

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра військової підготовки

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему

АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ К.Г. АБРАМОВИЧ ПРОГНОЗУ ВИСОТИ  
НИЖНЬОЇ МЕЖІ ХМАРНОСТІ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Спеціальність 103 Наука про Землю  
Спеціалізація «Метеорологія»  
курсанта групи МВМ-19  
Лілії ПАЛЬЧУК

Керівник:  
полковник Сергій РОМАНЕНКО  
Рецензент: к.геогр.н.  
Лариса НЕДОСТРЕСЛОВА

Одеса – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра військової підготовки

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 103 Науки про Землю  
(шифр і назва)

Спеціалізація Метеорологія

Освітня програма «Організація метеорологічного та геофізичного  
забезпечення Збройних Сил України»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник кафедри військової підготовки

полковник Олег ГРУШЕВСЬКИЙ

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

курсанту ПАЛЬЧУК Лілії

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Адаптація методу К.Г. Абрамович прогнозу висоти нижньої межі хмарності для території України»

керівник роботи Романенко Сергій Едуардович

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

затверджені наказом ректора ОДЕКУ від 16 жовтня 2020 року № 194 «С»

2. Строк подання курсантом роботи: 12 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: архів фактичної погоди (<http://rp5.ua>.) для аеродрому Харків за 2017 р, аеродрому Львів та Київ за 2018 р та аеродрому Одеса за 2019 р; дані з архіву автоматизованого робочого місця синоптика для станції Харків за 2017р, станції Львів та Києва за 2018 р та станції Одеса за 2019 р.

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

- 1) обробити статистичні дані фактичної погоди;
  - 2) виявити випадки з нижньою межею хмарності 300 м. і менше;
  - 3) відібрати предиктори, які ввійдуть до подальших розрахунків;
  - 4) вивести залежності між обраними предикторами і безрозмірними коефіцієнтами, шляхом отримання рівняння множинної регресії;
  - 5) перевірити на справджуваність розроблений метод.
5. Перелік графічного матеріалу: графіки, таблиці, діаграми, розрізи.

## 6. Консультант розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| 1      | к.геогр.н., Міщенко Наталя Михайлівна     |                |                  |
| 2      | к.геогр.н., Міщенко Наталя Михайлівна     |                |                  |
| 3      | к.геогр.н., Міщенко Наталя Михайлівна     |                |                  |

7. Дата видачі завдання: 27 жовтня 2020 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи                                 | Термін виконання етапів роботи | Оцінка виконання етапу |                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
|       |                                                                                   |                                | у %                    | за 4-х бальною шкалою |
| 1.    | Пошук літературних джерел за темою магістерської роботи                           | 27.10 – 01.11.20               |                        |                       |
| 2.    | Відпрацювання 1 та 2-го розділів роботи                                           | 02.11 – 22.11.20               |                        |                       |
| 3.    | Рубіжна атестація                                                                 | 23.11.20                       |                        |                       |
| 4.    | Обробка вхідних даних та розрахункової частини                                    | 24.11 – 02.12.20               |                        |                       |
| 5.    | Відпрацювання 3-го розділу                                                        | 03.12 – 06.12.20               |                        |                       |
| 6.    | Відпрацювання вступної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків | 07.12 – 09.12.20               |                        |                       |
| 7.    | Перевірка роботи на плагіат, підготовка презентації, доповіді                     | 10.12.20                       |                        |                       |
| 8.    | Подання роботи на рецензування                                                    | 11.12.20                       |                        |                       |
| 9.    | Подання роботи до навчальної частини кафедри                                      | 12.12.20                       |                        |                       |
| 10.   | Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)     | 12.12.20                       |                        |                       |

Курсант

( підпис )

Лілія ПАЛЬЧУК

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи підполковник

( підпис )

Сергій РОМАНЕНКО

(ім'я та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота курсанта Пальчук Л.В. на тему «Адаптація методу К.Г. Абрамович прогнозу висоти нижньої межі хмарності для території України».

Робота присвячена адаптації існуючого методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності Абрамович для території України з метою покращення якості прогнозу.

В ході роботи було розроблено розрахунковий алгоритм реалізований у програмі MicrosoftOfficeExcel, який дозволяє обробляти велику кількість статистичних даних на основі яких були виведені рівняння лінійної регресії для різних міст України, в яких відображено залежність між висотою нижньої межі хмарності яка прогнозується та обраними предикторами.

*Актуальність* обраної тематики обумовлена тим, що покращення прогноз висоти нижньої межі хмарності, є дуже важливою і складною задачею метеорологічного забезпечення польотів. Дана робота направлена на збільшення точності прогнозу висоти нижньої межі хмарності, через адаптацію коефіцієнтів в конкретно обраному пункті для збільшення якості метеорологічного забезпечення авіації.

*Мета і завдання дослідження.* Метою даної роботи є розробка регіонального методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності для станції Харків, Львів, Київ та Одеса шляхом статистичної обробки даних.

*Завдання,* що вирішувались у рамках дослідження для досягнення мети:

- обробка статистичних даних фактичної погоди;
- виявлення випадків з висотою нижньої межі хмарності 300 м. і менше ;
- відбір предикторів, які увійшли до подальших розрахунків;
- виведення залежності між обраними предикторами і безрозмірними коефіцієнтами, шляхом отримання рівняння множинної регресії;
- перевірка на справджуваність розробленого методу.

*Об'єкт дослідження* – висота нижньої межі хмарності.

*Предмет дослідження* – предиктори для прогнозу висоти нижньої межі хмарності.

*Методи дослідження.* регресійний аналіз, статистичний аналіз, синтез, дедукція.



*Наукова новизна* отриманих результатів пов'язана з вирішенням проблеми адаптації існуючого методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності для будь-яких метеорологічних підрозділів розташованих на території України і полягає у наступному:

- вперше для покращення справджуваності методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності було виведення рівняння регресії з використанням в якості предикторів метеорологічні величини взяті з методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності Абрамович;

- вперше було запропоновано введення окремих рівнянь лінійної регресії для різних регіонів України з метою покращення справджуваності методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності, на основі статистичних даних цих регіонів;

- вперше в ході роботи був розроблений електронний алгоритм, який дозволяє одночасно обробити велику кількість статистичних даних і отримати у автоматичному режимі значення коефіцієнтів регресії.

Практичне значення отриманих результатів. Виведення рівнянь регресії для різних міст України отриманих на основі їх статистичних даних, дає змогу значно покращити якість прогнозу висоти нижньої межі хмарності.

Одержані в ході роботи коефіцієнти регресії можуть бути використані при адаптації методу прогнозу нижньої межі хмарності Абрамович для конкретного пункту, а також в оперативній практиці метеорологічних підрозділів Збройних Сил України.

*Структура та обсяг роботи.* Робота викладена на 55 сторінках машинописного тексту, містить у собі 17 таблиць, 16 графіків, складається з вступу, 3-х розділів, висновків, переліку посилань (61 найм.), додатки.

*Ключові слова:* нижня межа хмарності, низька хмарність, шарувата хмарність, адаптований метод, метод К.Г. Абрамович.

## ABSTRACT

Master's qualifying work of L.V. Palchuk, cadet, on the topic «Adaptation of the method of forecast of height of the lower cloud boundary K.G Abramovych for different district of Ukraine».

The work is devoted to the adaptation of the existing method of forecasting the height of the lower cloud limit Abramovich for the territory of Ukraine in order to improve the quality of the forecast.

In the course of work the calculation algorithm implemented in Microsoft Office Excel was developed, which allows to process a large number of statistical ones on the basis of which linear regression equations for different cities of Ukraine were derived.

*The relevance* of the subject is due to the fact that improving the forecast of the lower limit of cloudiness is a very important and difficult task of meteorological support of flights. This work is aimed at increasing the accuracy of the forecast of the height of the lower limit of cloudiness, through the adaptation of the coefficients at a specific point to increase the quality of meteorological support of aviation.

*The purpose and tasks of the study.* The purpose of this work is to develop a regional method for forecasting the lower limit of cloudiness for the stations of Kharkiv, Lviv, Kyiv and Odessa by statistical data processing.

The following objectives were formulated to achieve the *research goal*:

- processing of actual weather statistics;
- detection of cases with a lower cloud limit of 300 m or less;
- selection of predictors that were included in further calculations;
- derivation of the relationship between the selected predictors and dimensionless coefficients, by obtaining a multiple regression equation;
- verification of the authenticity of the developed method.

*Study object* is the height of the lower limit of clouds.

*Study subject* - predictors for forecasting the lower limit of cloudiness.

*Research methods:* regression analysis, statistical analysis, synthesis, deduction.

The scientific novelty of the obtained results is connected with the solution of the problem of adaptation of the existing method of forecasting the height of the lower limit of cloudiness for any meteorological subdivisions located on the territory of Ukraine and consists in the following:

- for the first time to improve the validity of the method of forecasting the height of the lower limit of cloudiness was the derivation of the regression equation using as predictors meteorological values taken from the method of forecasting the height of the lower limit of cloudiness Abramovich;

- for the first time, it was proposed to introduce separate linear regression equations for different regions of Ukraine in order to improve the validity of the method of forecasting the height of the lower limit of cloudiness, based on statistics from these regions;

- for the first time in the course of work the electronic algorithm which allows to process at the same time a large amount of statistical data and to receive in an automatic mode values of regression coefficients was developed.

*The practical significance of the results.* Derivation of regression equations for different cities of Ukraine obtained on the basis of their statistical data, allows to significantly improve the quality of the forecast of the height of the lower limit of cloudiness.

The regression coefficients obtained during the work can be used in the adaptation of the method of forecasting the lower limit of cloudiness Abramovich for a specific point, as well as in the operational practice of meteorological units of the Armed Forces of Ukraine.

*Structure and scope of work.* The work is set out on 55 pages of typewritten text, contains 17 tables, 16 graphs, consists of an introduction, 3 sections, conclusions, a list of sources used (61 hired.), applications.

*Keywords:* lower limit of cloudiness, low cloudiness, layered cloudiness, adapted method, method K.G. Abramovich.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                            | 9  |
| 1 Основні відомості про низьку хмарність.....                                                                         | 11 |
| 1.1 Фізичні і метеорологічні умови утворення низької шарувато подібної хмарності.....                                 | 11 |
| 1.2 Синоптичні умови і механізми утворення хмарності.....                                                             | 15 |
| 1.3 Прогноз висоти нижньої межі хмарності за методом К.Г.Абрамович.....                                               | 15 |
| 2 Методи регресійного аналізу.....                                                                                    | 20 |
| 2.1 Регресійні моделі.....                                                                                            | 20 |
| 2.2 Алгоритм регресійного аналізу.....                                                                                | 22 |
| 2.3 Властивість коефіцієнту регресії.....                                                                             | 24 |
| 2.4 Метод найменших квадратів.....                                                                                    | 25 |
| 2.5 Критерії оцінки альтернативних прогнозів.....                                                                     | 27 |
| 3 Адаптація прогнозу висоти нижньої межі хмарності.....                                                               | 31 |
| 3.1 Характеристика вихідних даних та їх первинної обробки.....                                                        | 31 |
| 3.2 Розрахунки коефіцієнтів регресії для чотирьох станцій.....                                                        | 32 |
| 3.2 Порівняння характеристик методу К.Г. Абрамович та адаптованого методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності..... | 36 |
| Висновки.....                                                                                                         | 46 |
| Перелік посилань.....                                                                                                 | 47 |
| Додатки.....                                                                                                          | 51 |

## ВСТУП

Прогноз хмарності займає одне з найважливіших місць при прогнозі погоди як по своєму практичному значенню, так і за складністю прогнозування. Особливу увагу прогнозу хмарності приділяється при складанні авіаційних прогнозів погоди, оскільки хмарність є найважливішим елементом льотної обстановки. Положення нижньої межі хмар входить в визначення погодного мінімуму аеродрому, літака, екіпажу. З хмарністю пов'язані такі небезпечні явища, як обмерзання і бовтанка літаків.[25].

Висота нижньої межі хмарності і горизонтальна дальність видимості є дуже важливими характеристиками при зльоті і посадці літальних апаратів. Найбільшу небезпеку для авіації являє собою низька хмарність. Вона залежить від підготовки льотного складу, характеру вирішуваних задач і т. д. Умовно будемо вважати хмарність низькою, якщо висота її нижньої границі 300 м і менше.

Розробка короткострокового прогнозу ( на термін не більше 12 годин) висоти нижньої межі хмарності в метеорологічних підрозділах здійснюється за рахунок синоптичних і фізико-статистичних способів прогнозу. При розробці прогнозу низької хмарності, загалом в алгоритмі для більшості способів є визначення вихідного району і розрахунку температурно-вологісних характеристик повітря в початковій точці траєкторії і в пункті прогнозу, та їх адвективні зміни [47].

*Актуальність* обраної тематики обумовлена тим, що покращення прогноз нижньої межі хмарності, є дуже важливою і складною задачею метеорологічного забезпечення польотів. Дана робота направлена на збільшення точності прогнозу висоти нижньої межі хмарності, через адаптацію коефіцієнтів в конкретно обраному пункті для збільшення якості метеорологічного забезпечення авіації.

*Метою* даної роботи є розробка регіонального методу прогнозу нижньої межі хмарності для станції Харків, Львів, Київ та Одеса шляхом статистичної обробки даних.

*Завдання*, що вирішувались у рамках дослідження для досягнення мети:

- обробка статистичних даних фактичної погоди;
- виявлення випадків з нижньою межею хмарності 300 м. і менше ;

- відбір предикторів, які увійшли до подальших розрахунків;
- виведення залежності між обраними предикторами і безрозмірними коефіцієнтами, шляхом отримання рівняння множинної регресії;
- перевірка на справджуваність розробленого методу.

*У якості вихідних даних для проведення дослідження використовувалися:*

1) архів фактичної погоди (<http://rp5.ua>.) для аеродрому Харків за 2017 р, аеродрому Львів та Києва за 2018 р та аеродрому Одеса за 2019 р;

2) дані з архіву автоматизованого робочого місця синоптика для станції Харків за 2017р, станції Львів та Києва за 2018 р та станції Одеса за 2019 р;

В першому розділі представлені синоптичні, метеорологічні та фізичні умови утворення низької хмарності, а також її прогнозування.

В другому розділі представлені методи застосування регресійного аналізу і метод найменших квадратів для розрахунків коефіцієнтів регресії.

В третьому розділі представлено порівняння результатів справджуваності між отриманим адаптованим методом та оригінальним методом прогнозу висоти нижньої межі хмарності К.Г. Абрамович для аеродрому Харків, Київ, Львів та Одеса.

## 1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО НИЗЬКУ ХМАРНІСТЬ

### 1.1 Фізичні і метеорологічні умови утворення низької шаруватоподібної хмарності

Хмарами називається система крапель води, кристалів льоду, або і тих і інших елементів, зважених в атмосфері на деякій висоті над землею поверхнею. Хмари формуються під впливом складних термодинамічних процесів[7].

Хмари утворюються, коли водяна пара змінюється на будь-які краплі рідини (конденсація) або кристали льоду (сублимація). Це трапляється при охолодженні повітря нижче точки насичення або безпосередньо під час радіаційного охолодження, або адвекції [3, 61].

У нашій звичайній атмосфері не може бути хмар без пилу. Частинка пилу - це ядро, яке при певній вологості стає центром конденсації водяної пари, утворюючи частину хмари; і сукупність цих частин утворюють хмару.

Ця конденсація пари навколо ряду частинок пилу у видимому вигляді формують величезну різноманітність хмарних форм. Є два чіткі шляхи утворення хмар. По-перше, коли шар повітря охолоджується нижче температури точки роси; або маса теплої та вологої повітря піднімається в холодну та суху повітряну масу [29, 58].

Хмари мають певні характерні форми, які по суті однакові у всіх частинах світу. Цей факт дає змогу давати назви різним типовим формам, і ці назви використовуються спостерігачами по всьому світу. Отже, хмарні спостереження, де б вони не проводились, порівняльні [56].

Хмари нижнього ярусу можуть простягатися на горизонтальні відстані до сотні або тисячі кілометрів і вертикально до висоти 1-2 км. Вони можуть спостерігатися в районі теплої фронти і фронти оклюзії, в теплому секторі і в центральній частині циклона. Також хмари нижнього ярусу утворюються на краях антициклону і у випадку високої вологості в повітряній масі вони можуть навіть виникнути в центральній частині антициклону [1, 6, 37, 53].

Висота нижньої межі хмар дуже важлива для авіації. При її визначенні варто пам'ятати, що нижня межа шаруватих (St) або шарувато-купчастих (Sc)

хмарчасто нечітка і розмита, і що перехід від серпанку до хмарності інколи відбувається в шарі товщиною 50-200 м. Тому нижня межа хмар яка спостерігається, залежить від метода її спостереження [3, 17].

Визначено, що нижня межа хмарності висотою 200 м і менше протягом 3–5 хвилин може змінити свою висоту приблизно на 50 %.

Багато неприємностей в прямому і переносному сенсі доставляє синоптикам и льотному складу так звана хмарна пелена. Це дуже тонкий шар шаруватоподібної хмарності, яка спостерігається на висотах 50–250 м. Ця пелена спостерігається тільки зимою в північних районах. Інколи хмарну пелену можна зафіксувати за допомогою інструментальних приборів вимірювань нижньої межі хмарності, які використовуються на даному аеродромі. Хмарну пелену можна також визначити з борта повітряного судна. Інколи в хмарній пелені спостерігається сильне обмерзання [15, 16].

Процес утворення шаруватої (*St*) і шарувато-купчастої (*Sc*) хмарності в загальному вигляді представляється наступним чином. В повітряній масі яка рухається під впливом динамічних факторів і підстильної поверхні, з якою відбувається теплообмін і вологообмін, змінюється з часом і в просторі температура повітря і вміст водяної пари. При цьому в самій повітряній масі перерозподіл тепла і вологи відбувається під впливом вертикальних рухів. В результаті цього в окремих об'ємах і шарах повітря може наступити стан насичення, початися конденсація водяної пари і утворення хмарності [6, 19, 23].

В теоретичних дослідженнях по динаміці утворення шаруватої хмарності зазвичай розглядаються процеси теплообміну і вологообміну. В загальному випадку прогноз виникнення і еволюції шарувато подібної хмарності потрібне рішення системи диференціальних рівнянь для граничного шару, включаючи рівняння руху, рівняння нерозривності, рівняння притоку тепла і вологи. Початкові значення метеорологічних величин і їх розподіл в просторі покладаються відомими [22, 36, 48].

Врахування всіх вхідних в ці рівняння факторів представляє великі труднощі. Тому що в практиці чисельний прогноз низької хмарності, заснований на вирішенні системи диференціальних рівнянь, не застосовується [45, 52].

Розробка короткострокового прогнозу низької хмарності в метеопідрозділах здійснюється за рахунок синоптичних і фізико-статистичних способів прогнозу. В даних способах використовують наступні



фактори, які грають визначну роль в утворенні низької шарувато подібної хмарності:

- адвекція вологи і тепла з інших районів або випаровування вологи з підстильної поверхні;
- вплив підстильної поверхні;
- турбулентний обмін в пограничному шарі;
- упорядковані вертикальні рухи повітря [50].

В залежності від вкладу тих чи інших факторів умова виникнення низької шарувато подібної хмарності бувають різними. Більш частіше виникнення шаруватої хмарності спостерігається в результаті адвекції тепла, при якій відбувається охолодження повітря від холодної підстильної поверхні [13].

При адвекції тепла адвентивні і трансформаційні зміни температури і вологості повітря є орієнтованими показниками появи хмар нижнього рівня. Так по величині адвентивних змін температури і точки роси, можна оцінити трансформаційні їх зміни в процесі руху повітря, або в нижньому шарі атмосфери (приблизно 1 км)[20, 31].

Трансформаційні зміни температури, як правило, по модулі більші зміни точки роси. При адвекції тепла це призводить до локального зменшення дефіциту точки роси, по маршруту переміщення повітряної маси і конденсації водяного пару. При адвекції холодного повітря, навпаки, спостерігається локальне збільшення дефіциту точки роси. Зазначені вище положення будуть справедливі тільки в тих випадках, коли до пункту прогнозу переноситься переміщується повітря, з більш низькими дефіцитами [12, 19].

Адвентивні зміни температури і вологості повітря (а також і трансформаційні зміни) залежать від швидкості переносу, збільшуючись з довжиною траєкторії. Та при великих швидкостях переносу істотне значення має різниця радіаційних умов уздовж траєкторії, особливо в холодний період року [11, 14].

Турбулентний тепло- і волого обмін, і вертикальні рухи також впливають на виникнення та еволюцію низької хмарності. В процесах виникнення низької хмарності розглядають два типа турбулентності: механічна, яка грає головну роль в холодний період року, і термічна, спостерігається в теплий період року.

Інтенсивність турбулентності в загальному залежить від швидкості вітру в граничному шарі, шорсткості підстильної поверхні і стратифікації нижнього шару атмосфери. Разом з цим турбулентність впливає на розподіл метеорологічних величин. Зокрема, при інтенсивному турбулентному обміні градієнт температури наближується до адіабатичного, а значення вологості вирівнюються по висоті. Тому при сталому стані в пограничному шарі атмосфери вертикальні профілі метеорологічних величин дозволяють опосередковано судити про інтенсивність турбулентності [32,38].

Турбулентний обмін сприяє створенню приземних і припіднятих інверсій, що, в свою чергу, визначає умову виникнення низької хмарності, висоти нижньої і верхньої її границі. Інтенсивна турбулентність може стати причиною, яка буде перешкоджати утворенню низької хмарності. При збільшенні потужності активного турбулентного шару запасом вологи і адіабатичним зниженням температури в частинці яка піднімається недостатнього для досягнення стану насичення. Крім того, при інтенсивній турбулентності відбувається перетворення стратифікації пограничного шару повітря до знищення інверсії [2, 44].

Зміна температури і вологості повітря при вертикальних рухах, як правило, залежить від стратифікації, розподілу вологості з висотою і синоптичної обстановки [17].

Низька хмарність утворюється та існує при стійкості низьких шарів повітря. В цьому випадку при будь якому розподілі вологи до зменшення дефіциту точки роси приводять висхідні вертикальні рухи ( $w > 0$ ). Отже, вірогідність появи хмарності залежить від початкового значення дефіциту точки роси і від швидкості висхідних вертикальних рухів [39, 54].

Знак вертикальних рухів добре узгоджується з характером локальних змін тиску і адвекції температури: в зонах падіння тиску і адвекції тепла рухи висхідні, в зонах росту тиску і адвекції холоду – низхідні. Крім того, кривизна ізобар впливає на знак вертикальних рухів. Так циклонічна кривизна посилює висхідні і послаблює низхідні рухи в пограничному шарі, антициклон – навпаки.

Кількісне врахування впливу вертикальних рухів на зміну температури і вологості повітря у верхній частині граничного шару, де формується низька хмарність, є дуже важливим. Також важливе якісне врахування впливу

вертикальних рухів на утворення і еволюцію хмарності шляхом визначення знаку [46].

## 1.2 Синоптичні умови і механізми утворення хмарності

Типовими синоптичними умовами, при яких утворюється низька хмарність є: західна периферія антициклону і теплий сектор циклону при адвекції тепла; тилова частина циклону і передня частина антициклону при адвекції холоду; високий антициклон який послаблюється [30, 49].

Механізм утворення хмарності нижнього рівня розділяється на два випадки: 1) коли надходження вологи в нижні шари атмосфери обумовлене випаровуванням з підстильної поверхні; 2) коли в нижній частині тропосфери спостерігається адвекція тепла і вологи з двох районів.

В першому випадку сприятливі умови утворюються в передній частині антициклону що розвивається і в центральній частині антициклонів.

Сприятливі умови появи хмарності високий вміст вологи повітря в приземному шарі, коли відносна вологість біля землі  $R \geq 85\%$ ;

- активний турбулентний обмін, який в передніх частинах антициклонів, які розвиваються, практично завжди існує, а в малорухомих спостерігається при вертикальних градієнтах температури в нижньому шарі атмосфери більше  $0,5^\circ\text{C}/100\text{ м}$ ;

- наявність інверсії осідання, яка знаходиться вище рівня конденсації [26].

Наявність низхідних упорядкованих рухів і радіаційне пониження температури впливає на виникнення при піднятої інверсії. У зв'язку з цим під інерційний шар повітря буде ізолюватися від впливу шарів які розташовуються вище. Активний турбулентний обмін буде спостерігатися тільки в шарі від землі і до нижньої границі інверсії ( $Ri \leq 1$ ). Накопичення вологи під шаром інверсії сприяє досягненню в деякому шарі повітря стану насичення, тобто виникненню хмарності [27, 28].

Нижня межа цих хмар спостерігається на рівні конденсації і буває відносно рівною і чіткою. Збільшення відносної вологості повітря в нижніх шарах атмосфери в цей період при антициклонічному режимі погоди сприяє

між добовому пониженню температури повітря, а також випадінню опадів. Рідко утворені хмари в антициклоні є результатом утворення в нічні часи туману, який піднімається при сході Сонця [8].

Причиною розмиття хмар в антициклоні є посилення низхідних рухів в вільній атмосфері. Вони посилюються через регенерацію або часткове посилення антициклону при надходженні нової порції холодного повітря. В результаті цього спостерігається опускання інверсії осідання, яке призводить до розмивання хмарності зверху.

В другому випадку при адвекції теплого вологого повітря по західній периферії антициклону в передній частині і теплому секторі циклону появи низькою хмарності сприяє трансформаційне охолодження повітря в пограничному шарі атмосфери [41, 60].

У вихідному районі повітря знаходиться в стані термічної рівноваги, що визначається нормальним розподілом температури повітря і точки роси з висотою. Верхній рівень шаруватої хмарності, як правило, знаходиться в шарі інверсії, інколи досягає її верхньої границі [44].

Нижня границя хмарності нечітка та нерівна. Під хмарами часто спостерігається димка. При синоптичній ситуації яка не міняється і збереженні в даному районі адвекції тепла і вологи, локальне послаблення турбулентного обміну з часом приводить до зниження нижньої границі хмар. При цьому проходить дифузія водяної пати і випадіння хмарних елементів в підхмарний шар, вологовміст цього шару підвищується, що може привести до утворення в ньому хмарності. При початковому низькому положенні нижньої межі хмар її пониження приводить до появи хмарності [9].

Розсіювання хмар, які утворились при адвекції тепла і вологи, відбувається в результаті надходження в даний район більш сухого і холодного повітря [51].

Утворення низької хмарності може бути також пов'язане з адвекцією теплого і вологого повітря на південній периферії циклону. Інверсія температури під впливом посилення турбулентності при наближенні теплого фронту часто при піднімається, а потім розмивається. В подальшому роль затримуючого шару виконує фронтальна поверхня [10].

В період коли інверсія знищується, перед фронтом може спостерігатися підвищення нижньої границі шаруватої хмарності або її розсіяння, а в зоні фронту хмарність знижується [33, 42].

Таким чином, аналіз фізичних умов виникнення низької хмарності при різних синоптичних положеннях дозволяє сформулювати перелік основних термодинамічних та інших характеристик атмосфери, які визначають формування хмарності:

- значення температури повітря і точки роси в початковий момент часу в пункті прогнозу;
- значення прогностичної температури повітря на період прогнозу;
- адвентивне значення температури повітря і точки роси в початку траєкторії( в початковому районі);
- дефіцит точки роси в пункті прогнозу і в початковому районі;
- адвентивні зміни температури повітря і точки роси;
- вертикальний градієнт температури шару;
- швидкість вітру в пункті прогнозу і середня швидкість по траєкторії переміщення повітря.

Характер вертикальних рухів і їх інтенсивність в пограничному шарі атмосфери можуть бути враховані якісно в співвідношенні з синоптичним положенням [10, 24, 43].

### 1.3 Прогноз висоти нижньої межі хмарності за методом К.Г. Абрамович

Мабуть, тільки два явища погоди - низька хмарність і тумани більш за все залежать від місцевих умов. Через це розроблено дуже багато методів прогнозу одного і другого явища [40].

Прогнозування нижньої межі хмарності та видимості поблизу поверхні - це важкий виклик для операторів служби прогнозу погоди. Безпека та ефективність експлуатації повітряного руху сильно залежить від точних і своєчасних прогнозів атмосферних явищ. Низька хмарність та несприятливі умови видимості можуть сильно зменшити ефективність потоку транспорту в зоні ЗПС [15].

Прогноз хмарності представляє собою найбільш важливу і важку частину прогнозу погоди для авіації. По-перше хмарність є одним із елементів льотної обстановки ,який визначає мінімум екіпажа, літального апарату і аеродрому. По-друге, процес виникнення не конвективної

хмарності в основному визначається зміною поля температури, вологості і вертикальних рухів. Тому прогноз хмарності залежить від якості прогнозу вищеперерахованих метеорологічних величин. По-третє, для розробки прогнозу хмарності необхідно об'єктивна інформація про фактичний стан поля хмарності. Для її отримання синоптик окрім даних приземних карт погоди повинен використовувати дані повітряної і радіолокаційної розвідки погоди, знімки хмарності з штучних супутників землі [47].

Прогноз низької шаруватоподібної хмарності в більшості випадків являється багатофазовим кількісним прогнозом (прогноз форми хмар – якісним), та інколи може бути і альтернативним, якщо приймається формування «очікується хмарність вище або нижче якоїсь висоти». Способи прогнозу низької хмарності в загальному базуються на регресивному або дискретному методі аналізу [25].

При розробці прогнозу хмар на термін до 3 год. основу прогнозу складає інформація про хмарність в даний момент часу. В подальшому до цієї інформації вводять поправки на еволюцію хмарності з урахуванням місцевих умов аеродрому і її добового ходу.

При прогнозі з великою завчасністю (на термін 6-24 год) основою прогнозу є дані про розподіл хмарності і метеорологічних величин на синоптичних картах погоди. Аналіз цих карт та іншої інформації дозволяє прогнозісту оцінити зміни, які відбулись в синоптичному положенні в умовах погоди над конкретним районом. Розробка прогнозу низької хмарності в цьому випадку базується, як на синоптичному методі, так і на застосування фізико-статистичних способів прогнозу [60].

Завчасність прогнозу хмарності визначається характером задачі яка вирішується. Більшість фізико-статистичних способів дозволяють розробити прогноз на термін 6-12 год, також існують способи для прогнозу на термін від декількох хвилин до 1-3 годин.

При розробці прогнозу низької хмарності з завчасністю 6 год і більше, загалом в алгоритмі для більшості способів є визначення вихідного району і розрахунку термогігрометричних характеристик повітря в початковій точці траєкторії і в пункті прогнозу, та їх адвентивні зміни.

Прогноз нижньої межі хмар за методом К.Г. Абрамович базується на регресійному методі аналізу. В рівняннях відображається зв'язок зміни висоти хмар в пункті прогнозу з аналітичними прогнозами НМХ і

дефіциту точки роси в початку траєкторії. Завчасність прогнозу складає 9 год.

Коефіцієнти регресії одержали по результатам спостережень в європейській частині Росії[26].

$$H = 0.277H_0 + 46.8D_0 + 6.45Td' + 176 \quad (1.1)$$

де  $H_0$  - висота нижньої межі хмарності в пункті прогнозу;

$D_0$  - значення дефіциту в пункті прогнозу;

$Td'$  - значення температури точки роси в початковому пункті.

Для розрахунку початкової точки траєкторії рекомендується використовувати середній вітер уздовж траєкторії переміщення частинки повітря на карті  $AT_{850}$  або по формулі

$$V_{0-300} = 0.91 Vg \quad (1.2)$$

Загальна справджуваність прогнозу висоти НМХ, розроблених по рівняннях регресії (1.1), складає 71-73%.

Загальна справджуваність прогнозу, розроблена на 6 год, складає 72%, на 12 год - 76%.

В оперативній роботі дуже часто розробляють прогноз хмарності для забезпечення зльоту і посадки літальних апаратів. В цих випадках використовують способи прогнозу малої завчасності – від декількох хвилин до 3 годин [47].

## 2 МЕТОДИ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ

### 2.1 Регресійні моделі

Регресійний аналіз використовується, якщо відношення між змінними можуть бути виражені кількісно у виді деякої комбінації цих змінних. Отримана комбінація використовується для передбачення значення, що може приймати цільова (залежна) змінна, яка обчислюється на заданому наборі значень вхідних (незалежних) змінних. У найпростішому випадку для цього використовуються стандартні статистичні методи, такі як лінійна регресія [55].

Регресійний аналіз є основним статистичним методом побудови математичних моделей об'єктів або явищ по експериментальним даним. Ці моделі зв'язують кількісні змінні –результуючу і пояснюючі (в різних областях використовуються різні назви цих змінних: вихід, цільова, вихідна або результуюча ознака, відгук, результативна, ендогенна або залежна змінна; факторні, прогнозні, екзогенні змінні, фактори, фактор-аргументи, предикатори та інше [57, 59].

Розглянемо загальну схему регресійного аналізу. Нехай результуюча змінна  $Y$  пов'язана з деякими пояснюючими змінними  $x_1, \dots, x_k$ , які зручно представляти у вигляді компонент вектора  $x = [x_1, \dots, x_k]^T$ , (т-транспонування). Зв'язок являється стохастичним: значення у змінної  $Y$ , отримані в різних експериментах при фіксованих значеннях вектора  $x$ , випадковим чином флюктує навколо деякого невідомого рівня  $\eta(x)$ :

$$Y \equiv Y(x) = \eta(x) + \varepsilon \quad (2.1)$$

де друга складова визначає випадкове відхилення результуючої змінної від величини  $\eta(x)$ . Випадкові відхилення  $\varepsilon$  можуть слугувати проявом впливу не врахованих у векторі  $x$  (і може бути, випадкових) факторів, випадковими похибками вимірів результуючої змінної та іншими причинами, які більш детально будуть обмірковуватися нижче. Середнє значення відхилень



приймається рівним нулю, тому математичне сподівання результуючої змінної співпадає зі значенням функції  $\eta(x)$ .

$$M\{Y(x)\} = \eta(x) \quad (2.2)$$

Це рівняння називається регресією (рівнянням регресії), а функція  $\eta(x)$  - функцією регресії [35].

Регресійний аналіз не можна використовувати для визначення наявності зв'язку між змінними, оскільки наявність такого зв'язку і є передумова для застосування аналізу.

До регресійної моделі відносяться наступні параметри і змінні:

- невідомі параметри, що позначаються як  $\beta$ , і які задають скаляри або вектор;

- незалежні змінні,  $X$ ;

- залежна змінна,  $Y$ .

У різних сферах застосування, може використовуватися різна термінологія замість понять залежних та незалежних змінних  $Y, X$ :

$$Y \approx f(X, \beta) \quad (2.3)$$

Наближення зазвичай формалізують як  $E(Y|X) = f(X, \beta)$ . Для проведення регресійного аналізу необхідно визначити форму функції  $f$ . Іноді форма функції ґрунтується на знаннях про взаємовідношення між  $X$  і  $Y$  і не покладається на дані. Якщо таких знань немає, обирають гнучку або зручну форму для визначення  $f$  [59].

Припустимо, що вектор невідомих параметрів  $\beta$  має довжину  $k$ . Для здійснення регресійного аналізу необхідно надати інформацію про залежну змінну  $Y$ :

- якщо спостерігали  $N$  точок даних у формі  $(Y, X)$ , де  $N < k$ , більшість класичних методів регресійного аналізу не можна виконати: оскільки система рівнянь, що визначає регресійну модель є недовизначеною, в ній не достатньо даних для відновлення  $\beta$ .

- якщо спостерігалось  $N = k$  точок даних, а функція  $f$  є лінійною, рівняння  $Y = f(X, Y)$  можна розв'язати точно, а не наближено. Задача спрощується до

вирішення множини з  $N$  рівнянь із  $N$  невідомими (елементами  $\beta$ ), які мають унікальне рішення за умови що  $X$  лінійно незалежні. Якщо  $f$  не є лінійною, рішення може не існувати, або може існувати багато рішень.

- найбільш типовою ситуацією є випадок, де спостерігають  $N > k$  точок даних. В такому випадку, існує достатньо інформації з даних, для того щоб оцінити унікальні значення  $\beta$  які в деякому розумінні підходять найкраще, а регресійна модель у застосування до даних може розглядатися як перевизначена система для  $\beta$  [21].

В останньому випадку, регресійний аналіз надає засоби для:

1. Знаходження рішення щодо невідомих параметрів  $\beta$  які будуть, наприклад, мінімізувати відстань між виміряними і прогнозованими значеннями залежної змінної  $Y$  (що відомо як метод найменших квадратів).

2. При певних статистичних припущеннях, регресійний аналіз використовує надлишок інформації для надання статистичної інформації про невідомі параметри  $\beta$  і передбачені значення залежних змінних  $Y$  [59].

## 2.2 Алгоритм регресійного аналізу

Нехай у точках  $x_n$  незалежної змінної  $x$  отримані виміри  $Y_n$ . Потрібно знайти залежність середнього значення величини  $\bar{Y}$  від величини  $x$ , тобто  $\bar{Y}(x) = f(x/a)$ , тобто де  $a$  — вектор невідомих параметрів  $a_i$ . Функцію  $f(x/a)$  називають функцією регресії. Звичайно припускають, що  $f(x/a)$  є лінійною функцією параметрів  $a$ , тобто має вигляд:

$$f(x|a) = \sum_{i=1}^I a_i \varphi_i(x) \quad (2.4)$$

де  $f_i(x)$  — задані функції.

У цьому випадку матрицю  $A_{ni} = f_i(x_n)$  називається регресійною матрицею [55].

Для визначення параметрів  $a_i$  звичайно використовують метод найменших квадратів, тобто оцінки  $a_i$  визначають із умови мінімуму функціонала:

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \frac{(Y_n - \sum_i A_{ni} a_i)^2}{\sigma_n^2} \quad (2.5)$$

і з мінімуму функціоналу:

$$\Phi = \sum_{n,m} (Y_n - \sum_i A_{ni} a_i) (R^{-1})_{nm} (Y_m - \sum_i A_{mi} a_i) \quad (2.6)$$

для корельованих вимірів з кореляційною матрицею  $R$  [21, 59]

Як функції  $f_i(x)$  при невеликих  $I(I \geq 5)$  звичайно служать степеневі функції  $f_i(x) = x^i$ . Часто використовують ортогональні й нормовані поліноми на множині  $x_n$ :

$$\varphi_i(x) = \sum_{k=1}^i c_k^i x^k, \quad \sum_n \varphi_i(x_n) \sigma_n^{-2} \varphi_j(x_n) = \delta_{ij} \quad (2.7)$$

У цьому випадку легко знайти оцінку  $\tilde{a}_i$ .

$$\tilde{a}_i = \sum_n \varphi_i(x_n) Y_n \quad (2.8)$$

Звідси випливає, що обчислення  $\tilde{a}_i$  не залежить від обчислення інших  $\tilde{a}_j$  [3].

Популярне використання як  $f_i(x)$  сплайнів  $B_i(x)$ , які мають дві основні властивості:

1  $B_i(x)$  — поліном заданого степеня;

$B_i(x)$  відмінний від нуля в околі точки  $x_i$ .

При пошуку функції регресії у вигляді (1) природно виникає питання про кількість членів  $I$  у сумі (1). При малому значенні  $I$  не можна досягти гарного опису  $\bar{Y}(x)$ , а при великому — великі статистичні помилки функції регресії [4].

### 2.3 Властивість коефіцієнту регресії

Коефіцієнт регресії – це параметр рівняння регресійної залежності між двома ознаками варіаційного ряду. Разом з тим він є мірою регресії (зміни) показника  $Y$  відносно показника  $X$  або навпаки –  $Y$  по  $X$ . Коефіцієнт регресії показує, наскільки зміниться ознака ( $X$  або  $Y$ ) при зміні іншої відповідної ознаки ( $Y$  або  $X$ ) на одиницю міри тієї або іншої ознаки [21].

Коефіцієнт регресії  $Y$  по  $X$  ( $b_{yx}$ ) або  $X$  по  $Y$  ( $b_{xy}$ ) визначається за такими аналогічними формулами:

$$b_{yx} = r \frac{\sigma_{y \cdot i_y}}{\sigma_{x \cdot i_x}}, \quad b_{xy} = r \frac{\sigma_{x \cdot i_x}}{\sigma_{y \cdot i_y}} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт регресії так само, як і коефіцієнт кореляції, характеризує лінійний зв'язок, коли збільшення (або зменшення) однієї змінної викликає пропорційне збільшення (або зменшення) другої. Коефіцієнт регресії відображає залежність між  $X$  і  $Y$  в нормованих одиницях виміру, тобто якщо коефіцієнт кореляції – число не іменоване, то коефіцієнт регресії – число іменоване [59].

Помилка репрезентативності лінійної регресії визначається за наступними аналогічними формулами:

$$m_{b_{yx}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}, \quad m_{b_{xy}} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}} \quad (2.10)$$

При цьому, якщо середні квадратичні відхилення визначались за інтервальними рядами, то в наведених формулах визначення помилки репрезентативності  $\sigma_y$  і  $\sigma_x$  повинні перемножатись на величину відповідного класового інтервалу, тобто  $\sigma_y \cdot i_y$  і  $\sigma_x \cdot i_x$ .

Достовірність коефіцієнту регресії визначається за критерієм Стюдента з числом степеней вільності  $k = n - 2$ .

Критерій достовірності різниці ( $t$ ) між коефіцієнтами регресії вибірок, що порівнюються, визначається за формулою із застосуванням коефіцієнта Стьюдента:

$$t = \frac{b_x - b_y}{m_{db}} \geq t_s \quad (2.11)$$

В цій формулі, крім значень  $b_y$  і  $b_x$ , застосовується показник  $m_{db}$  – це помилка між помилками коефіцієнтів регресії, що порівнюються:

$$m_{db} = \sqrt{\frac{m_x^2}{\sum(x_1 - \bar{x})^2} + \frac{m_y^2}{\sum(y_1 - \bar{y})^2}} \quad (2.12)$$

## 2.4 Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів (МНК) є одним із методів регресійного аналізу, який використовується для статистичного оцінювання параметрів регресійної моделі за емпіричними даними. Згідно з цим методом параметри моделі повинні відповідати такому рівнянню регресії, що забезпечує найменше значення суми квадратів відхилень емпіричних даних від тих, що обчислені за рівнянням регресії. Так, з двох різних наближень тієї ж самої емпіричної функції, кращим вважається те, для якого сума квадратів відхилення має найменше значення [4].

Метод найменших квадратів (МНК), завдяки широкій сфері застосування, посідає виняткове місце серед методів математичної статистики. Задачею МНК є оцінка закономірностей, які спостерігаються на тлі випадкових коливань, та її використання для подальших розрахунків, зокрема, для прогнозів. Особливу роль відіграють МНК у геофізиці, визначаючи концепцію й методологію розв'язання оберненої задачі геофізики.

Задача МНК розв'язується шляхом параметричної оцінки функції регресії, що описує залежність однієї величини  $Y$ , значення якої ( $y_i$ ) спостерігають з випадковими похибками ( $\theta_i$ ), від групи невинуватених

величин  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . Функція регресії - це функція  $k$  змінних  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , яка є математичним сподіванням величини  $Y$  при  $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_k = x_k$ :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = M(Y/X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_k = x_k) \quad (2.13)$$

Вважається, що функція регресії належить заданій параметричній сім'ї  $f(x_1, x_2, \dots, x_k, a_1, a_2, \dots, a_m)$  де  $a_1, a_2, \dots, a_m$  – параметри, що підлягають оцінці за МНК. Оцінки параметрів дають можливість одержати параметричну оцінку функції регресії:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = f(x_1, x_2, \dots, x_k, \check{a}_1, \check{a}_2, \dots, \check{a}_m) \quad (2.14)$$

Основи метода найменших квадратів були розроблені Карлом Фрідріхом Гауссом у зв'язку з задачами, що вирішуються теорією помилок, тобто математичною теорією, яка досліджує точність результатів вимірювань. Доречі, Гаусс настільки ретельно провів дослідження нормального розподілу випадкових похибок, що їх крива щільності ймовірностей має назву гауссіани [34].

Узагальнення умов застосування методу найменших квадратів сформульовано у теоремі Гаусса – Маркова.

Теорема Гаусса – Маркова. Якщо прийняти припущення моделі:

1.  $Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_m X_{im} + \varepsilon_i$ , де  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  – обсяг вибірки (кількість емпіричних точок);

2.  $X_i$  – детермінована величина (у загальному випадку це матриця результатів  $n$  спостережень  $m$  - вимірної випадкової величини  $X$ , що відповідає сукупності зовнішніх факторів);

3.  $M(\varepsilon_i) = 0, M(\varepsilon_i^2) = V(\varepsilon_i) = \delta^2$ , де  $V(\varepsilon)$  – матриця коваріацій (попарних варіацій) похибок,  $\varepsilon_i$  – похибка  $i$ -го вимірювання;

4.  $M(\varepsilon_i \varepsilon_s) = 0$  при  $t \neq s$ , де  $t$  і  $s$  – номери вимірювань,

то оцінки параметрів  $b_0, b_1, \dots, b_m$ , які отримані за МНК, мають найменшу дисперсію серед усіх лінійних не зсунутих оцінок, тобто ці оцінки є ефективними [18].

Розглянемо застосування методу найменших квадратів до визначення параметрів рівняння регресії на прикладі системи двох випадкових величин  $X$  і  $Y$ , тобто так званий випадок парної регресії [4].

Для лінійної моделі маємо умовне рівняння:

$$f(x, b_0, b_1) = b_0 + b_1 x \quad (2.15)$$

За методом найменших квадратів складемо функцію суми квадратів нев'язок:

$$S = \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (2.16)$$

та знайдемо її частинні похідні за невідомими оцінками параметрами  $b_0$  і  $b_1$ , які відповідно до необхідної умови екстремуму повинні дорівнювати нулю. У результаті отримуємо систему рівнянь. Після перетворень система нормальних рівнянь набуває вигляду:

$$\begin{cases} b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases} \quad (2.17)$$

Якщо кожне рівняння поділити на обсяг вибіркової сукупності  $n$ , то отримуємо систему нормальних рівнянь, коефіцієнтами якої є оцінки основних числових характеристик двовимірної випадкової величини:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \bar{x} = \bar{y}; \\ b_0 \bar{x} + b_1 \overline{x^2} = \overline{xy}; \end{cases} \quad (2.18)$$

## 2.5 Критерії оцінки альтернативних прогнозів

В якості критеріїв успішності альтернативних прогнозів використовуються:

1. Повторюваність прогнозів які виправдались (справджуваність прогнозів)

$$u = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} \quad (2.19)$$

Ця величина для методично правильних прогнозів завжди більше 0,5 [23].

Уразі альтернативного прогнозу таблиця спряженості (табл. 2.1) приймає вид табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Загальний вигляд таблиці сполучення для альтернативних прогнозів

| Здійснилася | Передбачене |          | $\Sigma$ |
|-------------|-------------|----------|----------|
|             | $\Xi_1$     | $\Xi_2$  |          |
| $\Xi_1$     | $n_{11}$    | $n_{12}$ | $n_{10}$ |
| $\Xi_2$     | $n_{21}$    | $n_{22}$ | $n_{20}$ |
| $\Sigma$    | $n_{01}$    | $n_{02}$ | $N$      |

В якості оцінок справджуваності прогнозів на наявність і відсутність явища в залежності від мети оцінки можуть додатково використовуватися так і критерії успішності:

а) повторюваність прогнозів які справдились на наявність  $u_H$  і відсутність  $u_{\text{відс}}$  явища по відношенню до загального числа випадків:

$$u_H = \frac{n_{11}}{N}, u_{\text{от}} = \frac{n_{22}}{N} \quad (2.20)$$

б) повторюваність прогнозів які справдились на наявність і відсутність явища по відношенню до загального числа фактично спостерігалися випадків



наявності і відсутності явища [5]:

$$u'_{H} = \frac{n_{11}}{n_{10}}, u'_{OT} = \frac{n_{22}}{n_{20}} \quad (2.21)$$

в) Повторюваність справджуваності прогнозів на наявність і відсутність явища по відношенню до загального числа прогнозів з даного формування:

$$u''_{H} = \frac{n_{11}}{n_{01}}, u''_{OT} = \frac{n_{22}}{n_{02}} \quad (2.22)$$

## 2. Критерій надійності А. Н. Багрова

$$H = \frac{u - u_0}{1 - u_0}, \text{ де} \quad (2.23)$$

$$u_0 = \frac{n_{01}n_{10} + n_{02}n_{20}}{NN} \quad (2.24)$$

З цього визначення видно  $u_0$ , що заповнення таблиці спряженості відбувається не чисто випадковим чином, а так, що кліматичні дані про наявність  $n_{10}$  і відсутності  $n_{20}$  явища, кількість формувань прогнозів під  $n_{01}$  по  $n_{02}$  задаються постійними для конкретного району і способу. Матриця спряженості для випадкових прогнозів в загальному випадку:

$$n_{ij} = \frac{n_{i0}n_{0j}}{N} \quad (2.25)$$

Таким чином, Критерій О. Н. Багрова характеризує відношення якості методичних і ідеальних прогнозів [34].

## 3. Критерій точності А. М. Обухова

Критерій А.М. Обухова визначає відношення різниці якості методичного та випадкового прогнозів до різниці якості ідеального і випадкового кліматологічного прогнозів

$$Q = \frac{u - u_0}{1 - u'_0} \quad (2.26)$$

де

$$u'_0 = \frac{n_{10}n_{10} + n_{20}n_{20}}{N^2} \quad (2.27)$$

В цьому випадку випадковий прогноз відрізняється від випадкового прогнозу, розглянутого в критерії А.Н. Багрова, тим, що кількість прогнозованих значень одно кліматологічної повторюваності випадків з наявністю і відсутністю явища [5].

### 3 АДАПТАЦІЯ ПРОГНОЗУ ВИСОТИ НИЖНЬОЇ МЕЖІ ХМАРНОСТІ

#### 3.1 Характеристика вихідних даних та їх первинної обробки

На підставі даних архіву фактичної погоди (<http://rp5.ua>) був сформований масив даних з випадками низької хмарності на станціях Харків за 2017 р, Львів за 2018р, Київ за 2018 р та Одеса за 2019 р, висота нижньої межі якої не перевищувала 300 м. Випадки низької хмарності з висотою нижньої межі понад 300 м не розглядалися.

У якості вихідних даних для проведення дослідження використовувалися карти погоди взяті з автоматизованого місця синоптика. На картах відбиралися значення висоти нижньої межі хмарності та дефіциту точки роси у строки спостереження, а також значення температури точки роси у початковий момент часу, яка знаходилась за методом зворотної траєкторії на 3, 6, 9, та 12 год. Ці дані є предикторами з методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності Абрамович, в подальшому з них складався масив вибірки по якій велись розрахунки коефіцієнти регресії.

Ці предиктори є дуже важливими факторами для формування низької хмарності, оскільки адвективні зміни температури точки роси, як і температури повітря є необхідними умовами цієї хмарності, а значення дефіциту точки роси біля поверхні землі показує ступінь зволоженості повітряної маси і, відповідно, характеризує імовірність досягнення її насичення при додатковому охолодженні.

На першому етапі роботи за допомогою визначених предикторів в програмі Microsoft Office Excel були розраховані коефіцієнти регресії для Харкова, Києва, Львова та Одеси, далі були складені адаптовані рівняння для цих станцій.

На другому етапі для методу Абрамович та адаптованого методу, в програмі Microsoft Office Excel було побудовано таблиці спряженості та поведена оцінка справджуваності за допомогою критеріїв Багрова, Обухова і загальної справджуваності.

### 3.2 Розрахунки коефіцієнтів регресії для чотирьох станцій

Для знаходження рівняння множинної лінійної регресії були взяті предиктори з методу Абрамович:  $X_1 = H_0$ ;  $X_2 = D_0$ ;  $X_3 = Td'$ .

Після цього отримали рівняння наступного виду:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (3.1)$$

де  $y$  – предиктант;

$x, x_1, x_2, x_3$  – предиктори;

$a_0, a_1, a_2, a_3$  – коефіцієнти регресії.

З рівняння (3.1) була складена система рівнянь множинної регресії з невідомими:  $a_0, a_1, a_2, a_3$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n y = \sum_{i=1}^n a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_1 + a_2 \sum_{i=1}^n x_2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_3 \\ \sum_{i=1}^n yx_1 = a_0 \sum_{i=1}^n x_1 + a_1 \sum_{i=1}^n x_1^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_1 x_2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_3 x_1 \\ \sum_{i=1}^n yx_2 = a_0 \sum_{i=1}^n x_2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_1 x_2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_2^2 + a_3 \sum_{i=1}^n x_3 x_2 \\ \sum_{i=1}^n yx_3 = a_0 \sum_{i=1}^n x_3 + a_1 \sum_{i=1}^n x_1 x_3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_2 x_3 + a_3 \sum_{i=1}^n x_3^2 \end{array} \right.$$

Для визначення коефіцієнтів регресії було відібрано 2/3 вибірки. Після чого значення з вибірки ми підставили в систему рівнянь множинної регресії.

Далі в ході роботи велись розрахунки за методом Гауса, після чого було одержано вільні члени для складання прогностичного рівняння регресії, в якому використана залежність предиктанта (НМХ), від заданих предикторів. В результаті проведення розрахунків були отримані наступні коефіцієнти регресії.

Для станції Харків:

- прогноз на 3 години:  $a_1 = 0.543$ ;  $a_2 = 21.854$ ;  $a_3 = -1.178$ ;  
 $a_0 = 39.129$ ;

- прогноз на 6 годин:  $a_1 = 0.615$ ;  $a_2 = 0.579$ ;  $a_3 = -1.631$ ;  $a_0 = 49.095$ ;

- прогноз на 9 годин:  $a_1 = 0.152$ ;  $a_2 = 7.389$ ;  $a_3 = -0.443$ ;  $a_0 = 182.767$ ;

- прогноз на 12 годин:  $a_1 = 0.026$ ;  $a_2 = 31.335$ ;  $a_3 = -6.198$ ;  
 $a_0 = 216.715$ ;

Для станції Львів:

- прогноз на 3 години:  $a_1 = 0.509$ ;  $a_2 = 2.212$ ;  $a_3 = 1.529$ ;  $a_0 = 87.399$ ;

- прогноз на 6 годин:  $a_1 = 0.649$ ;  $a_2 = 8.168$ ;  $a_3 = 7.729$ ;  $a_0 = 121.776$ ;

- прогноз на 9 годин:  $a_1 = 0.489$ ;  $a_2 = 80.662$ ;  $a_3 = 3.503$ ;  $a_0 = 163.711$ ;

- прогноз на 12 годин:  $a_1 = 0.183$ ;  $a_2 = 51.738$ ;  $a_3 = 9.377$ ;  $a_0 = 349.171$ ;

Для станції Київ:

- прогноз на 3 години:  $a_1 = 0.713$ ;  $a_2 = 5.679$ ;  $a_3 = 0.639$ ;  $a_0 = 73.849$ ;

- прогноз на 6 годин:  $a_1 = 0.201$ ;  $a_2 = 3.110$ ;  $a_3 = 0.795$ ;  $a_0 = 41.884$ ;

- прогноз на 9 годин:  $a_1 = 0.452$ ;  $a_2 = 2.461$ ;  $a_3 = 0.646$ ;  $a_0 = 31.111$ ;

- прогноз на 12 годин:  $a_1 = 0.471$ ;  $a_2 = 13.312$ ;  $a_3 = 0.171$ ;  $a_0 = 151.897$ ;

Для станції Одеса:

- прогноз на 3 години:  $a_1 = 0.711$ ;  $a_2 = 8.384$ ;  $a_3 = 0.308$ ;  $a_0 = 51.853$ ;

- прогноз на 6 годин:  $a_1 = 0.303$ ;  $a_2 = 6.956$ ;  $a_3 = 0.141$ ;  $a_0 = 91.215$ ;

- прогноз на 9 годин:  $a_1 = 0.457$ ;  $a_2 = 9.623$ ;  $a_3 = 0.314$ ;  $a_0 = 61.179$ ;

- прогноз на 12 годин:  $a_1 = 0.354$ ;  $a_2 = 9.331$ ;  $a_3 = 0.105$ ;  $a_0 = 81.202$ ;

З урахуванням коефіцієнтів регресії, адаптовані рівняння приймуть наступний вид:

Для прогнозу на 3 години (станція Харків):

$$H_{(3)} = 0.543H_0 + 21.854D_0 + (-1.178Td') + 39.129 \quad (3.2)$$

Для прогнозу на 6 годин (станція Харків):

$$H_{(6)} = 0.615H_0 + 0,579D_0 + (-1.631Td') + 49.095 \quad (3.3)$$

Для прогнозу на 9 годин (станція Харків):

$$H_{(9)} = 0.152H_0 + 7.389D_0 + (-0.443Td') + 189.767 \quad (3.4)$$

Для прогнозу на 12 годин (станція Харків):

$$H_{(12)} = 0.026H_0 + 31.335D_0 + (-6.198Td') + 216.715 \quad (3.5)$$

Для прогнозу на 3 години (станція Львів):

$$H_{(3)} = 0.509H_0 + 2,212D_0 + 1,529Td' + 87,399 \quad (3.6)$$

Для прогнозу на 6 годин (станція Львів):

$$H_{(6)} = 0.649H_0 + 8,168D_0 + 7,729Td' + 121,776 \quad (3.7)$$

Для прогнозу на 9 годин (станція Львів):

$$H_{(9)} = 0,469H_0 + 80,662D_0 + 3,503Td' + 163,711 \quad (3.8)$$

Для прогнозу на 12 годин (станція Львів):

$$H_{(12)} = 0.183H_0 + 51,738D_0 + 9,377Td' + 349,171 \quad (3.9)$$

Для прогнозу на 3 години (станція Київ):

$$H_{(3)} = 0,713H_0 + 5,679D_0 + 0,639Td' + 73,849 \quad (3.10)$$

Для прогнозу на 6 годин (станція Київ):

$$H_{(6)} = 0,201H_0 + 3,110D_0 + 0,795Td' + 41,884 \quad (3.11)$$

Для прогнозу на 9 годин (станція Київ):

$$H_{(9)} = 0,452H_0 + 2,461D_0 + 0,646Td' + 31,111 \quad (3.12)$$

Для прогнозу на 12 годин (станція Київ):

$$H_{(12)} = 0,471H_0 + 13,312D_0 + 0,171Td' + 151,897 \quad (3.13)$$

Для прогнозу на 3 години (станція Одеса):

$$H_{(3)} = 0,711H_0 + 8,384D_0 + 0,308Td' + 51,853 \quad (3.14)$$

Для прогнозу на 6 годин (станція Одеса):

$$H_{(6)} = 0,303H_0 + 6,956D_0 + 0,141Td' + 91,215 \quad (3.15)$$

Для прогнозу на 9 годин (станція Одеса):

$$H_{(9)} = 0,457H_0 + 9,623D_0 + 0,314Td' + 61,179 \quad (3.16)$$

Для прогнозу на 12 годин (станція Одеса):

$$H_{(12)} = 0,354H_0 + 9,331D_0 + 0,105Td' + 81,202 \quad (3.17)$$

### 3.3 Порівняння характеристик методу К.Г. Абрамович та адаптованого методу прогнозу висоти нижньої межі хмарності

За даними таблиць 3.1- 3.16 ми можемо побачити, що адаптація прогнозу покращила загальну справджуваність, для різних градацій нижньої межі хмарності за різний прогностичний період.

Таблиця 3.1. Значення загальної справджуваності та оцінки успішності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Харків

| Методи            | Загальна справджуваність |           |                   |
|-------------------|--------------------------|-----------|-------------------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м<br>300м |
| К.Г.Абрамович     | 84%                      | 71%       | 58%               |
| Адаптований метод | 90%                      | 74%       | 61%               |

Таблиця 3.2. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Харків

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 79%                      | 56%       | 49%       |
| Адаптований метод | 82%                      | 67%       | 56%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Харків показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,89 (0,83), по критерію Обухова 0,33 (0);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,42 (0,16), по критерію Обухова 0,47 (0,13);



- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,16 (0,12), по критерію Обухова 0,18 (0).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на бгод за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Харків показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0 (0,22), по критерію Обухова 0 (0,19);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,56 (0,09), по критерію Обухова 0,04 (0,08);

- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,04 (0,05), по критерію Обухова 0,5 (0,6).

Таблиця 3.3. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Харків

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 88%                      | 40%       | 33%       |
| Адаптований метод | 89%                      | 61%       | 58%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Харків показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,04 (0,02), по критерію Обухова 0 (0,01);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,08 (0,03), по критерію Обухова 0 (0,03);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,01 (0,13), по критерію Обухова 0 (0,15).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 12год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Харків показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,08 (0,05), по критерію Обухова 0,02 (0,01);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,14 (0,11), по критерію Обухова 0,13 (0);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,42 (0,14), по критерію Обухова 0,41 (0,19).

Таблиця 3.4. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Харків.

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 93%                      | 69%       | 56%       |
| Адаптований метод | 94%                      | 72%       | 72%       |

Таблиця 3.5. Значення загальної справджуваності та оцінки успішності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Львів

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 86%                      | 70%       | 57%       |
| Адаптований метод | 87%                      | 77%       | 70%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Львів показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,86 (0,85), по критерію Обухова 0,2 (0,2);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,1 (0,23), по критерію Обухова 0,08 (0,32);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,45 (0,05), по критерію Обухова 0,55 (0,05).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Львів показала:

для градації <100 м по критерію Багрова 0,82 (0,64), по критерію Обухова 0,17 (0);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,21 (0,07), по критерію Обухова 0,19 (0,21);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,37 (0,32), по критерію Обухова 0,39 (0,32).

Таблиця 3.6. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Львів

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 67%                      | 67%       | 72%       |
| Адаптований метод | 83%                      | 70%       | 73%       |

Таблиця 3.7. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Львів

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 88%                      | 65%       | 59%       |
| Адаптований метод | 89%                      | 66%       | 66%       |

-

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Львів показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,89 (0,89), по критерію Обухова 0,12 (0,07);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,14 (0,14), по критерію Обухова 0,23 (0,09);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,18 (0,06), по критерію Обухова 0,22 (0,06).

Таблиця 3.8. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Львів

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 85%                      | 68%       | 32%       |
| Адаптований метод | 86%                      | 82%       | 79%       |

Таблиця 3.9. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Київ

| Методи            | Загальна справджуваність |          |          |
|-------------------|--------------------------|----------|----------|
|                   | <100м                    | 100-200м | 200-300м |
| К.Г.Абрамович     | 57%                      | 45%      | 37%      |
| Адаптований метод | 89%                      | 71%      | 71%      |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Львів показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,85 (0,85), по критерію Обухова 0,24 (0,24);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,13 (0,01), по критерію Обухова 0,18 (0,15);

- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,13 (0,03), по критерію Обухова 0,03 (0,01).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Київ показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,88 (0,55), по критерію Обухова 0,11 (0,67);

для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,42 (-0,05), по критерію Обухова 0,57 (0,05);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,24 (-0,21), по критерію Обухова 0,27 (0,04).

Таблиця 3.10. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Київ

| Методи            | Загальна справджуваність |          |          |
|-------------------|--------------------------|----------|----------|
|                   | <100м                    | 100-200м | 200-300м |
| К.Г.Абрамович     | 69%                      | 69%      | 39%      |
| Адаптований метод | 72%                      | 70%      | 69%      |

Таблиця 3.11. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Київ

| Методи            | Загальна справджуваність |          |          |
|-------------------|--------------------------|----------|----------|
|                   | <100м                    | 100-200м | 200-300м |
| К.Г.Абрамович     | 70%                      | 67%      | 26%      |
| Адаптований метод | 77%                      | 68%      | 90%      |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Київ показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,88 (0,55), по критерію Обухова 0,11 (0,67);

для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,42 (-0,05), по критерію Обухова 0,57 (0,05);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,24 (-0,21), по критерію Обухова 0,27 (0,04).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Київ показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,71 (0,68), по критерію Обухова 0,09 (0,01);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,21 (-0,1), по критерію Обухова 0,22 (0,07);

- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,42 (-0,15), по критерію Обухова 0,46 (0,23).

Таблиця 3.12. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Київ

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 80%                      | 73%       | 37%       |
| Адаптований метод | 81%                      | 73%       | 92%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Київ показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,74 (0,69), по критерію Обухова 0,42 (0,18);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,22 (-0,06), по критерію Обухова 0,59 (0,05);

- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,80 (-0,51), по критерію Обухова 0,81 (0,51).

Таблиця 3.13. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Одеса

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 92%                      | 59%       | 56%       |
| Адаптований метод | 95%                      | 65%       | 57%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Київ показала:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,79 (0,79), по критерію Обухова 0,12 (0,12);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,40 (0,08), по критерію Обухова 0,45 (0,12);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,82 (-0,81), по критерію Обухова 0,80 (0,83).

Таблиця 3.14. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Одеса

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 96%                      | 44%       | 48%       |
| Адаптований метод | 97%                      | 74%       | 81%       |

Таблиця 3.15. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Одеса

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 84%                      | 72%       | 52%       |
| Адаптований метод | 96%                      | 88%       | 88%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 3 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Одеса показали:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,94 (0,90), по критерію Обухова 0,90 (0,10);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,17 (0,05), по критерію Обухова 0,16 (0,12);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,26 (0,04), по критерію Обухова 0,45 (0,19).

Таблиця 3.16. Значення загальної справджуваності методу прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та метод Абрамович для станції Одеса

| Методи            | Загальна справджуваність |           |           |
|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                   | <100 м                   | 100-200 м | 200-300 м |
| К.Г.Абрамович     | 95%                      | 59%       | 46%       |
| Адаптований метод | 96%                      | 68%       | 81%       |

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 6 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Одеса показали:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,96 (0,96), по критерію Обухова 0,10 (0,10);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,44 (0,01), по критерію Обухова 0,42 (0,12);

для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,56 (0,10), по критерію Обухова 0,50 (0,10).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 9 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Одеса показали:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,96 (0,83), по критерію Обухова 0,95 (0,173);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,44 (0,05), по критерію Обухова 0,42 (0,02);

- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,76 (0,01), по критерію Обухова 0,81 (0,02).

Оцінки успішності методів прогнозу нижньої межі хмарності на 12 год за адаптованим методом та (метод Абрамович) для станції Одеса показали:

- для градації <100 м по критерію Багрова 0,95 (0,95), по критерію Обухова 0,01 (0,01);

- для градації 100-200 м по критерію Багрова 0,41 (0,02), по критерію Обухова 0,46 (0,11);



- для градації 200-300 м по критерію Багрова 0,55 (0,20), по критерію Обухова 0,51 (0,09).

Проаналізувавши таблиці 3.1 – 3.12 можна побачити що процедура адаптації покращила результати загальної справджуваності прогнозу висоти нижньої межі хмарності.

В додатку Б графічно представлено відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності методу Абрамович та адаптованого методу від фактичного значення висоти нижньої межі хмарності.

## ВИСНОВКИ

1. Головними умовами утворення низької хмарності є наявність піднесеного затримуючого шару (інверсії, ізотермії), адвекція теплого і вологого повітря у граничному шарі атмосфери та слабкий турбулентний обмін у підінверсійному шарі повітря.

2. За результатами отриманих даних були виведені рівняння регресії для чотирьох станцій: Одеса, Львів, Київ та Харків в період з 2017 року по 2019 рік, в яких спостерігалася висота нижньої межі хмарності 300 м і нижче.

3. Перевірка методу прогнозу нижньої межі хмарності показала, що справджуваність альтернативного методу прогнозу, вища за справджуваність методу К.Г. Абрамович для станцій Харків, Львів, Київ та Одеса.

4. Для станції Харків краща справджуваність спостерігалась на прогностичний період 9 годин, вона покращилась на 25%.(для градації висоти ВНМХ 200-300 м)

5. Для станції Львів краща справджуваність спостерігалась на прогностичний період 12 годин, вона покращилась на 47%.(для градації висоти ВНМХ 200-300 м)

6. Для станції Київ краща справджуваність спостерігалась на прогностичний період 9 годин, вона покращилась на 64%.(для градації висоти ВНМХ 200-300 м).

7. Для станції Одеса краща справджуваність спостерігалась на прогностичний період 9 годин, вона покращилась на 36%.(для градації висоти ВНМХ 200-300 м)..

8. Отримані результати дають підстави вважати адаптований метод більш ефективним і рекомендувати його для прогнозу нижньої межі хмарності для станцій Харків, Львів, Київ та Одеса, які були представлені для перевірки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андреев А.О., Дукальская М. В., Головина Е. Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. — СПб: РГГМУ, 2007. — 228 с.
2. Абрамович К.Г. К характеристике атмосферных процессов в дни с нижней облачностью. Труды ЦИП, вып. 1964. — 136 с.
3. Абрамович К.Г., Глазунов В.Г. Условия формирования и эволюции нижних облаков на Украине ноябре – декабре 1962 г. – Труды ЦИП, вып. 1966. — 157 с.
4. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Том 2. — М.: Юнити-Дана, 2001. — 432 с.
5. Александрова Н. В. История математических терминов, понятий, обозначений: словарь-справочник. — 3-е изд.. — М.: ЛКИ, 2008. — 248 с.
6. Арраго Л.А., Швец М.Е. К теории образования неконвективной облачности. Труды ГГО, вып. 1960. — 121 с.
7. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И. М.. Погода и полеты самолетов и вертолетов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 280 с.
8. Бабилов М., Колобков Н., Кулаков А., Шталь В. Метеорология для летчиков. — М.: Воениздат. НКО СССР, 1941. — 111 с.
9. Баранов А.М., Астапенко А.М., Шварев И.М. Погода и полеты самолетов и вертолетов. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. — 280 с.
10. Баранов А.М., Лещенко Г.П., Белоусова Л.Ю. Авиационная метеорология и метеорологические обеспечения полетов: Учеб. для вузов. — М.: Транспорт, 1993. — 287 с.
11. Баранов А.М. Облака и безопасность полетов. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 326 с.
12. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгальчук Ю.А. и др. Атлас облаков. — СПб.: Гидрометеиздат, 2006. — 248с.
13. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. — СПб.: РГТМ, 2005. — 238 с.
14. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы погоды. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 284 с.
15. Богаткин О. Г., Еникеева В. Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. — Л.: Гидрометеиздат. 1985. — 230 с.

16. Богаткин О. Г. Информационно-справочная книга авиационного метеоролога. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 219 с.
17. Боровиков А. М., Гайворонский И. И., Зак Е. Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин В.Е., Хргиан А.Х., Шмистер С.М.. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 460 с.
18. [Витковский В. В. Наименьшие квадраты// Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона](#) : — СПб.,1907. – 235 с.
19. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
20. Воронцов П.А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 150 с.
21. Доугерти К. Введение в эконометрику: Пер. с англ. — М.: ИНФРА-М, 1999. — 402 с.
22. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 216 с.
23. Дюбюка А.Ф. Международный атлас облаков и состояний неба. – М.: Гидрометеиздат, 1940. — 456 с.
24. Заболотников Г.В. Влияние облачности и видимости на деятельность авиации: метод. . – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2006. – 28 с.
25. Зверев А. С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 774 с.
26. Івус Г.П., Боровська Г.О. Практикум з авіаційної метеорології: навч. посібник. – Одеса: Екологія, 2006. – 224 с.
27. Івус Г.П.. Практикум з спеціалізованих прогнозів погоди. – Одеса:, 2007. – 322с.
28. Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б. Авіаційна метеорологія та кліматологія. Конспект лекцій – Одеса:, 2007. – 201с.
29. Кирюхин Б.В., Красилов П.Н. Облака, дождь и снег. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 76 с.
30. Клосс Р., Фаси Л. Облака. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 120 с.
31. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 341 с.
32. Леонов М.П., Перелет Г.И. Активное воздействия на облака в холодное полугодие. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 152 с.

33. Лещенко Е.Г. Метеорологическое обеспечение полётов. – Кировоград: ГЛАУ, 2010. – 184 с.
34. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд. — М., 1962. — 336 с.
35. Магнус Я. Р., Катышев П. К., Пересецкий А. А. Эконометрика. Начальный курс. — М.: Дело, 2007. — 504 с.
36. Мазин И.П., Шмистер С.М. Облака: строение и физика образования. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.
37. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 640 с.
38. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 542 с.
39. Никондров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 191 с.
40. Петерсен С. Анализ и прогноз погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 652 с.
41. Познякова В.А. Практическая авиационная метеорология. – Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. — 113 с.
42. Половина И.П. Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 215 с.
43. Приходько М.Г., Смирнов В.С., Эйдельман Ю.З. Общая и синоптическая метеорология. – М.: Воениздат., 1970. – 512 с.
44. Рыбакова Ж.В. Облака и их трансформация. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. – 234 с.
45. Сарапіна М. В. Метеорологія та кліматологія: конспект лекцій – НУЦЗУ, 2016. – 207 с.
46. Сафанова Т.В. Авиационная метеорология: учеб. пособие. – Ульяновськ: УВАУ ГА, 2005. – 215 с.
47. Скирда И.А., Садковский В.И., Мозиков В.А. Авиационные прогнозы погоды. – М.: Воениздат, 1995. – 125 с.
48. Фейгельсон Е.М. Лучистый теплообмен и облака. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 230 с.
49. Хргиан А.Х. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 459 с.

50. Швень Н.І., Павленко О.А. Орнатський І.А. Методичні аспекти світлолокаційних вимірювань нижньої межі хмар // Фізична географія та геоморфологія. – Вип. № 57. – 2009. – 95 с.
51. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. – М.: Гостехиздат, 1954. –280 с.
52. Яковлев А.М. Авиационная метеорология. – М.: Транспорт, 1971. – 248 с.
53. AFWA/TN-98/002, Meteorological Techniques, 13 June 2003.
54. Bergot T., Bougeault P., Carrer D.. Improved Site-Specific Numerical Prediction of Fog and Low Clouds: A Feasibility Study. August 2005. 21 pages.
55. Chiang, C.L, (2003) Statistical methods of analysis, World Scientific. Page 274 section 9.7.4 "interpolation vs extrapolation"
56. DECOURCY R.. Practical exercises in elementary meteorology. Boston: Ginn & Company. November 2012.
57. Draper N., Smith H., Applied Regression Analysis, 3 Edition. ISBN: 978-0-471-17082-2. April 1998. 736 pages.
58. M'Pherson J. G.. Meteorology; or, weather explained. London: T. C. & E. C. Jack. February 2012.
59. Rouaud M., Probability, statistics and estimation. French: Calcul d'incertitudes and Probabilités. July 2013. 181 pages.
60. William J. Miller Hippolyte Gruener A. Russell Bond D. W. Hering Loomis Havemeyer Ernest G. Martin Arthur Selwyn-Brown Robert Chenault Givler Ernest Ingersoll Wilfred Mason Barton William B. Scott Ernest J. Streubel Norman Taylor David Todd Charles Fitzhugh Talman Robin Beach. POPULAR SCIENCE LIBRARY. U.S.A: BY P. F. COLLIER & SON COMPANY. October 2014.
61. World Meteorological Organization: WMO/TD – No. 1300 Aviation Hazards Education and Training Programme ETR. 20. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland, 2007.

## ДОДАТКИ

Додаток А

ДОВІДКА

кафедри військової підготовки  
до магістерської роботи  
курсанта групи МВМ-19 Лілії ПАЛЬЧУК

на тему:

«АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ К.Г. АБРАМОВИЧ ПРОГНОЗУ ВИСОТИ  
НИЖНЬОЇ МЕЖІ ХМАРНОСТІ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ».

1. Доповідь на студентській конференції 17 квітня 2019 року за темою: «Адаптація методу К.Г. Абрамович прогнозу висоти нижньої межі хмарності для території України» та публікація тез доповіді за результатами конференції на сайті ОДЕКУ. [Електронний ресурс]. Спосіб доступу: <http://odeku.edu.ua/wp-content/uploads/Tezi-studentska-konferentsiya-2019.pdf> - С.349-350.

2. Доповідь на всеукраїнській конференції молодих вчених 12 березня 2020 року за темою: «Адаптація методу К.Г. Абрамович прогнозу висоти нижньої межі хмарності для території України» та публікація наукової статті за її результатами у журналі «Молоді вчені 2020 – від теорії до практики» м. Дніпро. С.131-133.

3. Доповідь на конференції молодих вчених 29 травня 2020 року за темою: «Адаптація методу К.Г. Абрамович прогнозу висоти нижньої межі хмарності для території України».

Керівник магістерської роботи  
полковник

Сергій РОМАНЕНКО



## Додаток Б

Графічне зображення відхилень прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень

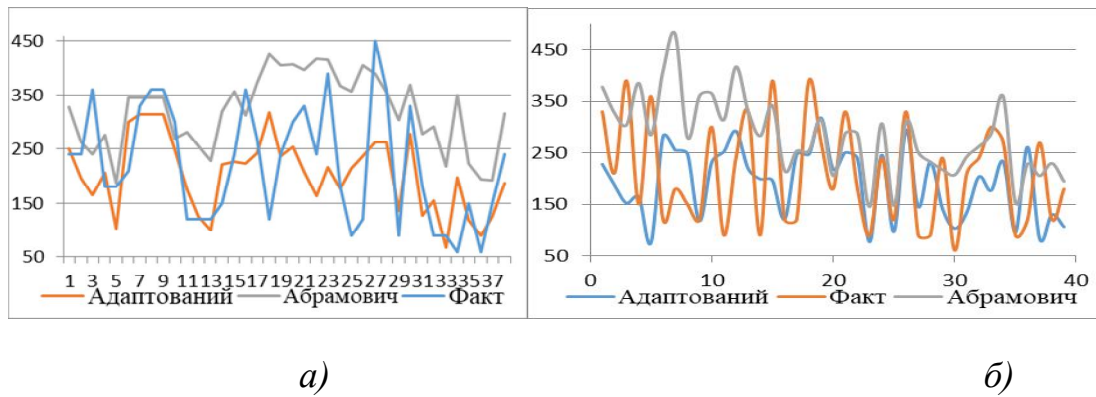


Рис. Б.1 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Харків а) для прогнозу зі завчасністю 3 год, б) для прогнозу зі завчасністю 6 год

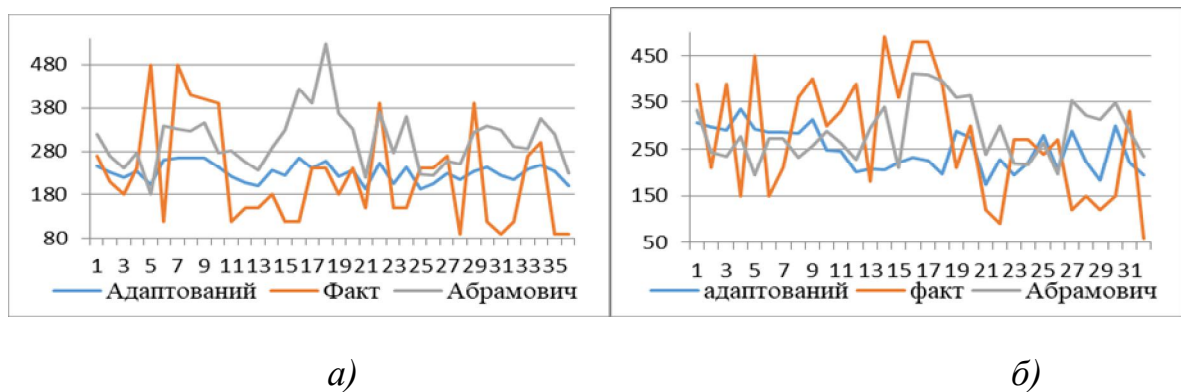
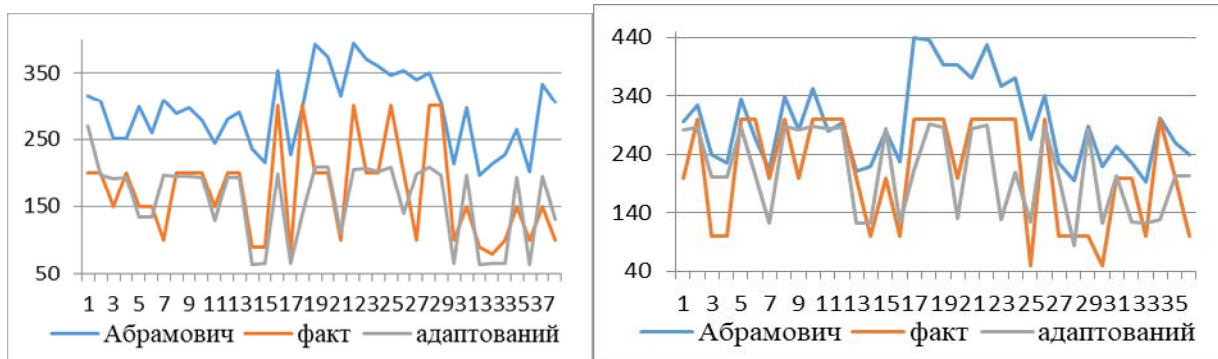


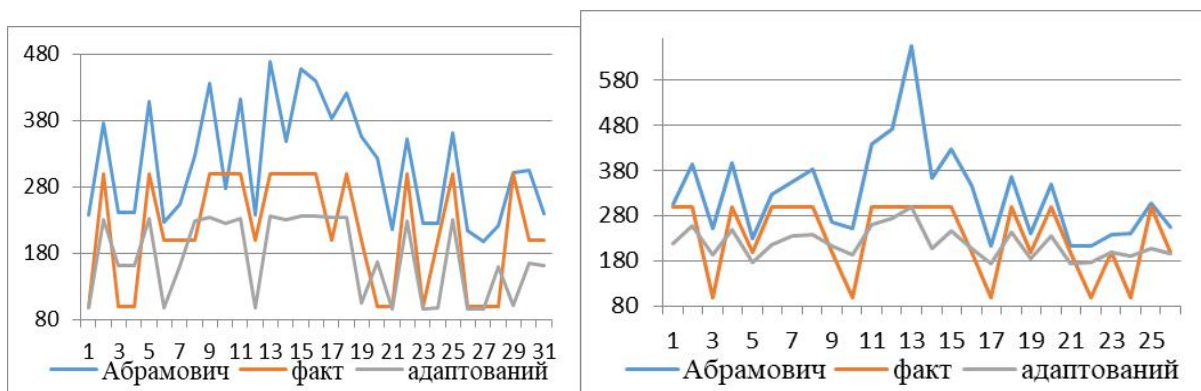
Рис. Б.2 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Харків а) для прогнозу зі завчасністю 9 год, б) для прогнозу зі завчасністю 12 год



а)

б)

Рис. Б.3 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Київ а) для прогнозу зі завчасністю 3 год, б) для прогнозу зі завчасністю 6 год



а)

б)

Рис. Б.4 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Київ а) для прогнозу зі завчасністю 9 год, б) для прогнозу зі завчасністю 12 год

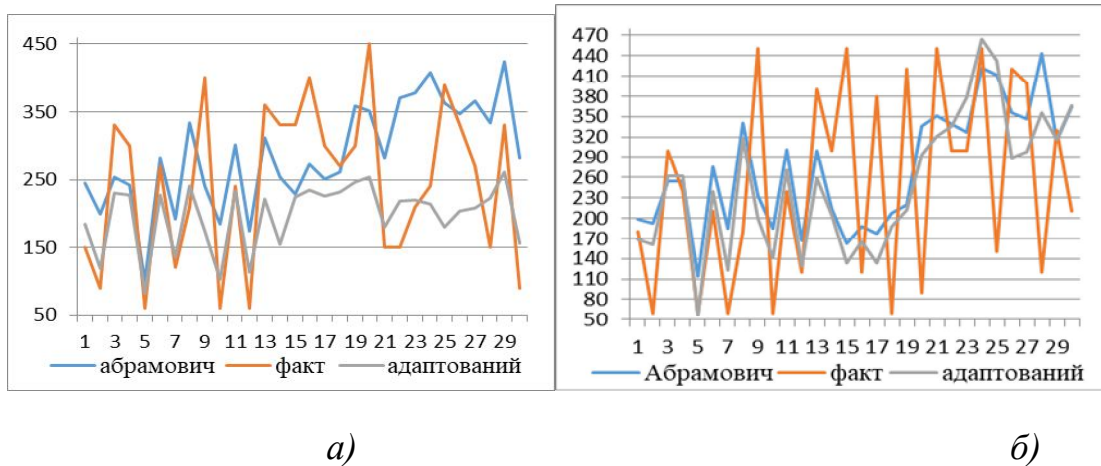


Рис. Б.5 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Львів а) для прогнозу зі завчасністю 3 год, б) для прогнозу зі завчасністю 6 год

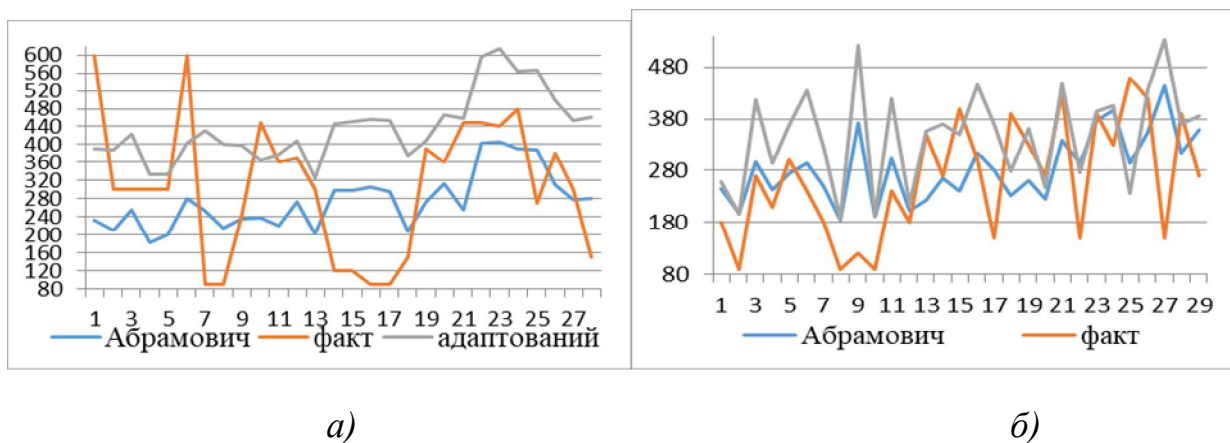
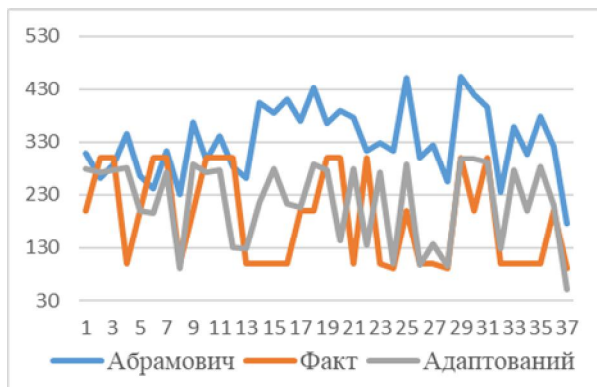
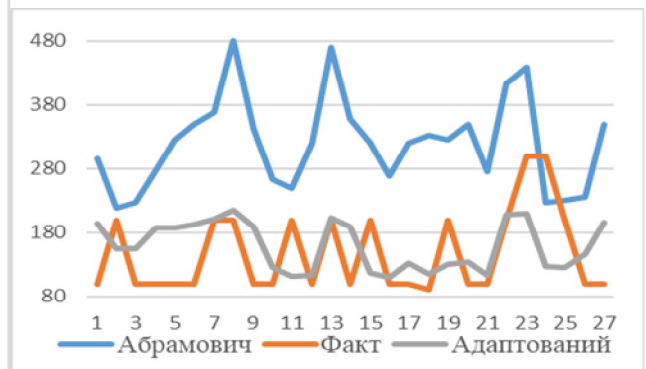


Рис. Б.6 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Львів а) для прогнозу зі завчасністю 9 год, б) для прогнозу зі завчасністю 12 год

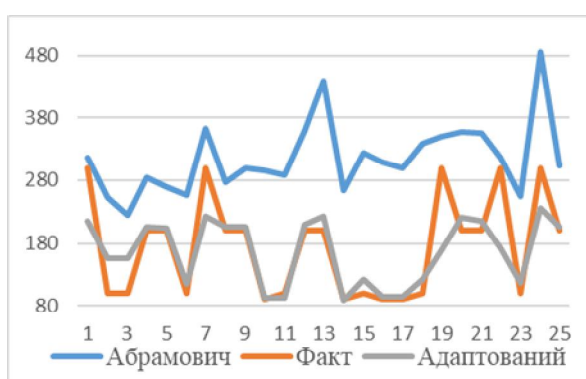


а)

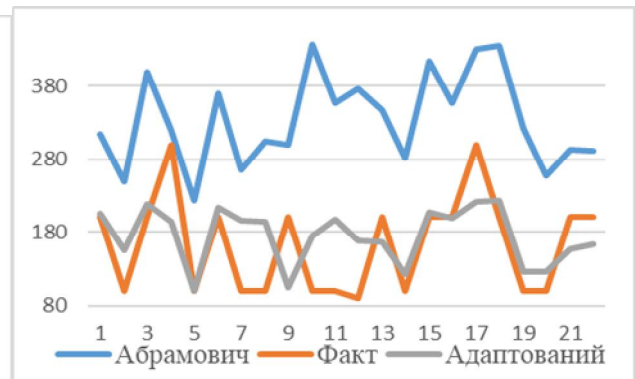


б)

Рис. Б.7 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Одеса а) для прогнозу зі завчасністю 3 год, б) для прогнозу зі завчасністю 6 год



а)



б)

Рис. Б.8 – відхилення прогнозу висоти нижньої межі хмарності адаптованого методу та методу Абрамович від фактичних значень для станції Одеса а) для прогнозу зі завчасністю 9 год, б) для прогнозу зі завчасністю 12 год