суцільної шаруватої хмарності в аеропорту Одеси для всіх сезонів року припадає на градацію 300–600 м. Особливо часто суцільна низька хмарність з нижньою межею 300–600 м реєструється влітку (46,7% від кількості випадків, які мають місце влітку) і восени (32,6% від кількості випадків, які мають місце восени).

**Метеорологічна дальність видимості при тумані.** Інтенсивність туману визначається його тривалістю і ступенем щільності туману [32]. За метеорологічною дальністю видимості, яка визначає ступінь щільності туману, тумани можна поділити на слабкі (видимість 500 – 1000 м), помірні (видимість 200–500 м), сильні (видимість складає 50 – 200 м) і дуже сильні (видимість менша від 50 м) [41].

Максимум повторюваності туману за рік і в усі сезони року припадає на градацію 0–100 метрів (рис. 7), тобто найчастіше спостерігаються сильні і дуже сильні тумани: ймовірність появи таких туманів найменша влітку (33%), а найбільша – восени (43%).

В усі сезони, виключаючи літо, в 70–76%

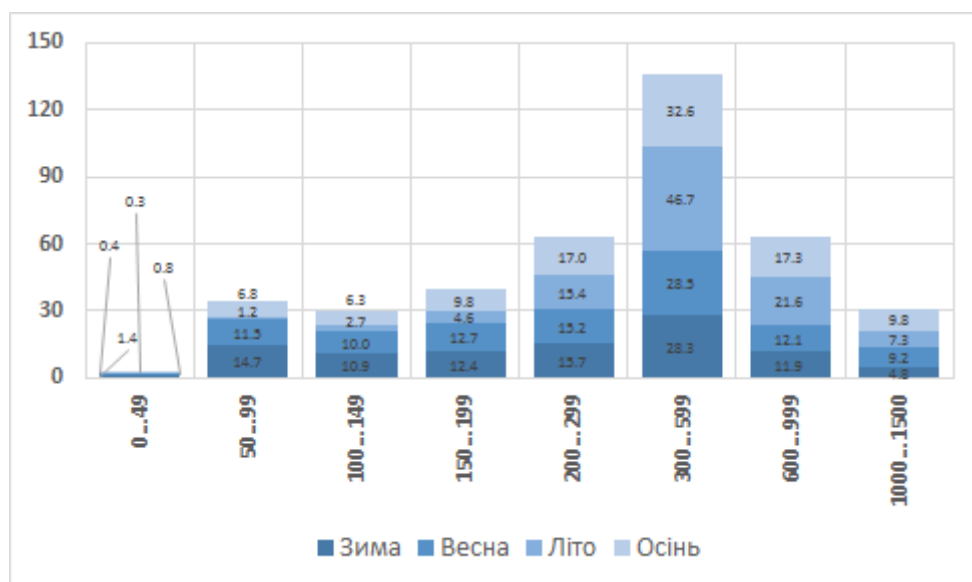


Рис. 6. Розподіл повторюваності (%) випадків суцільної низької хмарності в залежності від висоти нижньої межі хмарності за період 2010–2021 рр.

По осі ОХ відкладено градації висоти нижньої межі хмарності, по осі ОУ – відсоток /  
 Fig. 6. Frequency distribution (%) of low-level stratus as dependent on the height of the lower for the period 2010-2021 in the seasons of the year. The height of the cloud base is represented on the X-axis, and the percentage is indicated on the Y-axis

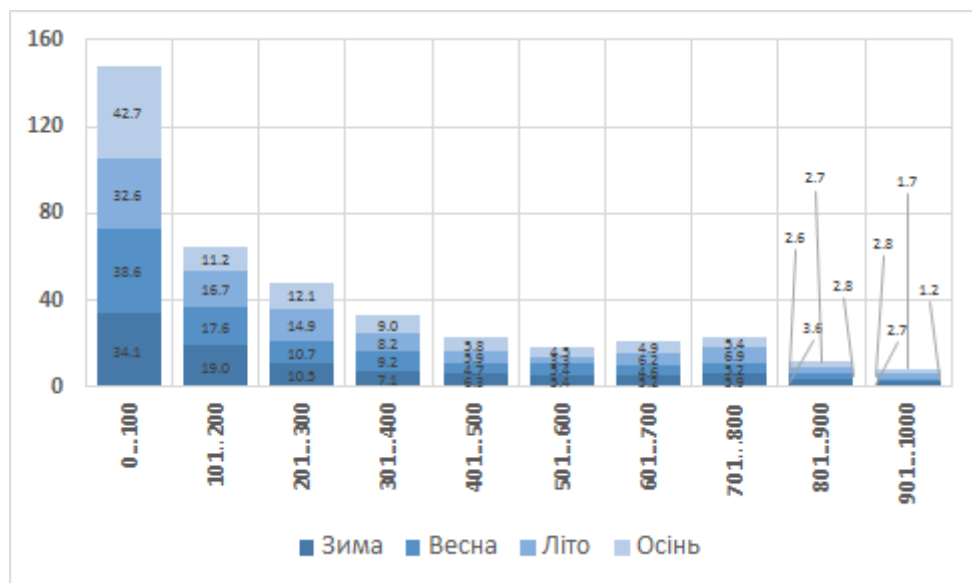


Рис. 7. Розподіл повторюваності метеорологічної дальності видимості при туманах за період 2010–2021 рр. /

Fig. 7. Frequency distribution (%) of fog as dependent on meteorological visibility for the 2010–2021 period

всіх випадків туманів, реєструється мінімум видимості 400 м або нижче, що відповідає помірним, сильним і дуже сильним туманам, а також вказують на серйозність проблеми в аеропорту Одеси, оскільки незважаючи на сезон і тип туману, тумани, які спостерігаються, зазвичай, є велими щільними.

Найбільша кількість епізодів туманів (в середньому 34,6%) триває не більше однієї години, а в 53,8% всіх епізодів явища спостерігаються не більше 2 год, але з листопада по лютий в 27,8%

випадках тумани можуть тривати від 13 до 96 год.

**Швидкість і напрямок вітру при суцільній низькій хмарності і туманах.** Залежність повторюваності шаруватої хмарності з  $V_{HMX} \leq 1500$  м від швидкості вітру в більшості випадків суттєво змінюється в залежності від сезону року (рис. 8.а).

Найбільша повторюваність суцільної хмарності з  $V_{HMX} \leq 1500$  м має місце в градації 3...4 м/с взимку (36,5%) і восени (38,8%). Навесні і влітку найчастіше суцільна низька хмарність реєструється при більш високих швидкостях з макси-



мумом випадків в градації 5...6 м/с – 32,7 і 30,8% відповідно. При штилях і швидкостях вітру  $\leq 2$  м/с суцільна низька хмарність спостерігається значно рідше, особливо влітку, і вкрай рідко має місце при швидкостях вітру 16–20 м/с. Більшість випадків низької хмарності (від 73,9% влітку до 84,4% навесні) в Одесі припадає на градації, які не є типовими для суцільної низької хмарності (3...8 м/с).

Зовсім інший характер має розподіл повторюваності швидкості вітру при туманах (рис. 8.б). Тумани утворюються при менших швидкостях вітру: швидкість вітру не перевищує 12 м/с. В усі

сезони року, виключаючи зиму, найчастіше при туманах реєструються штилі з максимумом повторюваності влітку – 67% і мінімумом повторюваності навесні – 40%. Взимку тумани найчастіше фіксуються при швидкості вітру 3...4 м/с (33%), хоча повторюваність штилів лишається досить високою – 24%.

Практично 90% всіх випадків туманів в усі сезони року реєструються при швидкостях вітру не більших за 4 м/с, мінімум в цьому діапазоні припадає на швидкість 1 м/с – не більше 8% від усіх випадків.

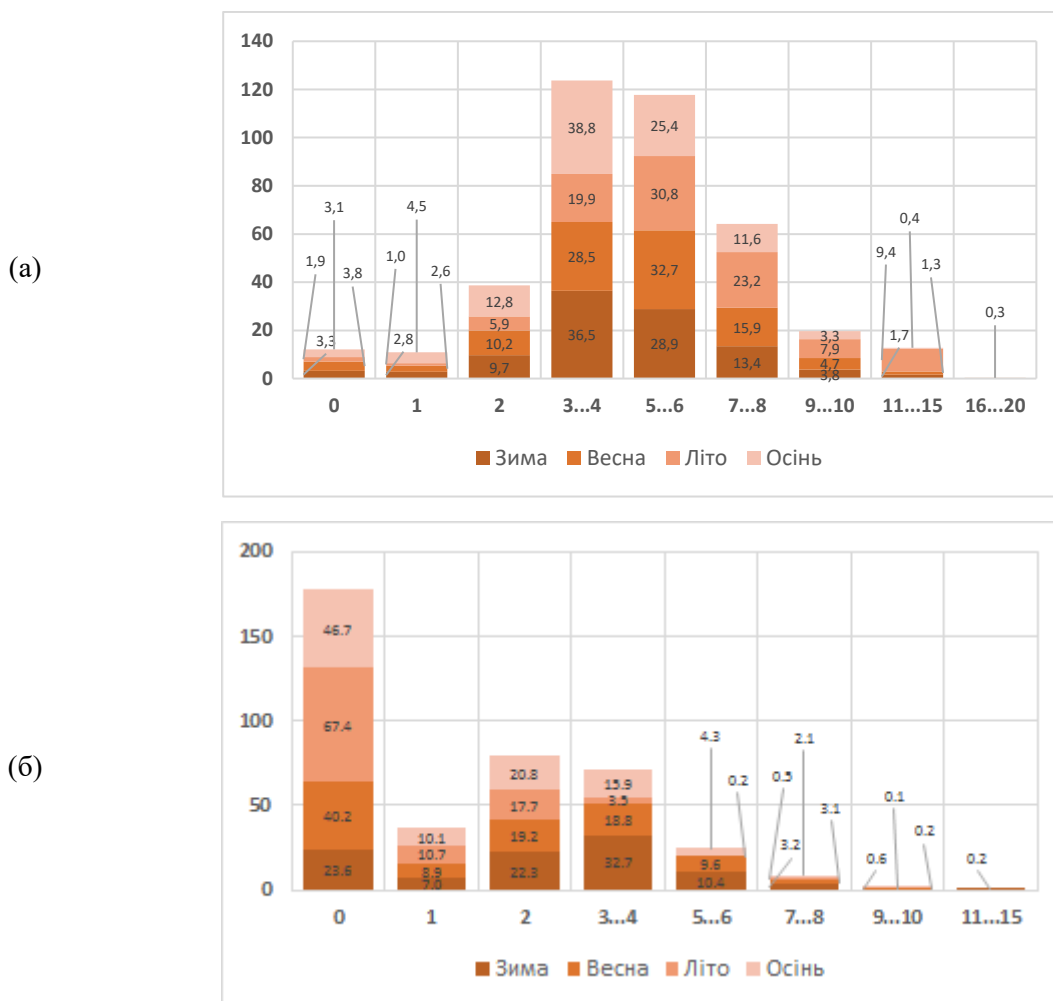


Рис. 8. Розподіл повторюваності (%) випадків суцільної низької хмарності (а) і туманів (б) в залежності від швидкості вітру за період 2010-2021 рр.

По осі ОХ відкладено градації швидкості вітру, по осі ОУ – відсоток /

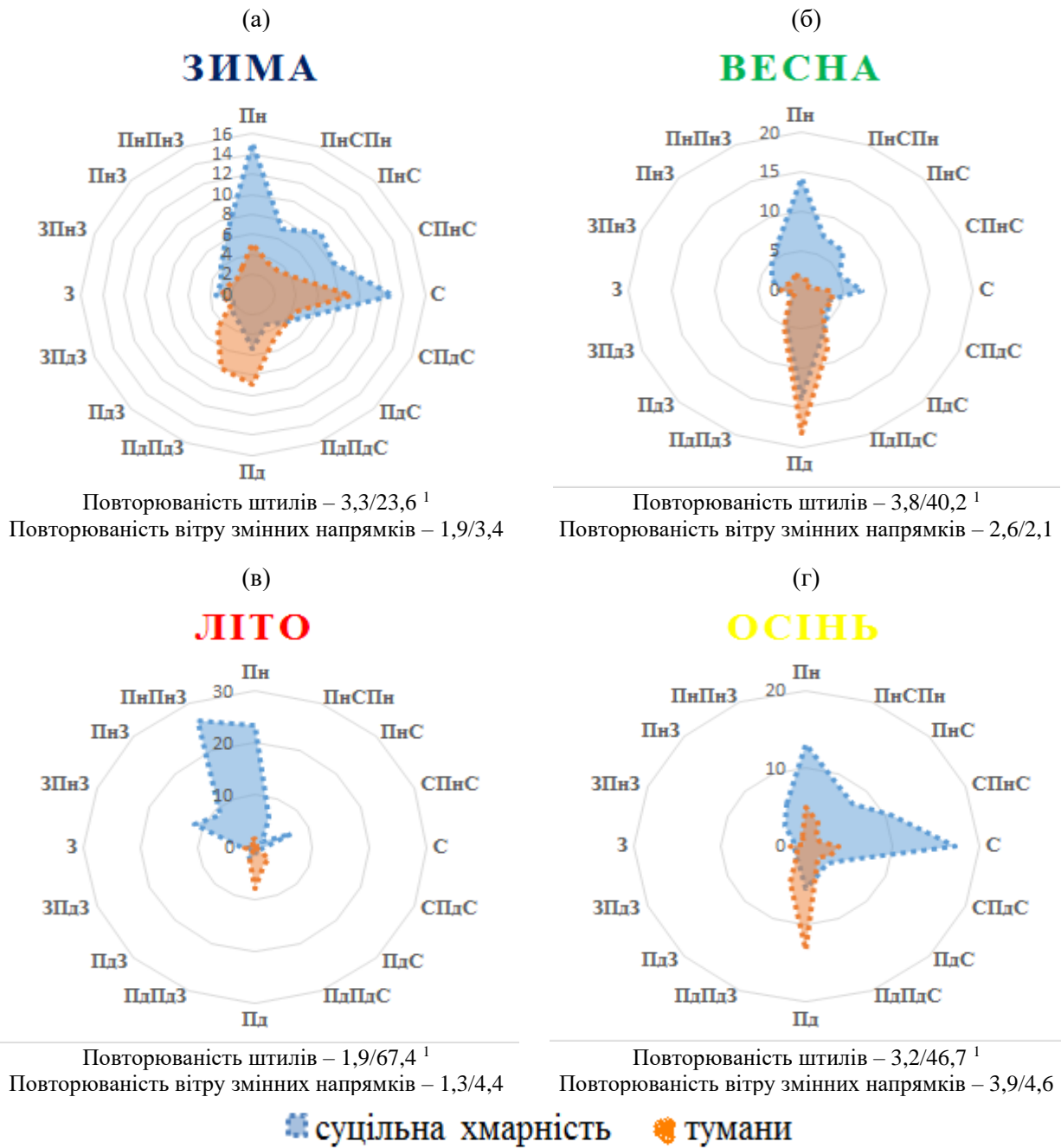
Fig. 8. Frequency distribution (% of the total number of cases) of wind speeds, m/s, associated with low-level stratiform clouds (a) and fog (б) for the 2010-2021 period. The wind speed is represented on the X-axis, and the percentage is indicated on the Y-axis

Залежність для туманів і суцільної низької хмарності простежується не тільки від швидкості вітру, але і від напрямку вітру (рис. 9).

Взимку половина всіх випадків суцільної низької хмарності (51,9%) припадають на вітри північно-східного квадранту (рис. 9 а), серед яких найбільші повторюваності мають вітри північного напрямку – 15,0% і східного – 13,0% всіх

випадків. Південний вітер реєструється лише у 5,4% випадків.

Восени розподіл напрямків вітру при суцільній низькій хмарності є схожим на розподіл взимку: також з найбільшою повторюваністю вітру північно-східного квадранту (57,7%) за виключення того, що максимум повторюваності припадає на східний напрямок (17,3%). Невели-



<sup>1</sup> Число у чисельнику характеризує повторюваність штилів і вітру змінних напрямків для суцільної хмарності, а у знаменнику – для туманів

Рис. 9. Рози вітрів для випадків з суцільною низькою хмарністю за період і туманів за період 2010–2021 рр. для (а) зими, (б) весни, (в) літа, (г) осені /

Fig. 9. Frequency distribution of wind directions associated with low-level stratiform clouds and fogs for the period of 2010-2020. The blue colour corresponds to low-level stratiform clouds, while yellow represents fog

кий локальний максимум також має місце при південних напрямках вітру – 5,5% (рис. 9 г).

Південний вітер якраз вказує на формування суцільної низької хмарності в передній частині циклону, а вітри північно-східного квадранту – на нетипове для осінньо-зимового періоду формування суцільної низької хмарності в холодній повітряній масі. Така ситуація часто має місце при вторгненні холодної повітряної маси на більш теплу підстильну поверхню зазвичай в тилловій час-

тині циклонів або в передній частині антициклонів і гребнів. В цих умовах спостерігаються низхідні рухи повітря, в наслідок яких формуються інверсії осідання. Безпосередньо за холодним фронтом і на відстані 300–500 км від нього над клином холодного повітря на висоті 400–600 м або вище, як правило, знаходиться нижня межа шару інверсії або ізотермії, які є характерними для фронтального шару.

Влітку при суцільній низькій хмарності спо-

стерігаються вітри з напрямками – північно-північно-західні та північні, які становлять 49,6% усіх випадків (рис.9 в). Велику повторюваність має також західний-північно-західний вітер (11,5% випадків). Всі напрямки влітку відповідають утворенню низької хмарності в холодній повітряній масі, що є типовим для теплого періоду над ґрунтом, сильно зволуженим рясними опадами.

Навесні розподіл напрямків вітру суттєво змінюється (рис.9 б): найбільшу повторюваність набуває південний вітер (14,3%) та північний напрямок вітру (13,9%). Південний вітер відповідає або західній частині антициклону, або східній частині циклону. Саме в цих частинах баричних утворень через адвекцію теплого і вологого повітря утворюються найбільш низькі хмари.

Тумани взимку найчастіше спостерігаються при напрямках північно-східного квадранту (25,4%) з максимумом повторюваності для східного вітру – 9,2%. Висока повторюваність туманів має місце також при південному (8,9%) і південно-південно-західному (7,9%) напрямках (рис. 9 а).

В інші сезони року при туманах переважає південний напрямок вітру з максимумом повторюваності навесні (18,2%) і мінімумом повторюваності влітку (7,9%), а вторинний максимум припадає на напрямки від південно-східного до південно-західного. Восени, порівняно з іншими сезонами, повторюваність північного вітру суттєво зростає і становить 5,1% всіх випадків туманів, які мають місце восени, але все одне найбільша повторюваність спостерігається для південного напрямку – 13,2%.

Таким чином, для туманів має місце більш класична ситуація: найчастіше тумани утворюються при адвекції теплого і волого повітря в західній частині антициклонів або у східній частині циклонів.

**Висновки.** Особливості річного та добового ходу низької хмарності в аеропорту м. Одеса виявили найбільшу повторюваність низької хмарності в листопаді, а також в зимові місяці з максимумом повторюваності в усі сезони, крім літа, у вечірні або нічні години, і мінімумом - в післяполудневі години. Влітку суцільна низька хмарність реєструється вкрай рідко: максимум повторюваності становить 2% і доводиться на ранкові

години. Річний хід туманів показав найбільшу повторюваність в грудні і січні і яскраво виражений добовий хід, характерний у всі сезони, з максимальною появою туману в нічні і передранкові години.

З ростом відносної вологості при температурах 0–10°C виділяються області високої повторюваності низькою суцільною хмарністю, що вказує на тісний статистичний зв'язок повторюваності відносної вологості, температури і хмарності. Особливо тісний зв'язок простежується між відносною вологістю і появою туманів: більше 50% всіх випадків туманів спостерігаються при відносній вологості 95% і вище в діапазоні температур від -2 до +12°C, з яких 60% припадають на діапазон 0...+6°C.

Більше, ніж у 75% 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 виявляє наявність статистичних зв'язків низької хмарності і туманів з напрямком і швидкістю вітру. У всі сезони року найбільша повторюваність низької хмарності припадає на градацію 3 ... 4 м/с, виключаючи літо, коли найбільш часто така хмарність реєструється при більш високих швидкостях. Найбільша кількість випадків суцільної низької хмарності в осінньо-зимовий період припадає на напрямки північно-східного квадранту, що відповідає умовам утворення суцільної низької хмарності в холодній повітряній масі в західній частині циклону або східній антициклону. Тумани найчастіше в усі сезони, виключаючи зиму, утворюються при штилях. Найбільш часто спостерігаються тумани в усі сезони, виключаючи зиму, при південному напрямку, що вказує на утворення туману при адвекції теплого і вологого повітря.

Для встановлення надійних статистичних залежностей важливим є розуміння, наскільки дані стандартних наземних метеорологічних спостережень є інформативними для прогнозу туману і суцільної низької хмарності, тому подальший напрямок роботи буде пов'язаний з оцінкою інформативності наземних спостережень як предикторів наявності/відсутності туману/низької суцільної хмарності.

#### Список використаної літератури

1. Alaoui, B. Analog Ensemble Forecasting System for Low-Visibility Conditions over the Main Airports of Morocco [Text] / B. Alaoui, D. Bari, T. Bergot, Y. Ghabbar // *Atmosphere*, 2022. – Vol. 13, 1704. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13101704>
2. Andrew J. Fatal weather-related general aviation accidents in the United States [Text] / J. Andrew, S. Walker // *Physical Geography*, 2016. – Vol. 37:5. – Pp. 291 - 312. DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1211854>
3. Driss B. Fog Decision Support Systems: A Review of the Current Perspectives [Text] / B. Driss, T. Bergot, R. Tardif // *Atmosphere*, 2023. – Vol. 14, No. 8, 1314. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14081314>

4. Bergot, T. *Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog States* [Text] / E. Terradellas, J. Cuxart, A. Mira, O. Liechti, M. Mueller, N. W. Nielsen // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007. - Vol. 46(4). - Pp. 504-521. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2475.1>
5. Burrows W. R. *Automated fog and stratus forecasts from the Canadian RDPSooperational NWP model* (p. 33) *Perspectives* [Text] / W. R. Burrows, G. Toth // *Extended Abstracts, 24th conference on weather and fore-casting*, 23-27 January, 2011, Seattle, WA. American Meteor Society, Ltd. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.4852.0648>
6. Cermak, J. *Dynamical nighttime fog/low stratus detection based on Meteosat SEVIRI data: A feasibility study* [Text] / J. Cermak, J. Bendix // *Pure Appl. Geophys.*, 2007. - Vol. 164. - Pp. 1179-1192. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8419-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8419-7_5)
7. Chachere, C.N. *Numerical simulations of an inversion fog event in the Salt Lake Valley during the MATERHORN-fog field campaign* [Text] / C.N. Chachere, Z. Pu // *Pure and Applied Geophysics*, 2019. - Vol. 176(5). - Pp. 2139-2164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1770-8>
8. Cotton, W. R. *Storm and cloud dynamics* [Text] / W. R. Cotton, R. A. Anthes // *Academic press*, 1989. - Inc, New York.
9. Dupont, J. C. *Stratus-fog formation and dissipation: a 6-day case study* [Text] / J. C. Dupont, M. Haeffelin, A. Protat, D. Bounil, N. Boyouk, Y. Morille // *Boundary-Layer Meteorol*, 2012. - Vol. 143. - Pp. 207-225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9699-4>
10. Elias, T. *Particulate contribution to extinction of visible radiation: pollution, haze, and fog* [Text] / T. Elias, M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J. C. Raut, M. Colomb // *Atmos Res*, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.006>
11. Glickman, T. *Glossary of Meteorology* [Text] / T. Glickman // 2nd ed. Amer. Meteor. Soc. Ed., 2000. - Pp. 855. <http://glossary.ametsoc.org/> (Accessed on 22.10.2023).
12. Gultepe, I. *A meteorological supersite for aviation and cold weather applications* [Text] / I. Gultepe, Agelin-Chaab, M., Komar, J., Elfstrom, G., Boudala, F., B. Zhou // *Pure Applied Geophysics*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1880-3>
13. Gultepe, I. *The Fog Remote Sensing and Modelling Field Project* [Text] / I. Gultepe, G. Pearson, J. A. Milbrandt, B. Hansen, S. Platnick, P. Taylor, M. Gordon, J. P. Oakley, S. G. Cober // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2009. - Vol. 90. - Pp. 341-360. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2354.1>
14. Gultepe, I. *A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology* [Text] / I. Gultepe, R. Sharman, P.D. Williams // *Pure Appl. Geophys.*, 2019. - Vol. 176. - Pp. 1869-1921. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>
15. Gultepe, I. *Fog research: a review of past achievements and future perspectives* [Text] / I. Gultepe, R. Tardif, S. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, M.D. Muller, M. Pagowski, B. Hansen, G. Ellrod, W. Jacobs, G. Toth, S.G. Cober // *Pure and Applied Geophysics*, 2007. - Vol. 164(6-7). - Pp. 1121-1159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>
16. Henry, A. J. *Aviation Weather Hazards* [Text] / A. J. Henry // *Mon. Wea. Rev.*, 1930. - Vol. 58. - Pp. 231-234.
17. Humphreys, W. J. *Meteorology and its importance to aviation* [Text] / W. J. Humphreys // *Monthly Weather Review*, 1930. - Vol. 58. - Pp. 196-197. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1930\)58<196:MAHTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1930)58<196:MAHTA>2.0.CO;2)
18. Jacobs, A. J. *Numerical guidance methods for 3301 decision support in aviation meteorological forecasting* [Text] / A. J. Jacobs, N. Maat // *Weather 3302 Forecasting*, 2005. - Vol. 20. - Pp. 82-100. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-827.1>
19. Koglbauer, I. V. *The Role of Simulator Scenarios in Learning Low Visibility Procedures in Flight* [Text] / I. V. Koglbauer, M. Seidl, R. Braunstingl, M. Riesel, C. Baciu // In I. Albulescu, & C. Stan (Eds.), *Education, Reflection, Development - ERD 2022*. - Vol. 6. - *European Proceedings of Educational Sciences*. - Pp. 271-279. DOI: <https://doi.org/10.15405/epes.23056.25>
20. Kulkarni, R. *Loss to aviation economy due to winter fog in New Delhi during the winter of 2011-2016* [Text] / R. Kulkarni, R.K. Jenamani, P. Pithani, M. Konwar, N. Nigam, S.D. Ghude // *Atmosphere*, 2019. - Vol. 10(4). - Pp. 198. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10040198>
21. Lakra K. *A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts* [Text] / K. Lakra, K. Avishek // *Rend Lincei Sci Fis Nat.*, 2022. - Vol. 33(2). - Pp. 319-353. - Epub 2022 Mar 14. PMID: 35309246; PMCID: PMC8918085. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>
22. Matveev, L.T. *Statistical Data of Clouds and Cloud Behavior* [Text] / L.T. Matveev // In: *Cloud Dynamics. Atmospheric Sciences Library*, 1984. - Vol. 2. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6360-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6360-3_9)
23. National Transportation Safety Board. 2005. *Risk Factors Associated with Weather-Related General Aviation Accidents. Safety Study NTSB/SS-05/01*. Washington, DC.
24. Niu, S. *Fog research in China: an overview* [Text] / S. Niu, C. Lu, H. Yu, L. Zhao, J. Lu. // *Adv Atmos Sci*, 2010. - Vol. 27(3). - Pp. 639-662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8174-8>
25. NTSB *Review of Low Ceiling/Visibility Accidents*. July 2022. [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/1-eick-low-cig-vis-abbreviated\\_0.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/1-eick-low-cig-vis-abbreviated_0.pdf)
26. Ounda, K. *Fog and low level stratus forecasting using satellite products* [Text] / K. Ounda, V. Ongoma // *A case study of Jomo Kenyatta International Airport, Kenya Pakistan, J. Meteorol*, 2015. - Vol. 11. - Pp. 49-56.
27. Petersen, S. *Weather Analysis and Forecasting, Vol. 1 and 2*. [Text] / S. Petersen // McGraw-Hill, New York, Toronto, London, 1956.
28. Pithani, P. *WRF model sensitivity to choice of PBL and microphysics parameterization for an advection fog event at Barkachha, rural site in the Indo-Gangetic Basin, India* [Text] / P. Pithani, S.D. Ghude, T. Prabhakaran, A. Karipot,



- A. Hazra, R. Kulkarni, S. Chowdhuri, E. Resmi, M. Konwar, P. Murugavel, P. Safai, D. Chate, Y. Tiwari, R. Jenamani, M. Rajeevan // *Theoretical and Applied Climatology*, 2019b. – Vol. 136(3-4). – Pp. 1099-1113. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2530-5>
29. Ribaud, J. F. PARAFOG v2.0: a near-real-time decision tool to support nowcasting fog formation events at local scales [Text] / J. F. Ribaud, M. Haeffelin, J. C. Dupont, M. A. Drouin, F. Toledo, S. Kotthaus // *Atmos. Meas. Tech.*, 2021. – Vol. 14. – Pp. 7893-7907. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-14-7893-2021>
30. Román Cascón, C. Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau [Text] / Cascón, C. Román, C. Yagüe, M. Sastre, G. Maqueda, F. Salamanca, S. Viana Jiménez // *Advances in Science and Research*, 2012. – Vol. 8. – Pp. 11-18. DOI: <https://doi.org/10.5194/asr-8-11-2012>
31. Roquelaure, S. Contributions from a Local Ensemble Prediction System (LEPS) for improving fog and low cloud forecasts at airports [Text] / S. Roquelaure, T. Bergot // *Weather and Forecasting*, 2009. – Vol. 24(1). – Pp. 39-52. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222124.1>
32. Stolaki, S. A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBEL model over Thessaloniki airport, Greece [Text] / S. Stolaki, I. Pytharoulis, T. Karacostas // *Pure and Applied Geophysics*, 2012. – Vol. 169 (5-6). – Pp. 961-981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0393-0>
33. Tardif, R. Event-based climatology and typology of fog in the New York City region [Text] / R. Tardif, R. M. Rasmussen // *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2007. № 46. – Pp. 1141-1168. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>
34. Warren, S. G. A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from surface observations, 1971-1996 [Text] / S. G. Warren, R. Eastman, C. J. Hahn // *J. Climate*, 2007. – Vol. 20. – Pp. 717-738. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI4031.1>
35. Westerhuis S. Identifying the key challenges for fog and low stratus forecasting in complex terrain [Text] / S. Westerhuis, O. Fuhrer, J. Cermak, W. Eugster // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. – Vol. 146 (732). – Pp. 3347-3367. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3849>
36. Willett. Fog and haze, their causes, distribution and forecasting // *Mon. Wea. Rev.*, 1928. – №. 56. – Pp. 435-468. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1928\)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1928)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2)
37. WMO (World Meteorological Organization), *International Cloud Atlas*. <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>. Accessed 15 Jan 2022.
38. World Meteorological Organization (WMO) // *International Meteorological Vocabulary*, 1992. – WMO 182. – Pp. 782.
39. Zhou, B. Fog Prediction from a Multimodel Mesoscale Ensemble Prediction System [Text] / B. Zhou, J. Du // *Weather and Forecasting*, 2010. – Vol. 25(1). – Pp. 303-322. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222289.1>
40. Архів метеорологічних даних спостережень в кодах METAR/SPECI <http://rp5.ua/> Дата звернення 12.11.22.
41. Івус Г.П. Авіаційна метеорологія та кліматологія [Текст] / Г.П. Івус, А.Б. Семергей-Чумаченко // Конспект лекцій, 2007. – Одеса. – С. 201.
42. Наказ про затвердження Авіаційних правил України "Метеорологічне обслуговування цивільної авіації" від 05 вересня 2017 р. за N 1092/30960.

**Внесок авторів:** всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

## Fog and low-level stratus characteristics at the airport of Odesa from surface observations

**Oleksiy Hustenko**<sup>1</sup>

PhD student,<sup>1</sup> Odesa State Environmental University, St. Lvivska, 15, Odesa, 65016, Ukraine;

**Inna Khomenko**<sup>1</sup>

PhD (Geography), Associate Professor

### ABSTRACT

**Introduction.** Fog that limits visibility and low-level stratus represent a significant hazard to aviation especially during takeoff and landing, and also low-level flying of aircrafts, because accidents often occur in reduced visibility conditions and low clouds. Therefore, forecasting fog and low ceilings is one of the most important, but at the same time the most difficult issue, because both phenomena strongly depend on local conditions and unsteady in both time and space.

**The aim of the study** is to obtain the statistical characteristics of low-level stratus and fog at the airport of Odesa and determine local dependencies that would enable to improve aviation weather forecasts related to low-level stratus and fog physics.

**Scientific novelty of results obtained.** In this study for the Ukraine for the first time for Odesa airport frequency distribution of low-level stratus and fogs is obtained as a function of the time of the day and the month of the year and also as a function of the temperature and relative humidity near the surface.

**Practical importance of results obtained.** The results obtained could be used for providing weather forecast model with historical data and improving forecast of fogs and low-level stratus.

**Materials and method.** To study fog and low-level stratus characteristics occurring at the airport of Odesa, Ukraine, half hourly observations in the period of 2010-2021 are used. Applying a statistical approach annual, seasonal and diurnal distribution of fog and low stratus and their frequency distribution associated with various meteorological parameters are obtained.

**Results and discussion.** The monthly distributions of low-level stratus reveal maximum occurrence frequencies in November and January, and fog most frequently occurs in December. No significant diurnal cycle of stratiform cloud occurrence is discovered, as opposed to fog for which the highest frequency is observed in the hours before sunrise, while when the day sets in, frequencies are declining and increasing at night. Fog and low-level stratus have the same distribution in duration and the mean event duration is 4.5 h while 55% of the events lasted 2 h or less. The most long-lived fog and stratiform clouds can last about 4 days during the December-January period. Occurrence of fog and stratiform clouds as function of temperature and relative humidity reveals a close statistical relationship, especially for fog events. More than 33% of all fogs are observed at temperatures of 0°C to 6°C and 96-100% relative humidity, the most frequencies of low-level clouds (13%) occur in the same temperature interval, but at lower values of relative humidity (91-95%). Regarding fog density 75% of the events have minimum visibility lower than 400 m, which indicates the severity of the problem, because, despite the season and type of fog, they are usually quite intense and dense. In all seasons of the year, the highest frequency of low-level stratiform clouds is in interval of 3...4 m/s, excluding summer, when most often such cloud is registered at higher speeds. The wind directions associated with low-level stratiform clouds are, as a rule, northern and eastern ones. Fogs, on the contrary, most often in all seasons, except winter, are formed at calm, meaning that radiation fogs are the most common type in the Odesa airport. In winter fogs are most commonly associated with northern and easterly winds; in all other seasons the southern wind is the most frequent.

**Keywords:** fog, overcast low-level stratiform clouds, physical-statistical analysis, Odesa, METAR/SPECI, SYNOP

### References

1. Alaoui, B., Bari, D., Bergot, T., & Ghabbar, Y. (2022). Analog Ensemble Forecasting System for Low-Visibility Conditions over the Main Airports of Morocco. *Atmosphere*, 13(10), 1704. <https://doi.org/10.3390/atmos13101704>
2. Andrew J., Fultz & Walker S. Ashley (2016). Fatal weather-related general aviation accidents in the United States, *Physical Geography*, 37:5, 291-312, <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1211854>
3. Bari, D., Bergot, T., & Tardif, R. (2023). Fog Decision Support Systems: A Review of the Current Perspectives. *Atmosphere*, 14(8), 1314. <https://doi.org/10.3390/atmos14081314>
4. Bergot, T., Terradellas, E., Cuxart, J., Mira, A., Liechti, O., Mueller, M. and Nielsen, N.W. (2007). Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 504–521. <https://doi.org/10.1175/JAM2475.1>
5. Burrows, W. R., & Toth, G. (2011). Automated fog and stratus forecasts from the Canadian RDPS operational NWP model (p. 33). *Extended Abstracts, 24th Conference on Weather and Forecasting, 23–27 January, 2011, Seattle, WA. American Meteor. Society, Ltd.* <https://doi.org/10.13140/2.1.4852.0648>
6. Cermak, J.; Bendix, J. (2007). Dynamical Nighttime Fog/Low Stratus Detection Based on Meteosat SEVIRI Data: A Feasibility Study. *Pure appl. geophys.* 164, 1179–1192. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8419-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8419-7_5)
7. Chachere, C.N. and Pu, Z. (2019). Numerical simulations of an inversion fog event in the Salt Lake Valley during the MATERHORN-fog field campaign. *Pure and Applied Geophysics*, 176(5), 2139–2164. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1770-8>
8. Cotton, W. R., and R. A. Anthes, (1989). *Storm and cloud dynamics*. Academic press, Inc, New York.
9. Dupont, J.C., Haeffelin, M., Protat, A. et al. (2012). Stratus–Fog Formation and Dissipation: A 6-Day Case Study. *Boundary-Layer Meteorol* 143, 207–225 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9699-4>
10. Elias, T., M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J. C. Raut, and M. Colomb (2009). Particulate contribution to extinction of visible radiation: pollution, haze, and fog. *Atmos Res.* <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.006>
11. Glickman, T., Ed. (2000). *Glossary of Meteorology*. 2nd ed. Amer. Meteor. Soc., 855. <http://glossary.ametsoc.org/>. (Accessed on 22.10.2023).
12. Gultepe, I., Agelin-Chaab, M., Komar, J., Elfstrom, G., Boudala, F., & Zhou, B. (2019). A meteorological supersite for aviation and cold weather applications. *Pure Applied Geophysics* 176, 1977–2015/ <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1880-3>
13. Gultepe, I., Pearson, G., Milbrandt, J. A., Hansen, B., Platnick, S., Taylor, P., Gordon, M., Oakley, J. P., and Cober, S. G. (2009). The Fog Remote Sensing and Modelling Field Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 341–360. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2354.1>
14. Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P.D. et al. (2019). A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869–1921. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>
15. 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.
16. Henry, A. J., (1930). *Aviation Weather Hazards*. *Mon. Wea. Rev.*, 58, 231-234.
17. Humphreys, W. J. (1930). *Meteorology and its importance to aviation*. *Monthly Weather Review*, 58, 196–197. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1930\)58%3C196:MAIITA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1930)58%3C196:MAIITA%3E2.0.CO;2)



18. Jacobs, A. J., & Maat, N. (2005). Numerical guidance methods for 3301 decision support in aviation meteorological forecasting. *Weather 3302 Forecasting*, 20, 82–100. <https://doi.org/10.1175/WAF-827.1>
19. Koglbauer, I. V., Seidl, M., Braunstingl, R., Riesel, M., & Baciu, C. (2023). The Role of Simulator Scenarios in Learning Low Visibility Procedures in Flight. In I. Albulescu, & C. Stan (Eds.), *Education, Reflection, Development – ERD 2022*, 6. *European Proceedings of Educational Sciences* (271-279). European Publisher. <https://doi.org/10.15405/epes.23056.25>
20. Kulkarni, R., Jenamani, R.K., Pithani, P., Konwar, M., Nigam, N. and Ghude, S.D. (2019). Loss to aviation economy due to winter fog in New Delhi during the winter of 2011–2016. *Atmosphere*, 10(4), 198. <https://doi.org/10.3390/atmos10040198>
21. Lakra K, Avishek K. (2022). A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rend Lincei Sci Fis Nat*;33 (2):319-353. Epub 2022 Mar 14. PMID: 35309246; PMCID: PMC8918085. doi: <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>
22. Matveev, L.T. (1984). *Statistical Data of Clouds and Cloud Behavior*. In: *Cloud Dynamics. Atmospheric Sciences Library*, vol 2. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6360-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6360-3_9)
23. National Transportation Safety Board (2005). *Risk Factors Associated with Weather-Related General Aviation Accidents*. Safety Study NTSB/SS-05/01. Washington, DC.
24. Niu, S., C. Lu, H. Yu, L. Zhao, J. Lu (2010). Fog research in China: an overview. *Adv Atmos Sci*, 27(3), 639 – 662. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8174-8>
25. NTSB Review of Low Ceiling/Visibility Accidents. July 2022. [https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/1-eick-low-cig-vis-abbreviated\\_0.pdf](https://ral.ucar.edu/sites/default/files/docs/1-eick-low-cig-vis-abbreviated_0.pdf)
26. Ounda, K., V. Ongoma, (2015). Fog and low level stratus forecasting using satelliteproducts; A case study of Jomo Kenyatta International Airport, KenyaPakistan, *J. Meteorol.* 11 (2015), 49-56.
27. Petersen, S., (1956). *Weather Analysis and Forecasting, Vol. 1 and 2*. McGraw-Hill, New York, Toronto, London.
28. Pithani, P., Ghude, S.D., Prabhakaran, T., Karipot, A., Hazra, A., Kulkarni, R., Chowdhuri, S., Resmi, E., Konwar, M., Murugavel, P., Safai P., Chate D., Tiwari Y., Jenamani R. and Rajeevan M. (2019). WRF model sensitivity to choice of PBL and microphysics parameterization for an advection fog event at Barkachha, rural site in the Indo-Gangetic Basin, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3-4), 1099–1113. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2530-5>
29. Ribaud, J.-F., Haeffelin, M., Dupont, J.-C., Drouin, M.-A., Toledo, F., and Kotthaus, S. (2021). PARAFOG v2.0: a near-real-time decision tool to support nowcasting fog formation events at local scales, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 7893–7907, <https://doi.org/10.5194/amt-14-7893-2021>.
30. Román Cascón, C., Yagüe, C., Sastre, M., Maqueda, G., Salamanca, F. and Viana Jiménez, S. (2012). Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau. *Advances in Science and Research*, 8, 11–18. <https://doi.org/10.5194/asr-8-11-2012>
31. Roquelaure, S. and Bergot, T. (2009). Contributions from a Local Ensemble Prediction System (LEPS) for improving fog and low cloud forecasts at airports. *Weather and Forecasting*, 24(1), 39–52. <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222124.1>
32. Stolaki, S., Pytharoulis, I. and Karacostas, T. (2012). A study of fog characteristics using a coupled WRF–COBEL model over Thessaloniki airport, Greece. *Pure and Applied Geophysics*, 169(5-6), 961–981. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0393-0>
33. Tardif, R., and R. M. Rasmussen, (2007). Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 46, 1141–1168. <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>
34. Warren, S. G., R. Eastman, and C. J. Hahn, (2007). A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from surface observations, 1971–1996. *J. Climate*, 20, 717–738, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI4031.1>
35. Westerhuis S., O. Fuhrer, J. Cermak, W. Eugster, (2020). Identifying the key challenges for fog and low stratus forecasting in complex terrain *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146 (732) (2020), 3347-3367. <https://doi.org/10.1002/qj.3849>
36. Willett, (1928). Fog and haze, their causes, distribution and forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 56, 435-468. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1928\)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1928)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2)
37. WMO (World Meteorological Organization), *International Cloud Atlas*. <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>. Accessed 15 Jan 2022.
38. World Meteorological Organization (WMO), 1992: *International Meteorological Vocabulary*, WMO 182, 782.
39. Zhou, B., & Du, J. (2010). Fog Prediction from a Multimodel Mesoscale Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 25(1), 303-322. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222289.1>
40. Archived Metar Observations. <http://rp5.ua/> Access date 11/12/22.
41. Ivus G.P., Semerhei-Chumachenko A.B. (2007). *Aviation meteorology and climatology: Lecture notes*. Odessa., 201.
42. Order on the approval of flight rules of aviation in the airspace of Ukraine “Meteorological services for civil aviation” dated 05 June 2017. for N 1092/30960.

**Authors Contribution:** All authors have contributed equally to this work

Received 23 October 2023  
Accepted 26 November 2023