

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий
гідрометеорологічний інститут
Кафедра метеорології та кліматології

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: Сучасні методи прогнозу дальності видимості

Виконав студент 2 курсу групи МЗМ-21
Спеціальності 103 «Науки про Землю»
Освітня програма
«Метеорологія і кліматологія»
Маклигіна Тетяна Ігорівна

Керівник канд. геогр. наук, доцент
Прокоф'єв Олег Милославович

Рецензент д-р геогр. наук, доцент
Овчарук Валерія Анатоліївна

Одеса 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий гідрометеорологічний інститут

Кафедра Метеорології та кліматології

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 103 "Науки про Землю"

(шифр і назва)

Освітня програма Метеорологія і кліматологія

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

метеорології та кліматології

Прокоф'єв О.М.

" 10 " жовтня 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

студенту(ці) Маклигіній Тетяні Ігорівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Сучасні методи прогнозу дальності видимості

Керівник роботи Прокоф'єв Олег Милославович, канд. геогр. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ОДЕКУ від "30" вересня 2022 року № 166-С

2. Строк подання студентом роботи 17 листопада 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи *В якості вихідного матеріалу в роботі використані дані з телеграм METAR сайту метеорологічного сервісу gr.5 щодо випадків з туманами на АМСЦ Київ (Жуляни) за період з січня 2012 по грудень 2021 року.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Розрахувати та проаналізувати повторюваності видимості різних градацій.

2. Дослідити типізацію синоптичних процесів виникнення низької видимості.

3. Розрахувати та проаналізувати повторюваності різних типів ЕЦМ по градаціях туману.

4. Розрахувати та проаналізувати дальність видимості за трьома напівемпіричними методами, перевірити на їх справджуваність та попередженість.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Гістограми повторюваності типів ЕЦМ (%) для градації 501-1000 м, 401-500 м, 301-400 м, 201-300 м, 100-200 м, <50 м за 2012-2019 рр. Номограма для визначення нічного зниження температури при ясному небі. Номограма для визначення нічного зниження температури з урахуванням хмарності й вітру.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	немає		

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Отримання завдання	10.10.2022 р.	-	-
2	Збір вихідних даних до роботи. Ознайомлення з літературними джерелами за темою кваліфікаційної роботи бакалавра.	11.10.2022 р. - 23.10.2022 р.	100	відмінно
3.	Вивчення регіональним кліматичним особливостей досліджуваного району: своєрідності підстильної поверхні, загальна характеристика атмосферної циркуляції, особливості температурного режиму.	24.10.2022 р. - 02.11.2022 р.	96	відмінно
4.	Рубіжна атестація	01.11.2022 р. - 05.11.2022 р.	98	відмінно
5.	Розрахунок та аналіз повторюваності різних типів ЕЦМ по градаціях туману.	03.11.2022р. - 08.11.2022 р.	97	відмінно
6.	Розрахунок дальність видимості за трьома напівемпіричними методами, аналіз отриманих результатів, перевірка їх справджуваності та попередженості.	09.11.2022 р. - 16.11.2022 р.	97	відмінно
7.	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення остаточної електронної версії роботи та передача її на процедуру встановлення ступеня оригінальності, відсутності ознак плагіату.	17.11.2022 р.	100	відмінно
8.	Перевірка роботи на плагіат, складення протоколу і висновку керівника. Підписання авторського договору.	18-20.11.2022	-	-
9.	Підготовка презентаційного матеріалу	-	-	-
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)	-	98	відмінно

Студент Маклигіна Т. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Прокоф'єв О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи магістра "Сучасні методи прогнозу дальності видимості"

Автор: Маклигіна Тетяна Ігорівна

Актуальність. Актуальність обраної тематики обумовлена тим, що видимість впливає на можливість та успішність виконання різного роду завдань. Аналіз повторюваностей різних градацій видимості та методів її прогнозування допоможе більш успішно проводити метеорологічне забезпечення польотів та надасть змогу визначити які циркуляційні механізми притаманні для даної території.

Мета дослідження – визначення умов формування погіршеної видимості у районі аеропорту Київ (Жуляни) за період з 2012-2021 рр.

Відповідно до поставленої мети було розв'язано такі **задачі:**

- розрахунок повторюваності видимості різних градацій;
 - типізація синоптичних процесів виникнення низької видимості;
 - розрахунок повторюваності різних типів ЕЦМ по градаціях туману.
 - розрахунок видимості за трьома напівемпіричними методами;
 - перевірка на справджуваність та попередженість;
 - розрахунок критеріїв М.О. Багрова та О.М. Обухова.
- **Об'єкт дослідження:** метеорологічна дальність видимості.

Предмет дослідження: напівемпіричні методи прогнозу метеорологічної дальності видимості.

Методи дослідження: методи багатовимірного статистичного аналізу, методи дослідження випадкових функцій, методи просторового узагальнення.

Наукова новизна отриманих результатів. Адаптація для території України методів розрахунку метеорологічної дальності видимості (прогнозу туману) провідних метеорологічних організацій світу.

Практичне значення отриманих результатів. Завдяки проведеному дослідженню виявлено, які з методів прогнозу туману провідних метеорологічних організацій світу можуть застосовуватись для території України (на прикладі аеропорту Київ (Жуляни)).

Структура і обсяг роботи: магістерська робота в обсязі 55 сторінок складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань з 30 джерел і містить 14 рисунків та 5 таблиць.

Перелік ключових слів: метеорологічна дальність видимості, туман, прогноз, напівемпіричні методи, справджуваність.

ANNOTATION

Theme of the master's qualification work "Modern methods of visibility range forecast"

Author: Makligina Tetyana

Relevance. The relevance of the chosen topic is due to the fact that visibility affects the possibility and success of various types of tasks. An analysis of the repeatability of different gradations of visibility and methods of its forecasting will help to more successfully conduct meteorological support of flights and make it possible to determine which circulation mechanisms are inherent in a given territory.

The purpose of the study – determination of the conditions for the formation of impaired visibility in the area of the Kyiv (Zhulyany) airport for the period from 2012 to 2021.

The following objectives have been achieved in accordance with **the objective:**

- calculation of the repeatability of the visibility of different gradations;
- typification of synoptic processes of the occurrence of low visibility;
- calculation of repeatability of different types of ECM according to gradations of fog.
- visibility calculation using three semi-empirical methods;
- verification of authenticity and warning;
- calculation of the criteria of M.O. Bagrova and O.M. Obukhov

Object of study: meteorological visibility range.

Subject of study: semi-empirical methods of meteorological visibility range forecast.

Research methods: methods of multivariate statistical analysis, methods of studying random functions, methods of spatial generalization.

The scientific novelty of the obtained results. Adaptation for the territory of Ukraine of the methods of calculating the meteorological range of visibility (fog forecast) of the world's leading meteorological organizations.

Practical value of the obtained results. Thanks to the conducted research, it was found which of the fog forecasting methods of the world's leading meteorological organizations can be used for the territory of Ukraine (using the example of Kyiv (Zhulyany) airport).

Structure and scope of work: the master's thesis in the amount of 55 pages consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of references from 30 sources and contains 14 figures and 5 tables.

List of keywords: meteorological visibility range, fog, forecast, semi-empirical methods, verifiability.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИДИМІСТЬ.....	8
1.1 Фактори, що впливають на видимість.....	8
1.2 Умови спостереження за видимістю	10
1.3 Метеорологічна і польотна дальність видимості	15
2 ТУМАНИ ТА УМОВИ ЇХ УТВОРЕННЯ	21
2.1 Характеристики туманів	21
2.2 Класифікація туманів	23
2.3 Погіршення видимості в тумані.....	29
3 УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОГІРШЕНОЇ ВИДИМОСТІ У РАЙОНІ АЕРОПОРТУ "КИЇВ» (ЖУЛЯНИ)	31
3.1 Фізико-географічний опис аеропорту Жуляни.....	31
3.2 Повторюваність туманів, які обмежували видимість на станції АМСЦ Жуляни в 2012-2021 рр.	33
3.3 Типові синоптичні умови виникнення низької видимості в аеропорту Жуляни	34
4 МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИДИМОСТІ	42
4.1 Основні сучасні методи прогнозу видимості	42
4.2 Порівняльний аналіз декількох чисельних методів прогнозування дальності видимості.....	46
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	53

ВСТУП

Тумани викликають серйозні труднощі в роботі авіації, оскільки погіршують видимість до таких граничних значень, які часто навіть унеможливають зліт і посадку.

Актуальність обраної тематики обумовлена тим, що видимість впливає на можливість та успішність виконання різного роду завдань. Аналіз повторюваностей різних градацій видимості, методів прогнозування видимості, а також ЕЦМ допоможе більш успішно проводити метеорологічне забезпечення польотів та надасть змогу визначити які циркуляційні механізми притаманні для даної території.

Мета: визначення умов формування погіршеної видимості у районі аеропорту Київ (Жуляни) за період з 2012-2021 рр.

Завдання, що вирішувались у рамках дослідження для досягнення мети:

- обробка статистичних даних фактичної погоди;
- розрахунок повторюваності видимості різних градацій;
- типізація синоптичних процесів виникнення низької видимості;
- розрахунок повторюваності різних типів ЕЦМ по градаціях туману.
- розрахунок видимості за трьома напівемпіричними методами;
- перевірка на справджуваність та попередженість;
- розрахунок критеріїв М.О. Багрова та О.М. Обухова.

Дипломна робота містить вступ та 4 розділи, висновки та перелік джерел посилання, який складається з 30 джерел. У першому розділі описуються загальні відомості про видимість, її види, фактори, що впливають та умови спостереження. У другому розділі йдеться про тумани, їх класифікацію,

характеристики, синоптичні та метеорологічні умови утворення, а також про погіршення видимості в тумані. Третій розділ присвячений результатам розрахунків повторюваності туманів та повторюваності різних типів циркуляції атмосфери. В четвертому розділі описано сучасні методи прогнозу видимості та проведено порівняння декількох із них.

В якості вихідного матеріалу в роботі використані дані з телеграм METAR сайту метеорологічного сервісу гр. 5 [26] щодо випадків з туманами на АМСЦ Київ (Жуляни) за період з січня 2012 по грудень 2021 року.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИДИМІСТЬ

1.1 Фактори, що впливають на видимість

Видимість - це складне психофізичне явище, тісно пов'язане із чинниками зору людини. На оцінку видимості впливають зміни індивідуальної здатності, що сприймає і інтерпретує, а також характеристики джерела світла і коефіцієнти пропускання атмосфери. Таким чином, будь-яка візуальна оцінка видимості має суб'єктивний характер. У той час як спостереження людини за видимістю у денний час можна вважати якісними, визначати та контролювати видимість у нічний час важко, оскільки це значною мірою залежить від вибору освітлених орієнтирів для визначення видимості та фонові освітленості. Можна визначати та оцінювати видимість у темний час доби в одиницях еквівалентної видимості у світлий час доби, щоб виключити можливість виникнення похибок при оцінці видимості на світанку та у сутінках. Перевага цієї концепції полягає у тому, що для задоволення метеорологічних потреб у аналізі повітряних мас і т. д. вона дозволяє для вимірювання видимості використовувати прилади. Однак така практика не завжди відповідає вимогам користувачів авіації, і для задоволення їх спеціальних потреб потрібні інші визначення.

Оцінка дальності видимості залежить від наступних факторів:

- a) фотометричні та розмірні характеристики об'єкта, який візуально сприймається або повинен сприйматися;
- b) умови візуального сприйняття, включаючи вплив зовнішнього освітлення та місцезнаходження спостерігача;

с) оптичний стан атмосфери між об'єктом та спостерігачем.

Фактор «а» можна контролювати за допомогою ретельного відбору об'єктів, що підлягають сприйняттю, в той час як фактор «b» можна покращити шляхом ретельного відбору місця для спостерігача. Особливу увагу слід звертати на те, щоб не було відблисків прожекторів у зонах паркування та пересування літаків. Лише чинник «с» безпосередньо залежить від метеорологічних умов. Відповідно, дуже важливо, щоб цей основний параметр, що відноситься до концепції видимості, відображав оптичний стан атмосфери об'єктивним чином.

При плануванні системи спостережень необхідно передбачати на додаток до візуальних спостережень систему інструментальних спостережень. Приймаючи рішення з цього приводу, у тому числі й рішення про те, чи потрібно кілька датчиків, слід враховувати місцеві кліматичні умови, розмір та топографію аеродрому, а також види та кількість польотів.

В якості датчиків для вимірювання видимості слід використовувати трансмісометри та/або вимірювачі дальності видимості прямого розсіювання. Слід зазначити, що дані з датчиків забезпечуватимуть миттєвий знімок, що відобразатиме видимість у межах порівняно невеликої території і, отже, не зможе повною мірою відобразити видимість на всій злітно-посадковій смузі або в усьому аеропорту, особливо в умовах змінної видимості. Таким чином, користувачам даних повністю автоматизованих спостережень необхідно враховувати потенційні просторові варіації. У неавтоматизованих зведеннях дані вимірювачів видимості повинні доповнюватися даними спостережень, які проводять люди [1].

1.2 Умови спостереження за видимістю

На станціях, які входять до системи метеорологічної мережі, спостереження за видимістю здійснюються у комплексі з іншими спостереженнями синхронно в строки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 і 21 UTC.

На аеродромах спостереження за видимістю здійснюються щогодини, під час польотів у складних метеорологічних умовах – через 30 хвилин. Під строком спостереження розуміється 10-хвилинний інтервал часу, що закінчується в точно вказаний термін. Спостереження за видимістю здійснюються візуально на метеорологічному майданчику по орієнтирам, які обрані на місцевості та по приборам. При візуальних спостереженнях рівень очей спостерігача повинен бути на висоті 1,5-6,0 м від поверхні землі. Метеорологи, які здійснюють візуальні спостереження за видимістю, повинні мати гостроту зору 1,0 на кожне око (із корекцією) та щорічно проходити перевірку зору [2].

У випадку неодноразової розбіжності значень видимості, які отримані по прибору і візуально, за її величину приймається значення, що отримано візуально, а в приборі усувається несправність.

В даний час не існує інструментальних методів визначення видимості об'єктів в атмосфері [3]. Це пояснюється як винятковою складністю задачі визначення цієї комплексної величини, так і тією обставиною, що саме поняття видимості в залежності від умов спостережень може бути віднесено до різних об'єктів: природних і штучних, несвітлових чи світлових (вогні). Крім того, існує принципова відмінність аеродромних вимірів характеристик видимості від вимірів на мережі гідрометеостанцій (ГМС). Ця відмінність полягає в тому, що льотному і диспетчерському складу необхідна інформація

про видимість визначених об'єктів (ЗПС, орієнтирів, вогнів і т. п.), тоді як основних споживачів інформації, яка надходить з мережі ГМС, цікавлять дані про об'єктивні характеристики стану атмосфери. У зв'язку з цим слід зазначити, що якщо для мережі ГМС прозорість атмосфери (у горизонтальному і вертикальному напрямках) є досить вичерпною характеристикою оптичного стану атмосфери, то для авіації інформації про прозорість атмосфери недостатньо, тому що для здійснення надійного візуального контакту з наземними орієнтирами необхідні дані саме про їхню видимість [4].

На мережах метеостанцій дальність видимості визначається за обраними орієнтирами, відстань до яких раніше була відома чи раніше виміряна. Видимість в світлий час доби приймається рівна відстані від спостерігача до самого віддаленого об'єкта (орієнтира), який ще видно, але ще приймається спостерігачем тільки як сірий силует, без деталей. В якості орієнтирів для світлого часу доби обираються будь-які об'єкти навколо метеостанції, які мають достатні кутові розміри. Об'єкти по кольору та яскравості повинні бути відмінними від фону, на який вони проєктуються. Для зручного спостереження складається схема орієнтирів видимості, на яку наноситься положення метеостанції, обрані орієнтири для оцінки видимості (різні об'єкти) та відстань до них. Для нічних спостережень за видимістю обирають світові орієнтири (вісім – дев'ять вогників), розташовані на різних відстанях від метеостанції. Вогники повинні бути відкритими та білого кольору. В якості світових орієнтирів можуть використовуватися вогники посадкових систем, розташованих паралельно ЗПС. В нічний час видимим рахується вогник, що спостерігається як палаюча точка, а невидимим – вогник, що проглядається як розмита світла пляма. При неоднорідній видимості відмічається її найменше значення. Для забезпечення авіації видимість вимірюється візуально та

інструментально. Існує декілька методів інструментальних спостережень за видимістю – метод трансмісометра, метод спостереження та телевізійний. Метод трансмісометра полягає в тому, що вимірюється коефіцієнт послаблення (або прозорості) на базовій лінії відстанню до 150 м між джерелом світла та фотоприймачем; метеорологічна дальність видимості розраховується за формулою. Даний метод використовується в багатьох країнах. Метод спостерігача складається в наступному: підраховується число вогників або денних маркерів на ЗПС, видимих з місця спостереження навколо ЗПС, після чого це число приймається за дальність видимості на ЗПС. При телевізійному методі на вогники ЗПС або маркери направляють телевізійні камери, встановлені навколо ЗПС. Спостерігач контролює телевізійний приймач на станції спостереження. Регулювання характеристик телевізійної системи дозволяє бачити на телеекрані стільки вогників ЗПС, скільки бачив би спостерігач з місця установки камери. Порівняння результатів вимірювання видимості по приладам з даними по орієнтирам (щіткам) показує, що при видимості менше 3 км вимірні значення МДВ часто нижче тих, що спостерігаються на 20-30%. Приладні вимірювання видимості на ЗПС більш об'єктивні, ніж визначення видимості візуально по орієнтирам. За наявності в аеропорті посадкової системи для вимірювання видимості використовують вогні високої інтенсивності (ВВІ). Вони бувають без розсіювачів та з розсіювачами. Вогні без розсіювачів мають вузький пучок світла з максимальною інтенсивністю в напрямленні оптичної вісі. Вогні з розсіювачами характеризуються приблизно постійною силою світла в межах кута відхилення від оптичної вісі до 7° . ВВІ мають різну ступінь яскравості. Чим менша видимість, тим більш висока ступінь яскравості використовується для вимірювання видимості. Вогні високої інтенсивності видно краще, чим звичайні вогні. Дальність видимості ВВІ, визначається зі стартового

диспетчерського пункту (СДП), згідно даним спостережень, в 1,5-2 рази менше, ніж з вісі ЗПС. Труднощі визначення дальності видимості ВВІ проходять шляхом по значенням МДВ, отримані за допомогою РДВ. Дальність видимості ВВІ ЗПС розраховується по спеціальних таблицях. При наявності на аеродромі автоматизованих систем вимірювання метеорологічних параметрів розрахунки дальності видимості можуть бути здійснені автоматично (якщо закладена відповідна програма розрахунку).

Прийнятий в нинішній час порядок метеорологічного забезпечення вильотів передбачає, щоб на аеродромах, що мають ВВІ, при видимості 2000 м та менше, крім визначення видимості по приладу, проводився розрахунок дальності видимості ВВІ. Значення дальності видимості ВВІ входить в телеграму про погоду після значення видимості, визначених інструментально або за орієнтирами. У зведеннях METAR, SPECI результати спостережень за видимістю надаються таким чином:

1) у разі використання даних автоматизованої метеорологічної станції вноситься значення переважаючої видимості. У випадку, якщо видимість у різних напрямках є неоднаковою, а мінімальна видимість відрізняється від переважаючої видимості і її значення становить менше 1500 метрів або менше 50 % від значення переважаючої видимості та менше 5000 метрів, то в зведеннях, крім переважаючої видимості, вносяться також мінімальне значення видимості та її основний напрямок відносно аеродрому із зазначенням одного з восьми румбів. Якщо мінімальна видимість спостерігається в кількох напрямках, то вноситься найбільш важливий для забезпечення зльоту (посадки) ПС напрямок. Коли видимість змінюється швидко і визначити переважаючу видимість неможливо, вноситься тільки мінімальне значення видимості без зазначення напрямку;

2) у разі використання даних автономних приладів або візуальних спостережень переважаюча видимість не оцінюється. Вноситься мінімальне значення видимості, виміряне вздовж ЗПС ТЗМ, або мінімальне значення, визначене за схемою орієнтирів видимості, без зазначення напрямку спостереження. Під час візуальних спостережень у сутінках горизонтальна видимість на аеродромі оцінюється як за денними орієнтирами, так і за нічними орієнтирами (вогнями), при цьому до зведень заноситься більше з визначених значень видимості в момент спостереження [5].

Для візуального пошуку аеродромних вогнів основними факторами, що визначають їх видимість оком в середовищі поширення сигналу – атмосфері є:

- контраст об'єкта спостереження з фоном;
- сила світла вогню;
- кутовий розмір поля огляду;
- час пошуку; прозорість атмосфери;
- швидкість об'єкта;
- ймовірність виявлення;
- стан адаптації спостерігача.

Якщо задатися певними значеннями величин, то можна визначити необхідну освітленість у площині зіниці ока, а виходячи з цього за законом обернених квадратів і дистанцію спостереження вогню на якій буде виявлено вогонь. Можна прийти до висновку, що яскравість атмосферного шару залежить від кількості вогнів, що розташовані за конфігурацією світлосигнальної системи, а також яскравості очного середовища. Суттєво також має вплив розсіювання світла, що визначається структурою атмосферного шару [6].

1.3 Метеорологічна і польотна дальність видимості

Під горизонтальною дальністю видимості біля землі, яка визначається метеорологами, розуміється та відстань, на якій ще можна виявити предмет (орієнтир) за формою, кольором, яскравістю. Дальність видимості вимірюється в метрах або кілометрах.

Видимість реальних об'єктів, що визначається з літака, називається польотною видимістю. Вона поділяється на горизонтальну, вертикальну і похилу.

Горизонтальна польотна видимість - це видимість об'єктів в повітрі, що знаходяться приблизно на рівні польоту літака та характеризує умови виявлення різних об'єктів на висоті польоту. Ця видимість, як і вертикальна, оцінюється візуально.

Вертикальна польотна видимість визначається як видимість об'єктів, що розташовані на земній поверхні під кутами, близькими до 90° ; це та максимальна відстань у вертикальному напрямку, з якого видні неосвітлені об'єкти вдень і освітлені об'єкти вночі. Вертикальна видимість вниз часто ототожнюється з висотою нижньої межі хмар, вірніше з тим рівнем, з якого «земля проглядається». Вертикальна видимість вверх прирівнюється до відстані, на якій пілот з кабіни літака бачить різні об'єкти, розташовані над ним (хмари, літальні апарати, що перебувають на більш високих ешелонах і т.д.).

Під похилою польотною видимістю реальних об'єктів розуміється гранична відстань з висоти H , на якій видно даний об'єкт на навколишньому фоні під різними кутами.

Похила видимість дорівнює відстані, на якій видні об'єкти на землі [7, 8]. Ця видимість може бути визначена за часом польоту до обраного

орієнтира. Якщо позначити проекцію відстані (довжини) відповідної похилої видимості на земну поверхню через L , шляхову швидкість літака W , час польоту до орієнтира t і висоту польоту, то:

$$S_{\text{пох}} = \sqrt{((Wt)^2 + H^2)} \quad (1.1)$$

Зазвичай, при $S_{\text{пох}} \geq 5H$ похилу видимість прирівнюють до її проекції на земну поверхню:

$$S_{\text{пох}} = L = Wt. \quad (1.2)$$

Окремим випадком похилої польотної видимості є видимість при заході на посадку, коли об'єктом виявлення є початок злітно-посадкової смуги. При наявності біля землі густого серпанку, туману, хуртовини (поземку) за значення видимості при заході на посадку приймається горизонтальна видимість біля Землі в районі ЗПС.

Польотна видимість - це гранична відстань, на яку з борта літака видно реальний об'єкт на навколишньому фоні.

Польотна похила видимість реальних об'єктів (в тому числі і посадкова) залежить від багатьох чинників, серед яких основними є метеорологічні. Найбільше значення з метеорологічних факторів має прозорість атмосфери за нахилом (похила метеорологічна видимість), яка в свою чергу залежить від висоти і структури нижньої основи хмар, вертикальної потужності підхмарного серпанку і вертикального градієнта її оптичної щільності, а також від горизонтальної видимості у Землі.

При відсутності низької хмарності, приземних серпанків і інших явищ прозорість нижнього шару атмосфери буває досить високою і в першому

наближенні можна вважати, що вона не змінюється з висотою. При цьому значення похилої видимості приблизно дорівнює горизонтальній видимості біля Землі.

При наявності низької хмарності (шаруватих форм) під нею, як правило, спостерігається підхмарний серпанок. Товщина шару підхмарного серпанку досить мінлива і може коливатися від декількох десятків метрів до 100-150 м. Наявність серпанку призводить до того, що похила метеорологічна видимість в підхмарних шарах значно погіршується, і вона, як правило, буває менше горизонтальної видимості біля землі. У зв'язку з цим при визначенні похилої польотної видимості реальних об'єктів при наявності низьких хмар шаруватих форм вирішальну роль відіграє оцінка похилої метеорологічної дальності видимості [9].

При метеорологічному забезпеченні авіації льотний склад цікавить не тільки метеорологічна видимість, а насамперед польотна видимість. Польотна видимість залежить в основному від двох факторів: стану зовнішнього середовища і умов огляду. Якщо припустити, що останній фактор досить постійний, то головною причиною, від якої залежить видимість у польоті, є стан атмосфери [10].

Об'єкти на землі й у повітрі пілот з кабіни літака бачить через скло кабіни під різними кутами. Тому можна розрізнити ряд характеристик видимості (рис. 1.1): видимість вертикальна вниз $S_{В.низ}$, видимість вертикальна угору $S_{В.угору}$, горизонтальна видимість на висоті польоту $S_{Г}$, похила видимість $S_{пох}$ і видимість на ЗПС або посадкова видимість $S_{пос}$.

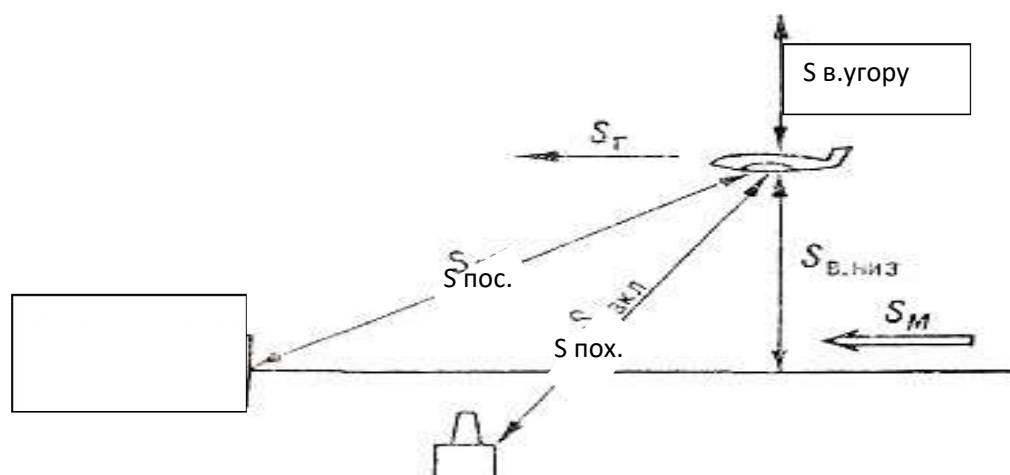


Рисунок 1.1 - Характеристики видимості, використані при метеорологічному забезпеченні польотів

Особливе місце серед всіх характеристик видимості займає посадкова видимість, під якою розуміється гранично велика відстань уздовж глісади зниження, на якому при погіршеній видимості пілот з кабіни літака, що приземляється, може на граничному сприйнятті виявити й пізнати початок ЗПС або пов'язану з нею систему сигнальних вогнів.

Системи сигнальних посадкових вогнів - вогні високої інтенсивності (ОВІ) і вогні малої інтенсивності (ОМІ) - значною мірою сприяють поліпшенню умов видимості при заході на посадку. Ще не побачивши ЗПС, але розріздивши ОВІ або ОМІ, льотчик упевнено «прив'язується» до наземних орієнтирів. Тому сигнальні посадкові вогні він може виявити під кутом, що перевищує кут глісади. [11].

Всі розглянуті вище характеристики видимості не визначаються на АМСЦ. Метеоспостерігач фіксує тільки значення метеорологічної дальності видимості S_M . У практиці забезпечення польотів часто доводиться зіштовхуватися з тим, що посадкова й метеорологічна видимість значно відрізняються одна від одної. На рис. 1.2 наведені приклади різних ситуацій,

коли $S_{\text{пос}} < S_M$ (рис. 1.2 а) і $S_{\text{пос}} > S_M$ (рис. 1.2 б).

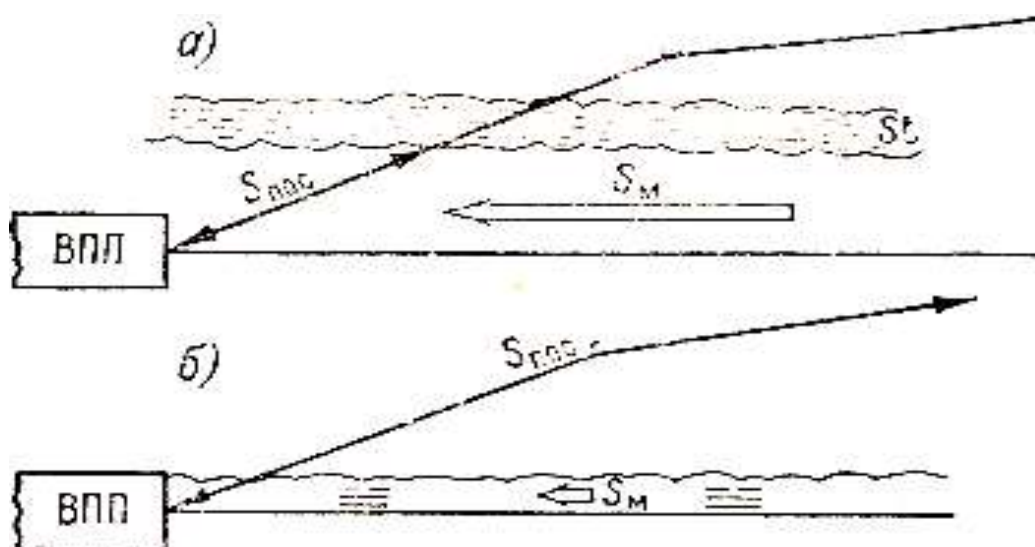


Рисунок 1.2 - Метеорологічні ситуації, що приводять до розходження між посадковою й метеорологічною видимостями. а) $S_{\text{пос}} < S_M$; б) $S_{\text{пос}} > S_M$.

Дійсно, пілот з кабіни літака побачить ЗПС тільки після виходу із хмар (рис. 1.2 а). Тому при низькій хмарності посадкова видимість завжди буде обмежена при будь-якій видимості біля землі. Зворотна картина спостерігається при наявності на аеродромі приземного туману. Метеоспостерігач у даній ситуації (рис. 1.2 б) вкаже видимість менше 1000м, а пілот з кабіни літака буде добре бачити всі наземні орієнтири.

Наведені приклади дозволяють зробити висновки про те, що зв'язок між посадковою та метеорологічною видимістю неоднозначний та досить складний. Посадкова видимість залежить від висоти і структури нижньої межі хмар, структури підхмарного серпанку, від прозорості атмосфери на кінцевій ділянці глісади зниження, а також від світлометричних і фотометричних характеристик ЗПС. Теорія похилої видимості розроблена в цей час слабо,

однак вже отриманий ряд емпіричних і напівемпіричних залежностей посадкової видимості від метеорологічної, з урахуванням конкретних умов[7].

2 ТУМАНИ ТА УМОВИ ЇХ УТВОРЕННЯ

Туман - це видимий аерозоль, що складається з крихітних крапель води або кристалів льоду, підвішених у повітрі на або біля поверхні Землі [12]. Явище називається туманом якщо горизонтальна дальність видимості стає менше 1 км хоча б в одному напрямку. Аналогічне явище при горизонтальній видимості 1 км і більше називають серпанком [13].

Сприятливе синоптичне середовище для туману утворюється, коли вологе повітря біля рівня землі починає конденсуватись. Ця конденсація може утворюватися в атмосфері за допомогою трьох механізмів:

- шляхом підйому та результуючого охолодження повітряної ділянки;
- через радіаційні втрати тепла;
- змішування двох ділянок повітря з різною температурою [14].

2.1 Характеристики туманів

Туманом називають сукупність завислих у повітрі крапель води або кристалів льоду, що призводять до погіршення горизонтальної дальності видимості поблизу від земної поверхні до 1 км і менше. При видимості від 1 до 10 км сукупність завислих крапель або кристалів льоду називається серпанком[12]. Туман - це фактично поверхнева хмара, що має значний вплив на проведення льотних операцій, зокрема посадки та зльоту.

Залежно від агрегатного стану тумани поділяються на:

- 1) Краплино-рідинні тумани, що складаються з крапель води.

- 2) Кристалічні або крижані тумани, що складаються з кристалів льоду.
- 3) Змішані тумани, що складаються з крапель води і кристалів льоду.

Переважаючими за кількістю спостережень є краплино-рідинні і змішані тумани, кристалічні тумани зустрічаються набагато рідше і утворюються при дуже низьких температурах. Краплино-рідинні тумани спостерігаються як при додатних, так і при від'ємних температурах. Мінімальні температури, до яких туман залишається краплино-рідинним коливаються в досить великому діапазоні: від 3 до 28 °С. Утворення краплино-рідинних туманів при більш низькій температурі характеризується наявністю домішок в повітрі. Чим менше домішок, тим при більш низьких температурах може утворитися краплино-рідинний туман. Температури при яких утворюються кристалічні тумани коливаються від -16 до -58 °С, змішані від -11 до -26 °С [17].

Для території України Українським гідрометеорологічним центром (УкрГМЦ) в 2018 році були розроблені критерії для визначення ступеня небезпеки при різних значеннях видимості в тумані, які регламентуються нормативним документом «Настанова з метеорологічного прогнозування» [12] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Критерії видимості в тумані I та II рівня небезпечності

Назва явища	Критерії НМЯ I, кольорове позначення - жовтий		Критерії СМЯ II, кольорове позначення - помаранчевий	
	кількісний показник	тривалість	кількісний показник	тривалість
Туман (видимість)	туман $\leq 500\text{м}$	$\geq 3\text{год}$	Сильний туман $< 100\text{м}$	$\geq 12\text{ год}$
Туман на високогірних станціях (видимість)	туман $\leq 500\text{м}$	$\geq 3\text{год}$	-	-

Якщо НМЯ I, СМЯ II не були передбачені, то за фактом виникнення цих явищ передається попередження про збереження та подальший їх розвиток (при СМЯ II) з одночасним інформуванням про фактичні кількісні характеристики. Оперативні інформації про ускладнення погодних умов складають в основному на 1-3 доби. Вони можуть містити прогноз всіх метеорологічних елементів і явищ погоди I-III рівнів небезпечності[29].

2.2 Класифікація туманів

Найбільше значення стосовно задачі розробки методів короткострокового прогнозу туманів має їх генетична класифікація (рис. 2.1).

За синоптичним положенням, при якому виникають тумани, вони поділяються на фронтальні, утворення яких пов'язане з термодинамічними процесами в області фронтальних розділів, і внутрішньомасові[13].

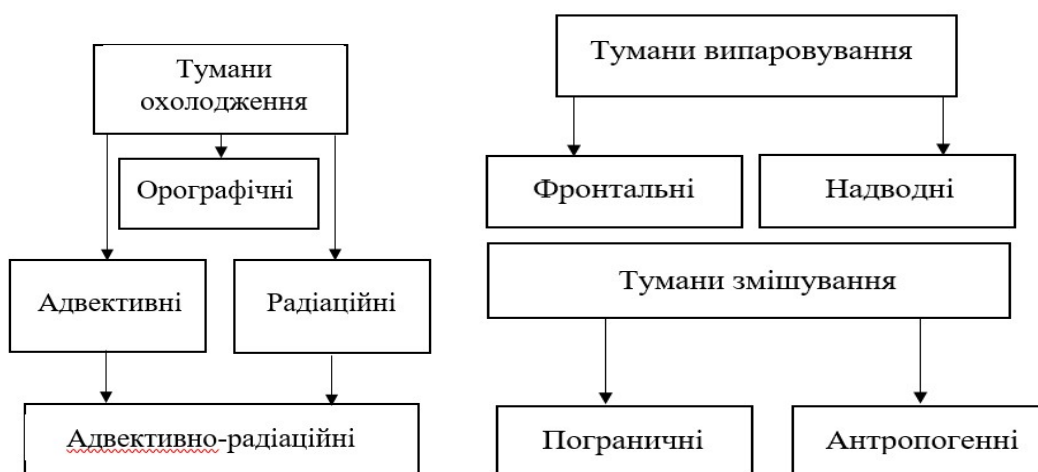


Рисунок 2.1 - Генетична класифікація туманів

Фронтальні тумани спостерігаються у зоні атмосферних фронтів, вони обумовлені адвекцією теплого вологого повітря і насиченням холодного підфронтального повітря опадами, що випадають з фронтальних хмар. Фронтальні тумани утворюються найчастіше перед теплим фронтом в повітрі, насиченому водяною парою. При цьому зниження тиску перед фронтом викликає додаткове охолодження[14]. Спостерігаються у порівняно вузьких зонах поблизу теплих фронтів і переміщується разом з ними, тому у кожному окремому пункті тривалість туману є незначною.

Фронтальні тумани виникають:

1. Попереду малорухомого теплого фронту або фронту оклюзії за типом теплого, в холодному повітрі при наявності приземної або піднесеної інверсії за рахунок випаровування більш теплих краплин дощу чи мряки.

2. В зоні фронтів, особливо малорухомих, при опусканні низьких хмар, внаслідок випаровування краплин дощу або над зволоженою дощем поверхнею ґрунту при слабкому турбулентному обміні під шаром хмар.

3. За холодним фронтом взимку, якщо в клині холодного повітря випадає дощ або відбувається випаровування з більш вологого теплого ґрунту.

4. При зміщенні вологої теплої або холодної маси з великими контрастами температур, що сприяє утворенню туману, як в зоні фронту, так і за фронтом вздовж узбережжя морів, льодовиків, межі снігового покриву і т.п.[16].

Внутрішньомасові тумани виникають в однорідних повітряних масах і, як правило, є туманами охолодження.

Найбільше значення стосовно задачі розробки методів короткострокового прогнозу туманів має їх генетична класифікація. За фізичними умовами утворення тумани поділяються на: тумани охолодження,

випаровування, змішування та тумани, пов'язані з діяльністю людини. Утворенню туману сприяє наявність в атмосфері часток дрібного пилю і розчинних гігроскопічних частинок які виступають у якості ядер конденсації. Водяна пара конденсується навколо цих мікроскопічних твердих частинок. Морський туман, який формується над поверхнею морів і океанів, утворюється, коли водяна пара конденсується навколо шматочків солі, які виступають у якості ядер конденсації.

Основними чинниками, що обумовлюють обмежену видимість, є надходження в атмосферу і утворення в ній різних домішок. Домішки, що погіршують видимість, можуть бути твердими і рідкими. У жарку погоду в пустелях, напівпустелях і степових районах сильний вітер піднімає із земної поверхні велику кількість пилю, що призводить до виникнення заповишених бурь і мли, сильно погіршуючих видимість. До твердих домішок відносяться також кристали випадного снігу, кристали, що утворюються в результаті сублімації водяної пари поблизу земної поверхні при низьких температурах (наприклад, в Арктиці і Антарктиді), - проте це окремий випадок загального фізичного процесу фазового переходу водяної пари.

Головною причиною погіршення видимості у земної поверхні є конденсація водяної пари. В результаті її утворюються тумани і серпанки.

Збільшення вологовмісту індивідуальної маси повітря може статися під впливом випару води із земної поверхні і випару крапель випадних опадів, або за рахунок горизонтального і вертикального молекулярного і турбулентного перемішування.

До туманів охолодження відносяться адвективні, радіаційні, адвективно-радіаційні, орографічні тумани та тумани схилів.

Адвективний туман - це наземна хмара, що утворилася внаслідок охолодження повітряної маси до точки насичення при її переміщенні над

більш холодною підстильною поверхнею. Цією поверхнею можуть бути більш холодна земна поверхня, сніговий покрив, вода або лід [17].

Утворенню такого туману сприяють велика різниця між температурою підстильної поверхні та початковою температурою відносно теплого повітряного потоку, велика відносна вологість повітря, помірна швидкість вітру (2-5 м/с), збільшення або постійність з висотою масової долі водяної пари, помірно стійка стратифікація й порівняно слабкий турбулентний обмін. Верхня межа адвективних туманів у більшості випадків співпадає з верхньою межею приземної або підведеної інверсії температури [12].

Радіаційний туман - це наземна хмара, що виникла в результаті нічного інфрачервоного охолодження земної поверхні та поблизу неї, яка зазвичай виникає за ясного неба, високої відносної вологості та низьких температур [17]. Він знаходиться в значно більшій залежності, ніж адвективний, від місцевих умов, а саме характеру підстильної поверхні, місцевих повітряних течій тощо. Радіаційний туман утворюється ввечері, коли тепло, поглинене поверхнею Землі протягом дня, випромінюється в повітря.

Туман утворюється над сушею при безхмарному небі і слабкій швидкості вітру (або штилі) в результаті охолодження повітря, коли його температура стає нижче за температуру туманоутворення. Для утворення туману сприятливою умовою також є слабке збільшення швидкості вітру з висотою. Такі умови сприяють турбулентному переносу продуктів конденсації від земної поверхні вгору і підтримці у зваженому стані в приземному шарі повітря. В процесі перемішування вертикальна потужність туману збільшується [17].

Радіаційні тумани бувають двох типів: приземні та високі. Приземні тумани спостерігаються лише над сушею після заходу сонця при безхмарному небі і слабкій швидкості вітру. Вони пов'язані з нічним радіаційним

вихолодженням ґрунту або снігового покриву. Їх розподіл має локальний характер: найчастіше вони виникають в низинах, поблизу боліт, на лісових галявинах. Над великими річками вони не утворюються через конвекцію над теплою (в нічні години) водою. Приземні тумани виникають в при малих швидкостях вітру, але не під час штилю - невелика швидкість вітру необхідна для появи турбулентності, що зумовлює розповсюдження охолодження і туманоутворення догори. Приземні тумани виникають в шарі приземної інверсії і після сходу Сонця розсіюються разом з руйнуванням шару інверсії.

Високі радіаційні тумани можуть спостерігатися на суші на морі до висоти декількох сотень метрів в стійких антициклонах в холодний період року. Це є результатом поступового вихолодження повітря в нижніх шарах атмосфери. Внаслідок турбулентного переносу водяної пари догори спочатку розвиваються шаруваті хмари на висоті декількох метрів під шаром інверсії осідання. Після цього ці хмари розповсюджуються зверху вниз до земної поверхні і саме в цьому випадку вони набувають статусу радіаційного туману [19].

Товщина шару радіаційного туману залежить від тривалості його існування і вертикального перемішування в приземному шарі атмосфери [20].

Адвективно-радіаційний туман формується над охолодженою поверхнею переважно в холодний період року, вночі, при слабкій адвекції теплого повітря. Швидкість вітру в приземному шарі повітря складає 1-2, рідше 3-4 м/с. Додаткова конденсація водяної пари виникає за рахунок радіаційного охолодження теплого повітря в приземному шарі, цьому сприяє повне прояснення навіть на короткий проміжок часу або хмарність незначної густини і потужності.

Туман випаровування або паровий туман утворюється над водною поверхнею, температура якої є набагато більшою за температуру

навколишнього повітря. Він, як правило, відрізняється від більшості адвективних туманів, що утворюються над сушею, тим, що він є конвективним явищем, в результаті чого туман може бути дуже щільним, глибоким і зверху бути схожим на верхівки хмар купчастих форм [21].

Холодне повітря знизу нагрівається від теплої підстильної поверхні й стає у нижній частині нестійким. Нестійкість сприяє розвитку інтенсивного турбулентного перемішування і, таким чином, тепло- і вологообміну. Вище тонкого шару нестійкості зберігається інверсія, що утворилася при переміщенні повітря над льодом або сніговим покривом [12]. Швидкість випаровування з поверхні води залежить від контрасту температур води та повітря і швидкості вітру. Зниження температури повітря над водою в нічні часи сприяє насиченню і перенасиченню нижнього шару холодного повітря [21].

Тумани змішування утворюються на межі повітряних мас з різною температурою і вологістю [23]. Повітря, що надходить, дуже швидко змішується з порівняно теплим шаром повітря, яке розташовується над теплою і вологою поверхнею. Цей процес протікає дуже інтенсивно й туман утворюється вже через декілька хвилин після початку адвекції холодного повітря [12].

Водність туману зростає зі збільшенням його інтенсивності. Максимальні значення водності туманів однієї і тієї ж інтенсивності при переході від додатних температур до від'ємних зменшуються. Зі збільшенням температури може збільшуватися лише водність туманів охолодження (радіаційних і адвективних) [20].

Орографічні тумани виникають під час зниження температури повітря при його адіабатичному розширенні. Такі тумани утворюються, як правило,

лише при натіканні повітря на схили гір, що забезпечує значне переміщення повітря по вертикалі, що призводить до його охолодження.

Кількість днів з туманом залежить від орографії місцевості, що можна спостерігати на прикладі території України. Тут у рівнинній місцевості тумани спостерігаються в середньому 40-60 днів на протязі року. Однак у Карпатах їхня повторюваність збільшується до 80 днів на рік, а в найбільш піднесеній частині навіть до 110 днів. У південній частині України, на узбережжі Азовського і Чорного морів, спостерігається 40 - 50 днів з туманами. На території Донецького кряжа повторюваність зростає до 80-100 днів, а північніше Донбасу зменшується до 30 днів, що обумовлено впливом низхідних повітряних потоків при південних виносках теплої і вологої повітря. Особливо помітний вплив орографії на розподіл туманів спостерігається у Криму. На узбережжі тумани утворюються не частіше ніж 20-30 днів на рік; у горах – до 50-80 днів, а на Ай-Петрі – у середньому 183 дні. Тривалість туманів у холодний (листопад-березень) і теплий (квітень-жовтень) періоди року суттєво розрізняється [24].

2.3 Погіршення видимості в тумані

В залежності від дальності видимості розрізняють за інтенсивністю такі види туманів:

- дуже сильний туман - <50 м;
- сильний туман - 50-200 м;
- помірний туман - 200-500 м;
- слабкий туман - 600-1000 м [12].

Залежно від вертикальної протяжності тумани поділяються на поземні (з верхньою межею до 2 м.), низькі (з верхньою межею від 2 до 10 м.), середні (з верхньою межею від 10 до 100 м) і високі (з верхньою межею, що перевищує 100 м.) [25].

Туман може характеризуватись такими параметрами, як концентрація аерозольних часток, їх розподіл за розмірами й водністю. У тумані вода перебуває в двох (рідкому та змішаному), а при від'ємних температурах у трьох (рідкому, змішаному та твердому) фазових станах. Водність туману може збільшуватись за рахунок таких факторів: збільшення вологовмісту повітря та падіння температури, що призводить до зменшення насичуючої абсолютної вологості. Вологовміст повітря може збільшуватись під впливом випаровування води з підстильної поверхні, горизонтального і вертикального перемішування повітря. Падіння температури відбувається за рахунок молекулярного й турбулентного теплообміну з оточуючими масами повітря й земною поверхнею, радіаційного вихолодження, адіабатичного розширення об'ємів повітря при їхніх висхідних рухах [30].

3 УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОГІРШЕНОЇ ВИДИМОСТІ У РАЙОНІ АЕРОПОРТУ "КИЇВ» (ЖУЛЯНИ)

3.1 Фізико-географічний опис аеропорту Жуляни

Міжнародний аеропорт «Київ» імені Ігоря Сікорського, Аеропорт «Київ-Жуляни» (IATA: IEV, ICAO: UKKK) — другий найбільший пасажирський міжнародний аеропорт України та Києва, розташований у межах столичного мікрорайону Жуляни за 8 км на південний захід від центру міста. Географічні координати контрольної точки аеродрому (КТА) Київ/Жуляни: широта N 50°24' 06", довгота E 30°27' 07". Займає територію площею 265 га. Єдина злітно-посадкова смуга завдовжки 2310 м і завширшки 45 м. За двома злітними курсами ЗПС діє ILS I категорії, що створює обмеження для посадки ПС за умов недостатньої видимості.

Аеропорт зі всіх сторін оточений будівлями і деревами висотою від 10 до 40 м, на віддалі 8,4 км на схід від метеостанції знаходиться Києво-Печерська Лавра висотою 114 м, а на відстані 7,7 км на півночі знаходиться телевізійна вежа, висота якої 399 м. З півночі і північного сходу аеропорт безпосередньо межує з міським масивом, а з півдня — з селом Жуляни. Східніше від аеродрому Київ/Жуляни (на відстані 7 км) протікає річка Дніпро. На південно-західній окраїні аеропорту знаходиться залізнична станція (зал. ст. «Київ-Волинський»). Основними лінійними орієнтирами являються такі об'єкти: річка Дніпро, що протікає з півночі на південь; колії південно-західної залізниці, які прокладено вздовж західної окраїни аеропорту; шосейна дорога Київ–Житомир і залізничні колії Київ–Брест, розташовані на відстані 8 км від

аеродрому та зорієнтовані, відповідно, одна на захід, а інша – на північний захід.

Ґрунти в районі аеродрому Київ по механічному складу належать до суглинків і схильні до розмокання. Їх водопроникність слабка. Глибина залягання ґрунтових вод від 1,75 м до 2 м.

Рослинний покрив льотного поля природний і представлений, в основному, багаторічними травами. Влітку льотне поле аеродрому має вигляд однотонного забарвлення зеленого кольору і не відрізняється від оточуючої місцевості, бетонована ЗПС добре виділяється на загальному фоні; взимку контраст між оточуючим сніговим покривом і ЗПС незначний.

Аеродром має одну злітно-посадкову смугу розміром 2310 м × 45 м, яка зорієнтована із північного-сходу–сходу на південний-захід–захід (259° – 79°). Підходи до ЗПС вільні, природних перешкод та великих промислових підприємств, які б обумовлювали виникнення істотних мікрокліматичних особливостей і впливали б на утворення та розподіл кліматичних елементів немає.

Крім того, за останні роки відмічається чітко виражена тенденція до підвищення рівня забудови оточуючої території аеродрому, особливо відмічається інтенсивне збільшення кількості висотних споруд.

Клімат аеродрому Київ/Жуляни в основному формується під впливом атлантичних повітряних мас. Переважає перенесення повітряних мас з заходу на схід, який часто порушується вторгненням холодного повітря з півночі, з північного-сходу і виносом теплого вологого повітря з півдня і південного-заходу.

Середні багаторічні значення річної температури повітря становлять 9.2°C . Найхолодніший місяць – лютий. Середньомісячна температура повітря в цьому місяці – -3.7°C . Найтепліший місяць – липень, середньомісячна

температура повітря в липні становить – +21.5°C. Середня швидкість вітру за рік на аеродромі становить 3 м/с.

Повторюваність обмеженої видимості має чітко виражений річний хід з максимумом в листопаді і мінімумом в серпні для градацій видимості <2000 м – <200 м та максимумом в грудні і мінімумом в червні для градації видимості <5000 м. Це відбувається через різко виражену сезонність синоптичних процесів в регіоні. Так як в холодний період року частіше спостерігається циклонічна діяльність, результатом якої являється формування низьких хмар з випадінням опадів, що призводить до погіршення видимості, а також адвекція теплих повітряних мас на холодну підстильну поверхню, що призводить до утворення адвективних туманів, то ці фактори можна вважати основними причинами погіршення видимості в цей час. В теплий період року причиною погіршення видимості є радіаційне охолодження приземного шару повітря в нічні години, яке призводить до утворення серпанків і туманів, а також погіршення видимості, спричинене випадінням опадів при проходженні фронтів і при внутрішньомасових процесах в хмарах[28].

3.2 Повторюваність туманів, які обмежували видимість на станції АМСЦ Жуляни в 2012-2021 рр.

Для аналізу повторюваності виникнення туманів, що значно погіршують видимість в районі станції АМСЦ Жуляни до 1 км в період з 01.10.2012 по 30.11.2021 були отримані дані про фактичну погоду з телеграм METAR інтернет ресурсу gr5.ua [26]. За цими даними були проведені розрахунки,

результати яких занесені в таблицю 3.1. Всього за обраний період було проаналізовано 18945 спостережень, серед яких були обрані строки з видимістю менше 1 км.

Таблиця 3.1 – Повторюваність (%) різних градацій видимості в 2012-2021рр.

Явища	Видимість, м						Σ
	<50	100-200	201-300	301-400	401-500	501-1000	
Туман	0,6	23,3	7,4	13,6	33,1	22,1	100

Найбільша повторюваність зниження горизонтальної видимості на станції АМСЦ Жуляни складає 33,1% для градації 401-500 м.

Погіршення видимості до 501-1000 м складає 22,1% випадків від загальної кількості спостережень. Для градації 301-400 м повторюваність складає 13,6%, а для 201-300м це 7,4%.

Найменше значення повторюваності видимості припадає на градацію <50 і дорівнює 0,6%. Решта випадків з туманами (23,3%) припадають на градацію 100-200 м.

3.3 Атмосферні циркуляції позатропічних широт, що впливають на виникнення обмеженої видимості в аеропорту Жуляни

На даний час існує багато різних видів класифікації глобальних та регіональних атмосферних процесів. Для типізації 44 синоптичних процесів,

які сприяють формуванню обмеженої видимості на АМСЦ Жуляни була обрана типізація циркуляції атмосфери позатропічних широт по Б.Л. Дзердзеєвському [19], головною ознакою якої є наявність або відсутність блокуючих процесів на півкулі, їх напрямок і кількість. Всього виділено 4 групи циркуляції, 13 типів, 41 підтип і елементарний циркуляційний механізм - ЕЦМ (основна одиниця типізації). Число позначає тип ЕЦМ, перші букви алфавіту (а, б, в, г) - відмінності ЕЦМ в межах одного типу в напрямках арктичних вторгнень або виходу південних циклонів, а букви "з" (зимовий) і "л" (літній) - сезонні відмінності ЕЦМ по знаку баричних полів над океанами і континентами. Тільки в типах 4, 9 та 10 зимові ЕЦМ позначені першими літерами алфавіту (4а, 9б і 10а). Для кожного типу ЕЦМ складені динамічні схеми (переміщення циклонів і стаціонування антициклонів, середні карти атмосферного тиску і температури повітря на рівні моря, карти баричної топографії та середньої температури шару на рівні АТ-500).

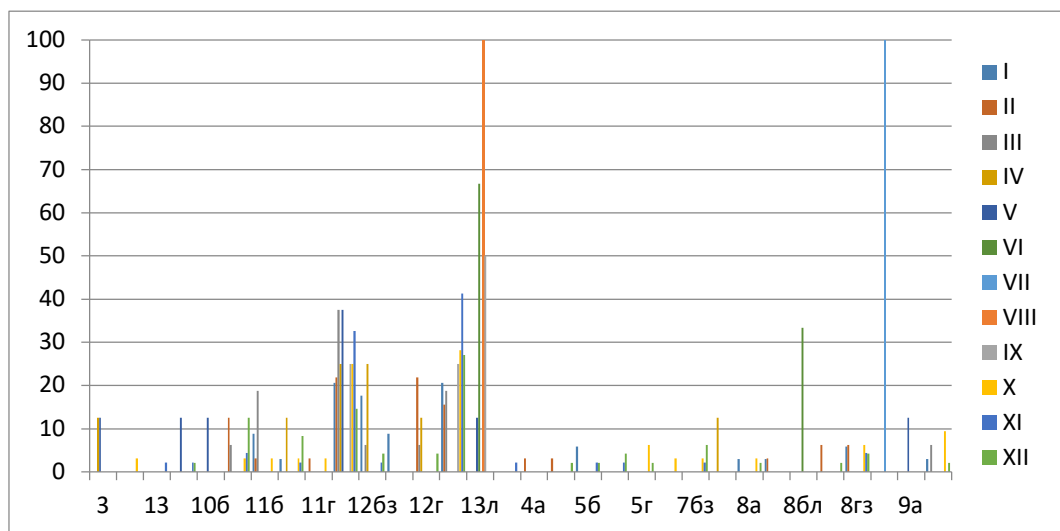


Рисунок - 3.2 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації 501-1000 м за 2012-2019 рр.

В ході дослідження за даними каталогу послідовної зміни ЕЦМ за 2012-2019 рр. для кожного типу та для кожної градації була підрахована кількість випадків, а потім визначена їх повторюваність від загальної кількості випадків за місяць при визначеному типі синоптичного процесу [27].

З графіку 3.2 видно, що в серпні та червні для градації 501-1000 м переважає тип меридіональної південної циркуляції 13л, а в серпні ЕЦМ 8гз, що пов'язаний з розвитком двох блокуючих процесів (західного, що спрямований через райони Гренландії на Атлантику та східного – через море Лаптевих на басейни Єнісею і Байкалу).

В зимові та осінні місяці переважаючими є різні модифікації типів 11 та 12 ЕЦМ. Їх повторюваність змінюється від 3,1% до 37,5% (найбільш розповсюдженим є тип циркуляції 12а). Тип 12 формується при добре розвиненому арктичному антициклоні, коли одночасно в різних частинах півкулі розвивається декілька циклонічних серій і рух циклонів відбувається по траєкторіям, що мають велику північну складову, а тип 11 являє собою два блокуючих процеси і три прориви південних циклонів.

Для градації 401-500 м 100% повторюваність в серпні склав тип 13л. 50% повторюваність в травні склав тип ЕЦМ 9а, пов'язаний з двома блокуючими процесами і трьома проривами південних циклонів та тип ЕЦМ 12бл, пов'язаний з трьома блокуючими процесами і трьома проривами південних циклонів.

В листопаді переважаючим є тип циркуляції 12а – 44,8% від загальної повторюваності за місяць. Найчастіше цей тип пов'язаний з тим, що одночасні арктичні вторгнення здійснюються на схід Північної Америки, Азії та на Атлантичний і Тихий океани. Циклонічні полярно-фронтівні серії розташовані над Атлантикою, Європою, поблизу Далекосхідного узбережжя Азії і над Америкою (її західними і центральними районами).

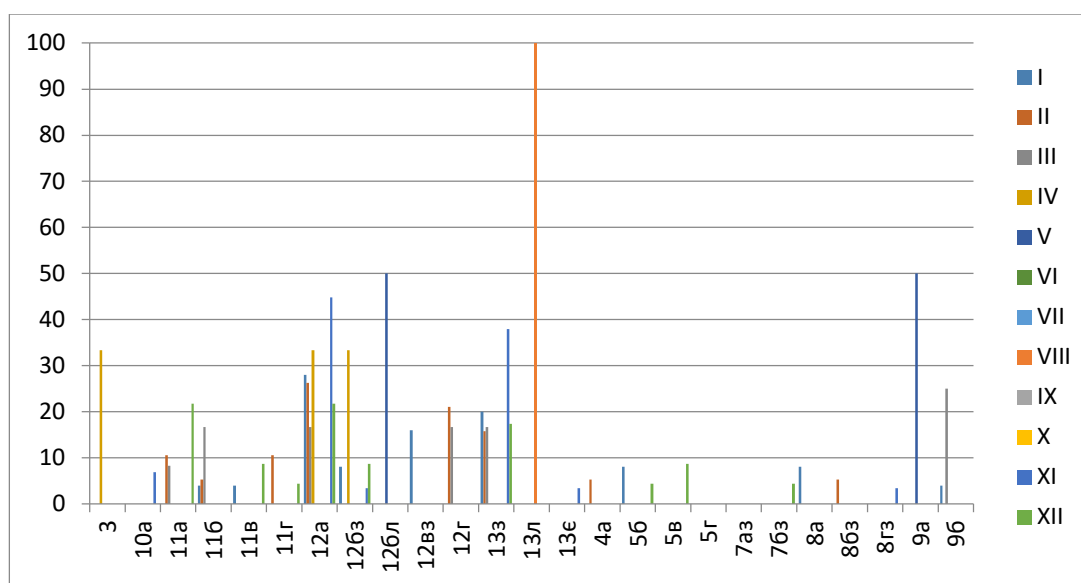


Рисунок - 3.3 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації 401-500 м за 2012-2019 рр.

Взагалі тип циркуляції 12а для градації 401-500 м зустрічається з листопада по квітень. Його повторюваність змінюється від 16,7% (березень) до 21,7% (грудень) і 44,8% (листопад).

З графіку на рис. 3.4 видно, що для градації 301-400 м багато типів ЕЦМ складають 50% повторюваність для різних місяців. Це такі типи, як з, 12а, 12г, 13л, 8бл. Така висока повторюваність пов'язана з тим, що в ці місяці спостерігалось мало випадків утворення туману для даної градації видимості. В вересні випадків з туманами зовсім не спостерігалось. Загальна кількість випадків з видимістю 301-400 м за 2012-2019 рр. складає лише 89.

В листопаді переважаючим є меридіональний південний тип циркуляції 13з (41,7%). Для цієї градації він також зустрічається в усі зимові місяці (14,3-18,8%). Також поширеним типом ЕЦМ є 12а (18,8% в січні, 25% в жовтні, 40% в березні).

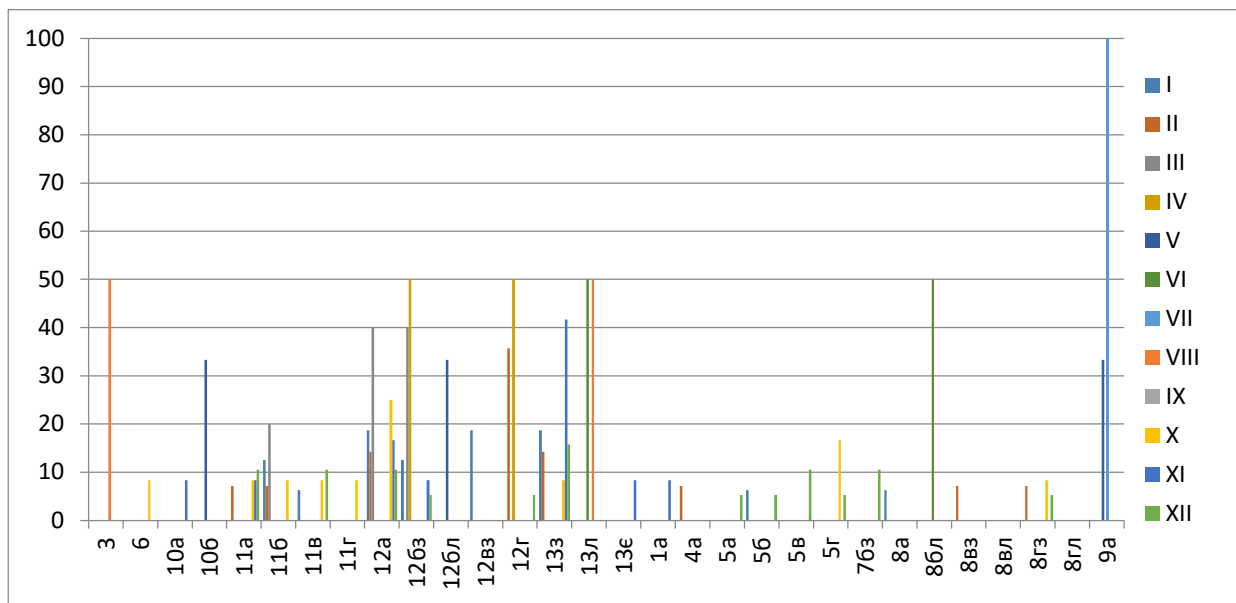


Рисунок - 3.4 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації 301-400 м за 2012-2019 рр.

З графіку на рис. 3.5 видно що максимальну 100% повторюваність склали типи циркуляції 12бз для квітня, 13л для вересня і 9 а для липня. Тип 9а характеризується двома блокуючими процесами і трьома проривами південних циклонів. Блокуючі процеси утворюються при формуванні над Гренландією та Аляскою гребенів арктичного антициклону і їх наступним переміщенням на океани до з'єднання з гребенями субтропічних антициклонів. Утворюється широка смуга високого тиску, що перетинає позатропічні широти півкулі, що блокує західне перенесення у двох місцях. Два прориви полярнофронтових циклонів здійснюються через Європу і вздовж Східного узбережжя Азії.

Повторюваність типу ЕЦМ 12а для градації видимості 201-300 м в березні склала 60%, в травні 33,3%, а в січні 20%. Тип 13л в червні складає 66,7%, а в травні 33,3%. Тип 11а в грудні складає 21,4%, а в листопаді 13,3%.

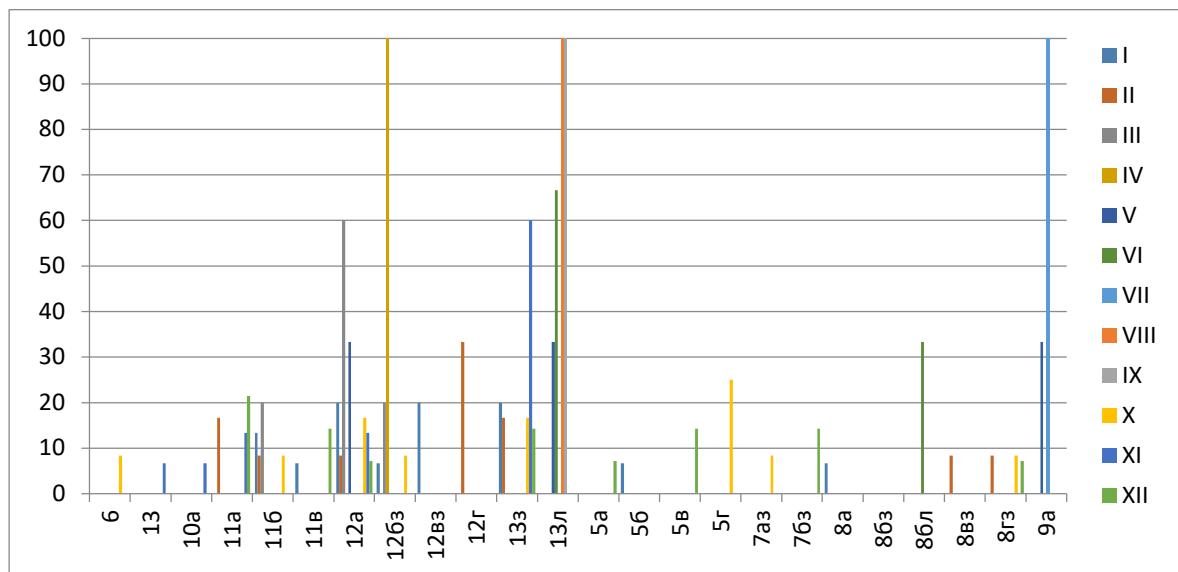


Рисунок - 3.5 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації 201-300 м за 2012-2019 рр.

Горизонтальна видимість 100-200 м спостерігалась на станції АМСЦ Жуляни 158 днів протягом 2012-2019 рр. З рис. 3.6 видно, що 100% повторюваність мали ЕЦМ 13л та 9а. В червні 50% повторюваність мали типи циркуляції 8бл, що характеризується західним блокуючим процесом, спрямованим через північ Гренландії на Центральну чи Західну Європу, та східним - через Таймир або море Лаптевих на басейни Єнісея або Лени і Амура, та 12бл, що пов'язаний з формуванням меридіональної смуги підвищеного тиску над Атлантикою за рахунок розвитку з півночі гребеня азорського антициклону і його посилення арктичним вторгненням.

Як і в інших градаціях, найпоширенішим є ЕЦМ 12а. Він зустрічається з жовтня по травень і має повторюваність від 13% до 30,4%.

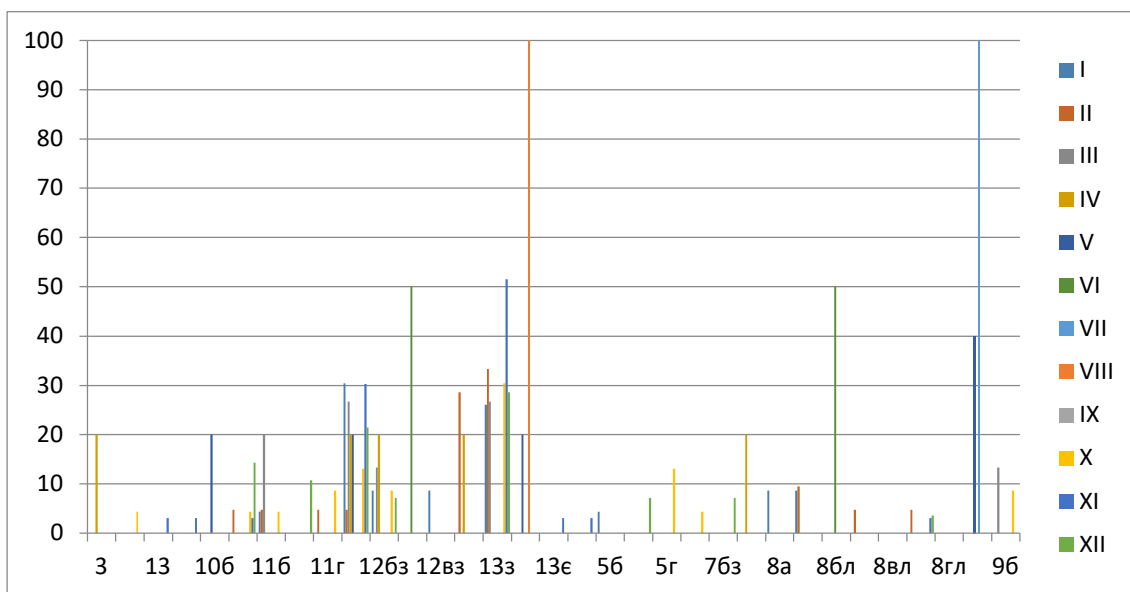


Рисунок - 3.6 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації 100-200 м за 2012-2019 рр.

Градація <50 м на станції АМСЦ Жуляни спостерігалась рідше за все. В трьох випадках повторюваність складає 100%. Це тип 12а в січні, 11б в лютому та 9б в березні. В жовтні 33,3% мають типи 12 бз, 13з та 7аз.

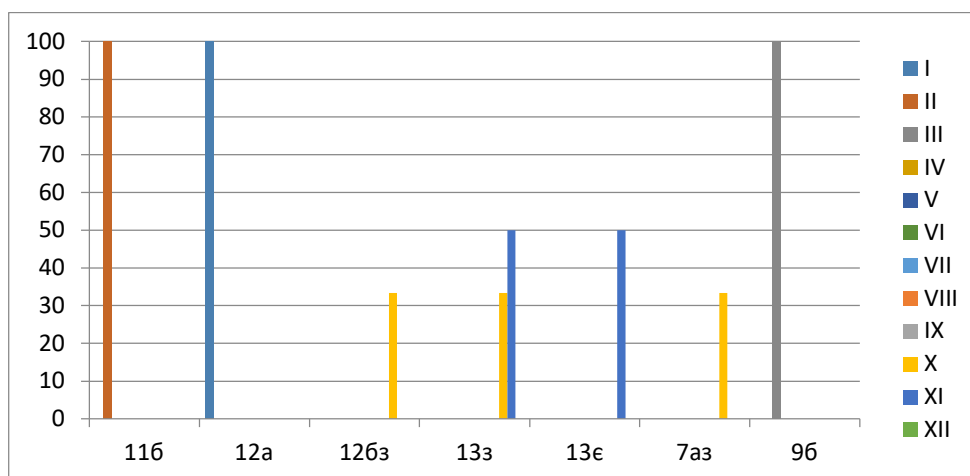


Рисунок - 3.7 Повторюваність типів ЕЦМ (%) для градації <50 м за 2012-2019 рр.

Тип 7аз характеризується тим, що арктичне вторгнення спрямоване на північний-схід Північної Америки, а північний відріг континентального антициклону з'єднується з арктичним. Над Сибіром також знаходиться антициклон, а інтенсивна циклонічна діяльність розвивається над океанами.

Тип 13з пов'язаний з потужними областями підвищеного тиску над Азією та Америкою, з сильно розвиненими як меридіональному, так і в широтному напрямку гребенями. Тип 12бз пов'язаний з трьома блокуючими процесами і трьома проривами південних циклонів.

4 МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИДИМОСТІ

4.1 Основні сучасні методи прогнозу видимості

Утворення туману є наслідком двох процесів: збільшення кількості вологи, що міститься у повітрі, та зменшення температури приземного повітря. Зазвичай конденсація водяної пари починається коли повітря насичене вологою і відносна вологість близька до 100%. Однак, встановлено, що при відсутності сторонніх частинок в повітрі (ядер конденсації) комплекси молекул конденсованої фази можуть виникнути лише в результаті випадкових зіткнень молекул в перенасиченому повітрі. В реальній атмосфері завжди містяться домішки різного походження (частинки пилу, піску, солі). Також для утворення туману важливу роль грають характеристики вітрового режиму приземного шару атмосфери.

В теперішній час синоптичні прогнози сприятливої ситуації для розвитку радіаційних туманів базуються на аналізі наявності і переміщення центрів антициклонів і осей гребенів, а адвективних туманів – на прогнозі переміщення теплих атмосферних мас (теплих фронтів). При чому дуже важливим параметром, що впливає на утворення туману, є вологість ґрунту.

Також існують чисельні методи прогнозу туману. Для прогнозу радіаційного туману в авіаційних метеорологічних службах широко використовують методи прогнозу О.С. Зверева.

Спосіб є універсальним, тому що пройшов успішні випробування в різних регіонах. Його ефективність може бути підвищена шляхом розрахунку місцевої поправки при прогнозі мінімальної температури.

Вихідними даними для прогнозу є: T – температура повітря за 13 або 19 год; R – відносна вологість в той же момент часу; прогноз хмарності на ніч; V – прогнозована швидкість вітру на ніч; $\Delta\varphi$ – місцева поправка; Δt – тривалість ночі.

Місцева поправка $\Delta\varphi$ враховує місцеві фізико-географічні умови. Прогноз туману розробляється за допомогою діаграм у наступному порядку.

1. За даними T і R за 13 або 19 годин за номограмою (рис. 4.1) визначається необхідне зниження температури повітря для утворення серпанку ΔT_c або туману ΔT_T . З номограми видно, що, чим більшою є відносна вологість в початковий момент часу, тим менше необхідно пониження температури для утворення туману.

2. За даними T і R за 13 або 19 годин визначається можливе зниження температури ΔT_n в нічний час при ясному небі без урахування швидкості вітру (рис. 4.2).

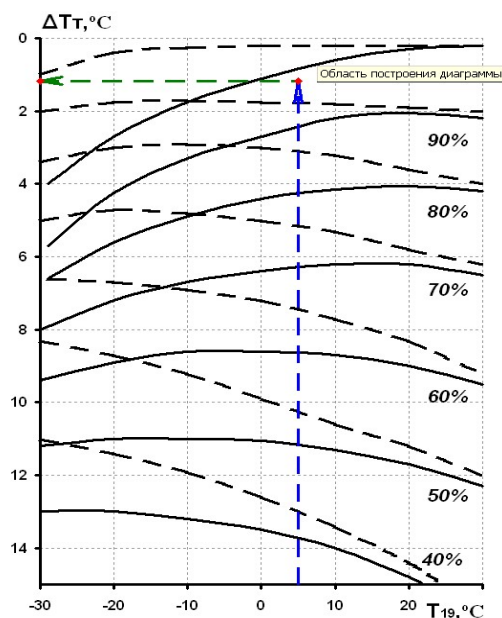


Рисунок 4.1 – Для знаходження нічного пониження температури, необхідної для утворення туману (серпанок – пунктирні лінії)

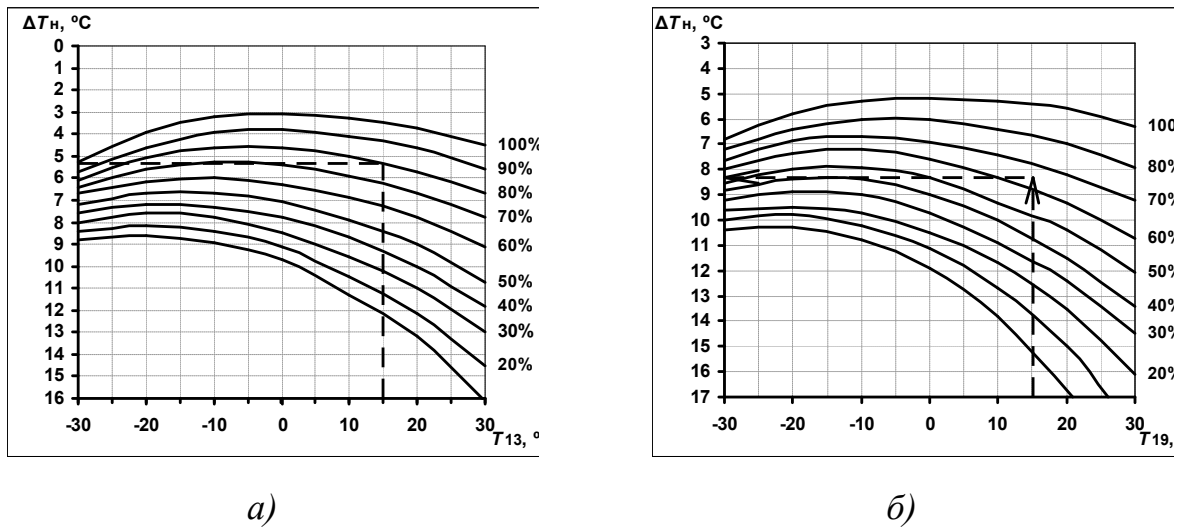
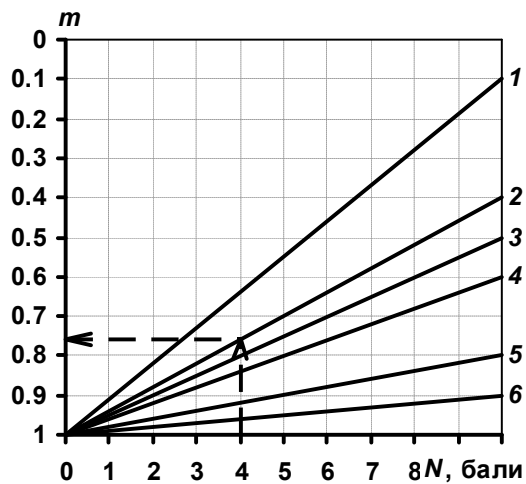


Рисунок 4.2 – Номограми для визначення нічного зниження температури при ясному небі (ΔT_n): *a)* – для холодної пори року; *б)* – для теплої пори року.

3. Розраховується виправлене значення $\Delta T_{n, \text{випр}} = \Delta T_n \pm \Delta \varphi$.
4. За даними про хмарності на ніч визначається коефіцієнт m , що враховує вплив хмарності на нічне зниження температури.



Відмінна цифра	Прогнозована хмарність (С)
1	Нижня
2	Середня щільна
3	Середня середня
4	Середня тонка
5	Верхня щільна
6	Верхня тонка

Рисунок 4.3 – Графік для визначення поправочного коефіцієнта (m) по очікуваній кількості (N) і формі хмарності (C)

5. За значеннями $\Delta T_{\text{н.випр}}$, швидкості вітру і коефіцієнта m визначається можливе зниження температури повітря в нічний час $\Delta T_{\text{н}}$ (рис. 4.4)

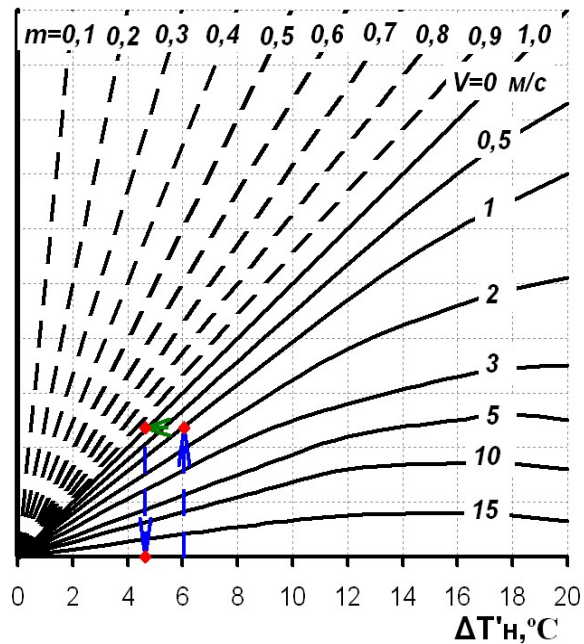


Рисунок 4.4 – Номограма для визначення нічного зниження температури з урахуванням хмарності й вітру

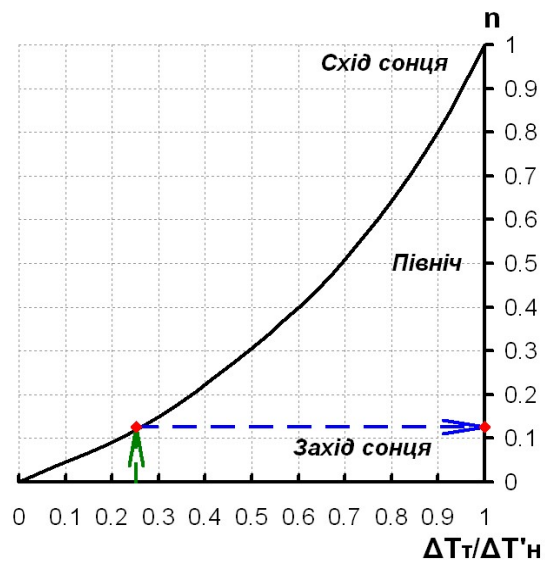


Рисунок 4.5 – Графік для прогнозу часу утворення туману

6. Висновок про можливість виникнення туману (серпанку) робиться шляхом порівняння ΔT_T та ΔT_H :

- якщо $\Delta T_H > \Delta T_T$, туман утворюється;
- якщо $\Delta T_T > \Delta T_H$, туман не утворюється.

Якщо очікується туман, то необхідно визначити час його виникнення.

Для цього обчислюється відношення $\Delta T_T / \Delta T_{H, \text{випр}}$ і за графіком (рис. 4.5) визначається доля ночі n до моменту утворення туману.

Перевага цього способу є в тому, що в ньому досить повно враховується початковий і очікуваний стан атмосфери. Оптимізація способу легко виконується шляхом розрахунку місцевої поправки для кожного місяця року, для конкретної синоптичної обстановки, що виключає трудомістку роботу з побудови нових уточнених номограм[6].

4.2 Порівняльний аналіз декількох чисельних методів прогнозування дальності видимості

В якості вихідних даних для прогнозу використовувались дані архівів інтернет-ресурсу гр.5 в період з 01.01.2016 р. по 30.11.2021р. Всього було відібрано 300 випадків, з яких 204 були з туманом і 96 з його відсутністю.

Для розрахункових методів відбиралась температура, вологість, температура точки роси на висоті 2 м, а також температура та швидкість вітру на рівні 850 гПа (з аерологічних діаграм сайту FlyMeteo.org).

Розрахунки проводились по трьом чисельним методам : OMSZ, NCEP, NOAA.

Метод I. Найбільш фізично обґрунтований метод. Розроблений працівниками Національного центру екологічного прогнозу (NCEP) США. Використовується в якості компоненту прогнозу видимості моделі RUC (Rapid update cycle). В методі в якості предиктора використовується значення відносної вологості на висоті 2 м (RH,%). Падіння видимості зі збільшенням приземної вологості враховується як:

$$L = 60 \exp - [2.5 \min(0.8 \frac{RH}{100} - 0.15)] \quad . \quad (4.5)$$

Метод II. Напівемпіричний метод OMSZ. Розроблений працівниками Угорської метеорологічної служби. Використовується для прогнозів в аеропорту Будапешту. В якості предикторів в ньому враховуються вертикальний градієнт температури в ГША (тобто міра стійкості атмосфери), дефіцит точки роси біля поверхні та швидкість вітру на верхній межі ГША:

$$L = -1.33 + 0.9(|T_{sf} - T_{850}| + (T_{sf} - Td_{sf}) + W_{850}) \quad , \quad (4.6)$$

де T_{sf} та T_{850} – температура на рівні 2 м та на ізобаричній поверхні 850 гПа відповідно, К; Td_{sf} – температура точки роси на висоті 2 м, К; W_{850} – швидкість вітру на ізобаричній поверхні 850 гПа, м/с.

Метод III. Напівемпіричний метод. Розроблений групою дослідників з Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) США. Даний алгоритм використовується для прогнозу видимості в зонах польоту літаків. В якості предикторів використовують значення відносної вологості на рівні 2 м і різницю температури та точки роси на тому ж рівні:

$$L = 9656 \frac{T_{sf} - T_{sf}}{RH^{1.75}} . \quad (4.7)$$

В таблиці 4.2 частково наведені приклади результатів розрахунків за трьома методами. Розрахунки прогнозів проводились із завчасністю 12 год. Метод OMSZ дуже сильно завищував значення видимості і майже в кожному випадку прогнозував відсутність туману, тобто метод має дуже велику помилку пропуску, що є неприпустимим. Те ж саме можна сказати про метод NOAA з невеликою відмінністю в тому, що коли за 12 годин до строку з туманом спостерігався дощ або серпанок і значення відносної вологості дорівнювало 100%, він прогнозував нульову видимість.

Результати показали, що для станції Київ (Жуляни) методи OMSZ та NOAA не працюють і потребують адаптації. Метод NCEP показав позитивні результати в прогнозуванні туману, тому далі саме він перевірявся на справджуваність.

В таблиці 4.3 представлена матриця зв'язаності, в яку занесені результати перевірки. Загальна справджуваність методу NCEP склала 0,55, тобто 55%. Справджуваність прогнозу на наявність явища складає 77,5%, а на його відсутність 39,2%.

Попередженість прогнозу на наявність явища складає 49%, а на його відсутність 69,8%. Сумарний показник справджуваності і попередженості явища складає 126,5%. Він на 3,5% не дотягує до 130, які характеризують задовільну якість прогнозу, але в цілому можна зробити висновок, що метод має задовільну справджуваність. Сумарний показник справджуваності і попередженості відсутності явища складає 109%.

Таблиця 4.2 – Приклад розрахунків прогнозу туману за різними методами для станції Київ (Жуляни)

Дата	Факт	OMSZ	NOAA	NCEP
12.01.2016 03:00	0.9	22.25	3.47	0.95
27.01.2016 06:00	1	14.96	7.95	1.38
28.01.2016 02:00	0.7	11.81	0	0.66
13.02.2016 04:30	0.5	17.84	20.21	0.66
14.02.2016 12:00	0.4	13.61	0	0.66
01.03.2016 03:30	0.2	15.59	7.79	1.31
02.03.2016 02:00	0.7	13.43	0	0.66
22.03.2016 01:00	0.4	16.94	13.25	1.80
14.04.2016 00:00	0.8	17.93	19.30	8.87
28.04.2016 00:30	0.7	22.07	99.21	1.62
26.05.2016 03:45	0.5	11.09	12.69	4.22
30.05.2016 05:00	0.9	24.05	58.02	5.22
14.06.2016 08:00	0.3	11.45	19.30	2.23
16.06.2016 03:51	0.3	14.51	26.48	2.76
17.06.2016 03:47	0.6	20.63	65.27	5.22

Також були розраховані критерії Багрова, Обухова та Пірсі-Обухова за формулами:

$$H = \frac{(U-U_0)}{(1-U_0)} \quad . \quad (4.8)$$

$$T = n_{11}/n_{01} - n_{12}/n_{02} = n_{22}/n_{02} - n_{21}/n_{01} \quad . \quad (4.9)$$

$$Q = 1 - \alpha - \beta \quad . \quad (4.10)$$

В результаті розрахунків отримали значення критерію надійності Багрова 0,69 . Так як ненадійними вважаються всі прогнози, що менше 0,33, то можна зробити висновок, що метод виправдовує себе. Критерій успішності Обухова дорівнює 0,19.

Таблиця 4.3 – Оцінка справджуваності методу прогнозу туману NCEP для станції Київ (Жуляни)

Прогноз	Спостерігалось		Сума	U=0,55	
	явище	без явища			
Явище	100	29	129	$U_{я}=77.5$	$U_{я} + P_{я}=126.5$
Без явища	104	67	171	$U_{б,я}=39.2$	$U_{б,я} + P_{б,я}=109$
Сума	204	96	300		
	$P_{я} =49$	$P_{б,я}=69.8$			
			T=0.64	H=0.69	Q=0.19

Значення критерію Пірсі-Обухова складає 0,64. Додатне значення цього критерію свідчить про те, що попередженість явища перевищує відношення помилкових прогнозів явища до фактичного числа днів без явищ. Отриманий результат є цілком задовільним, тому для прогнозу туману на станції Київ (Жуляни) цілком доцільно використовувати розрахунковий метод NCEP.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз розглянутого в дипломній роботі матеріалу дозволяє зробити висновок про те, що видимість в атмосфері дійсно є однією із самих складних метеорологічних величин, яка має вирішальне значення, щодо оцінки успішності метеорологічного забезпечення польотів.

2. В період з 2012-2021 рр. найбільша повторюваність зниження горизонтальної видимості на станції АМСЦ Жуляни складає 33,1% для градації 401-500 м, а найменше значення повторюваності видимості припадає на градацію <50 і дорівнює 0,6%.

3. Повторюваність градацій 100-200 та 501-1000 майже однакова (23,3% та 22,1% відповідно) і разом вони складають майже половину (45,4%) з усіх досліджуваних випадків.

4. Найпоширенішими типами циркуляції при яких спостерігається погіршення горизонтальної видимості АМСЦ Жуляни є різні модифікації 12 та 13 типу ЕЦМ. Вони складають великий відсоток випадків у кожній градації.

5. В зимові та осінні місяці переважаючими є різні модифікації типів 11 та 12 ЕЦМ для більшості градацій. Їх повторюваність часто коливається від 30% до 40%.

6. Градація <50 м на станції АМСЦ Жуляни спостерігалась рідше за все. В трьох випадках повторюваність складає 100%. Це тип 12а в січні, 11б в лютому та 9б в березні.

7. Серед трьох розрахункових методів OMSZ, NOAA та NCEP для прогнозу туману на ст. Київ (Жуляни) доцільніше використовувати метод

NCEP.

8. Загальна справджуваність методу NCEP складає 55%, а сумарний показник справджуваності і попередженості явища складає 126,5% . На основі цих результатів можна судити про задовільну справджуваність методу.

9. Значення критерію Пірсі-Обухова складає 0,64. Попередженість явища перевищує відношення помилкових прогнозів явища до фактичного числа днів без явищ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации.
2. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ленинград : Гидрометеиздат, Вып. 3, ч.1. 1985. 300 с.
3. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 645с.
4. Air Weather Service,; General aspects of fog and stratus forecasting. USAF AWS TR 239. 1979. 100 pp.
5. Руководство по проектированию аэродромов. Ч 4. Doc 9157-AN/901
6. Бочарников Н.В., Гусев С.О., Никишков П.Я. Метеорологические измерения на аэродромах. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2008. 428 с.
7. Дорофеев В. В. Оперативные параметры наклонной видимости в сложных метеорологических условиях. Метеорология и гідрологія. 2004.75-84.
8. Рацимор М. Я. Наклонная видимость / ред. Абрамович К.Г. Ленинград :Гидрометеиздат, 1987. 136 с.
9. Правила метеорологічного забезпечення польотів державної авіації України. Наказ 516. Київ: Міністерство оборони України, 2015.
10. Баранов А. М. Видимость в атмосфере и безопасность полетов / ред. Астапенко П.Д. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 205 с.
11. Івус Г. П. Спеціалізовані прогнози погоди . Одеса: ТЕС, 2012. 407 с.
12. Настанова з метеорологічного прогнозування. Український гідрометеорологічний центр. Київ : 2019. 35 с.

13. "Federal Meteorological Handbook Number 1: Chapter 8 – Present Weather". Office of the Federal Coordinator for Meteorology. 2011. pp. 8–1, 8–2.
14. Матвеев Л. Т. Основы авиационной метеорологии. Москва. 1955. 265с.
15. Скирда И. А. Авиационные прогнозы погоды. Москва : Воениздат, 1995. 424 с.
16. Івус Г. П., Семергей-Чумаченко А. Б. Авіаційна метеорологія : конспект лекцій. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2019. 136 с.
17. Croft P., Pfost R., Medlin J., Johnson G. General aspects of fog and stratus forecasting. *Air Weather Service*, 1979. USAF AWS TR 239, 100 pp.
18. Зверев А. С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды / Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 712 с.
19. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзержевскому / Ин-т географии. Москва : Воентехиниздат, 2009. 372 с.
20. Правила эксплуатации метеорологического оборудования аэродромов гражданской авиации. 2009. 150 с.
21. Івус Г. П., Семергей-Чумаченко А. Б., Агайар Е. В. - Авіаційні прогнози погоди: навч. пос. Одеса: 2020. 136 с.
23. Johnson J. C. Physical Meteorology. The Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc., 1954. 393 p.
24. Клімат України: підручник / Липинський В. М., Дячук В. А., Бабіченю В. М.; за ред. В. М. Липинського. Київ: Вид-во Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, 2003. 564 с.
25. Karukstis K., Van Hecke G. Chemistry connections. *The basis of everyday phenomena. Academic Press*. ISBN: 0124001513, 2003. P.23.

26. Архів даних погоди. URL: <http://rp5.ua> (дата звернення 20.10. 2021).
27. Календар послідовної зміни ЕЦМ по дням. URL: <https://atmospheric-circulation.ru/datas> (дата звернення 15.11.2021).
28. Кліматична характеристика аеродрому «Київ» (Жуляни). Київ, 2017. 175 с.
29. Агайар Е. В. - Спеціалізовані прогнози небезпечних явищ погоди : навч. пос. Одеса: 2021. 144 с.
30. Недострелова Л. В., Фасій В. В Сезонна мінливість кількості днів з туманами в різних регіонах України. Тези доповідей II міжнар. Науково-практичної конференції, 26 червня 2020 р. Полтава, 2020. С. 15-18.