

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

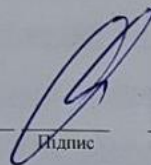
Галузь знань 12 – Інформаційні технології  
Шифр і назва галузі знань  
Спеціальність 122 – Комп'ютерні науки  
Шифр і назва спеціальності  
Освітня програма Комп'ютерні науки  
Назва освітньої програми

Виконав: студент групи КН-21-1  Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ  
Група виконавця Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ  
Керівник: к.фіз.-мат.н., доц. каф. КН  Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ  
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ  
Нормоконтроль: к.т.н., доц. каф. КН  Руслан БАГРІЙ  
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

зав. кафедри КН, д.т.н., професор


20 06 2025 р.



Олександр БАРМАК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних наук  
Освітній ступінь бакалавр  
Галузь знань 12 – Інформаційні технології  
Спеціальність 122 – Комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри комп'ютерних наук

  
(підпис)  
д.т.н., професор Олександр БАРМАК  
« 10 » 02 2025 року

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних»
2. Завдання видано студенту Костянтину БОРАТИНСЬКОМУ  
(Ім'я, прізвище)
3. Керівник роботи доцент кафедри КН Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ  
(посада, ім'я, прізвище)
4. Затверджено наказом університету від « 07 » 02 2025 р. № 23
5. Дата видачі завдання студенту: « 10 » 02 2025 р.
6. Зміст пояснювальної записки (перелік задач) та вихідні дані: Мета роботи полягає у підвищенні точності процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Для досягнення цієї мети необхідно провести аналіз сучасних методів прогнозування, розробити метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних, інтегрувати його в інформаційну систему та провести експериментальне тестування для оцінки точності методу. Вхідні дані передбачають можливість повного опису предметної області, а саме: облік та маршрути перелітних птахів, множини для ознак екологічних катастроф, параметри впливу на маршрути тощо.

7. Календарний план виконання кваліфікаційної роботи бакалавра:

№	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи бакалавра з керівником, складання календарного графіка виконання роботи	січень 2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження	лютий 2025	виконано
3	Проектування та розробка загальної архітектури системи, вибір засобів реалізації програмного забезпечення	березень 2025	виконано
4	Розробка інформаційної системи	квітень 2025	виконано
5	Написання пояснювальної записки, урахування зауважень керівника, оформлення згідно вимог	травень 2025	виконано
6	Розробка презентаційних матеріалів та попередній захист кваліфікаційної роботи	травень 2025	виконано
7	Отримання відгуку керівника, рецензії, перевірка на плагіат, нормоконтроль	червень 2025	виконано
8	Підготовка до захисту та захист кваліфікаційної роботи бакалавра	червень 2025	виконано

Виконавець: студент групи КН-21-1  
Група виконавця

Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: к.фіз.-мат.н., доц. каф. КН  
Науковий ступінь, посада

Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## Анотація

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних»

Виконавець кваліфікаційної роботи бакалавра: студент групи КН-21-1 Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра: к.фіз.-мат.н., доцент кафедри КН Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить:

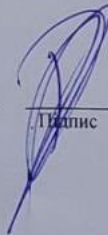
Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
56	11	11	53	3

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є підвищення точності процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Проведено аналіз сучасних методів прогнозування, розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних, інтегровано його в інформаційну систему та проведено експериментальне тестування для оцінки точності методу.

Напрямами практичного використання розробленої інформаційної системи визначено автоматизоване складання потенційних маршрутів перелітних птахів, визначення умов для забезпечення періоду гніздування птахів та автоматизоване прогнозування їх популяції.

Ключові слова: перелітні птахи, міграція, екологічна катастрофа, маршрут перельоту, гніздування, популяція, інтелектуальний аналіз даних.

Виконавець: студент групи КН-21-1  
Група виконавця



Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## Зміст

Перелік скорочень .....	3
Вступ.....	4
Розділ 1 Характеристика предметної області: аналіз моделей, методів та реалізацій.....	6
1.1 Аналіз предметної області маршрутів перелітних птахів.....	6
1.2 Огляд існуючих рішень та інформаційного забезпечення .....	8
1.3 Аналіз існуючих публікацій та наукових підходів.....	12
1.4 Мета та завдання кваліфікаційної роботи .....	15
Розділ 2 Розробка методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.....	16
2.1 Схема методу прогнозування.....	16
2.2 Покращення методу прогнозування.....	18
2.3 Інформаційна модель методу прогнозування .....	20
2.4 Інтелектуальний аналіз даних для прогнозуванн впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів .....	25
2.5 Підготовка робочих вхідних даних для системи .....	28
2.6 Метрики оцінювання прогнозування маршрутів.....	32
2.7 Висновки до розділу 2 .....	34
Розділ 3 Програмна реалізація та експериментальне дослідження методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних .....	36
3.1 Структура модулів системи, їх взаємозв'язок .....	36
3.2 Опис функціональних можливостей інформаційної системи .....	40
3.3 Експериментальне тестування методу прогнозування.....	44
3.4 Висновки до Розділу 3 .....	51
Загальні висновки.....	52
Перелік посилань.....	54
Додатки	

### Перелік скорочень

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
ГІС	Геоінформаційна система
КН	Комп'ютерні науки
СКБД	Система керування базами даних
BCL	Base Class Library
CLR	Common Language Runtime
FCL	Framework Class Library
LSA	Latent Semantic Analysis
MFC	Microsoft Foundation Class
MAE	Mean Absolute Error (середня абсолютна помилка)
MS	Microsoft
RMSE	Root Mean Squared Error (середньоквадратична похибка)
PSA	Метод головних компонент

## Вступ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.

**Актуальність теми.** Сучасний світ стикається з посиленням екологічних катастроф, таких як лісові пожежі, зміни клімату, забруднення водойм і повітря, що впливають на природні екосистеми, зокрема на міграційні шляхи птахів. Особливо питання стало гострим у контексті повномасштабного вторгнення росії в Україну. Військові дії, вибухи, хімічні витіки призвели до масштабного забруднення повітря, води та ґрунтів, руйнування екосистем, масових пожеж у лісах і степах, а також знищення природних заповідників. Бойові дії на Півдні, Сході та в інших регіонах України впливають на ключові міграційні маршрути птахів, зокрема над Чорним морем, Азовським морем, у зоні Полісся та степових заповідників. Багато традиційних місць відпочинку та гніздування птахів знищені або небезпечні через військові загрози. Україна є важливим транзитним регіоном для багатьох видів перелітних птахів. Зміни у їхніх маршрутах через війну можуть мати довгострокові наслідки не лише для екосистем України, а й для екологічної рівноваги в Європі та Азії.

Використання методів інтелектуального аналізу даних дає змогу оцінювати вплив екологічних катастроф та війни на міграційні маршрути та передбачати можливі зміни у поведінці птахів. Це дозволить адаптувати заходи охорони природи та мінімізувати негативний вплив екологічних катастроф та може допомогти у розробці стратегій збереження біорізноманіття навіть в умовах військових дій. Розробка методу прогнозування допоможе орнітологам, екологам і природоохоронним організаціям приймати обґрунтовані рішення для збереження видів, що мігрують. Також це може бути корисним для сільського господарства, урбаністики та екологічного моніторингу.

Отже, тема є актуальною, оскільки вона поєднує екологічні проблеми з сучасними технологіями аналізу даних, що сприяє сталому розвитку та збереженню біорізноманіття.

**Мета кваліфікаційної роботи бакалавра** полягає у підвищенні точності процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.

**Об'єкт дослідження** – процес прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.

**Предмет дослідження** – методи, засоби та технології інтелектуального аналізу даних для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.

**Завдання кваліфікаційної роботи бакалавра.** Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі.

1. Провести аналіз предметної області та відомих підходів до прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
2. Вдосконалити інформаційну модель прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
3. Розробити метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.
4. Підготувати набори даних для їх інтелектуального аналізу в методі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
5. Застосувати засоби інтелектуального аналізу даних для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
6. Провести функціональне та прикладне дослідження точності запропонованого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.

## Розділ 1 Характеристика предметної області: аналіз моделей, методів та реалізацій

### 1.1 Аналіз предметної області маршрутів перелітних птахів

Перелітні птахи [1] – це види, які сезонно переміщуються між місцями гніздування і зимівлі. Їхні маршрути охоплюють тисячі кілометрів, перетинаючи різні природні зони, країни та навіть континенти. Міграція є чутливою до змін в оточуючому середовищі, зокрема до екологічних катастроф, які можуть впливати на напрям, тривалість, швидкість та безпеку переміщення. Питаннями міграції птахів науковці почали займатися давно, а особливо актуальним це стало на початку ХХ століття у зв'язку із розвитком технологій, урбанізації, збільшенням військових конфліктів тощо [2, 3]. На сьогодні актуальне питання вивчення змін міграційної поведінки птахів у контексті глобального клімату [4-7]. Широко вивчаються поєднання кліматичних, атмосферних і біотичних чинників, що змінюють маршрути і фенологію міграції. Дедалі частіше вчені фіксують випадки масової загибелі птахів при поєднанні пожеж, якості повітря та екстремальних погодних явищ [8]. Основними компонентами предметної області міграції перелітних птахів є *маршрути міграції* та *екологічні катастрофи*.

Серед напрямків міграції найчастіше виділяють східно-європейський, чорноморсько-середземноморський, афро-євразійський міграційний коридори [2, 3, 7, 9]. При міграції птахи роблять проміжні зупинки - ключові місця для відпочинку та харчування. На формування маршрутів найбільше впливає клімат, географія, доступність їжі, інстинктивні та соціальні механізми навігації.

Екологічні катастрофи поділяються на катастрофи природного походження (лісові пожежі, повені, урагани, посухи, виверження вулканів тощо) та антропогенного походження (техногенні аварії, наприклад, викиди хімічних речовин, вибухи, Чорнобиль, Фукусіма, забруднення повітря, води і ґрунту, шумове, світлове, теплове забруднення, вирубка лісів, забудова середовищ існування, війни тощо).

Між екологічними катастрофами та маршрутами птахів існує прямий

взаємозв'язок. Екологічні катастрофи можуть знищувати природні середовища проживання, які використовуються птахами для зупинки; змінювати мікрокліматичні умови, що ускладнює навігацію; створювати бар'єри або зони ризику (наприклад, пожежі, хімічні хмари); викликати фізіологічні чи поведінкові відхилення (стрес, втрата орієнтації); зумовлювати геноцид популяцій на певних ділянках маршруту. Міграція птахів є складним біологічним і екологічним явищем, тісно пов'язаним із сезонними змінами клімату, наявністю ресурсів, умовами середовища та антропогенними впливами. Перелітні птахи щороку долають великі відстані між місцями гніздування та зимівлі, орієнтуючись за геомагнітними, астрономічними та ландшафтними ознаками. Вивчення маршрутів птахів має як природоохоронне, так і прогностичне значення, адже ці маршрути чутливо реагують на зміни в довкіллі.

Основні характеристики міграційних маршрутів [10, 11] наступні.

*Флайвей* (flyways) –це міграційні коридори, що проходять через кілька країн або континентів (наприклад, Середземноморський, Східно-Африкансько-Євразійський, Чорноморсько-Середземноморський флайвей).

*Ключові зупинки* (stopovers) –місця, де птахи відпочивають та живляться під час перельоту.

*Сезонність* –міграція відбувається переважно навесні та восени.

*Видова специфіка* –різні види птахів мають різні маршрути та тривалість перельоту.

Основними наслідками екологічних катастроф, зокрема лісових та степових пожеж, хімічних викидів, забруднення водойм, що негативно впливають на якість довкілля в місцях зупинок, гніздування або зимівлі птахів є втрати біотопів (спалені ліси, осушення боліт, знищення гнізд); зменшення кормової бази (гибель комах, риб, безхребетних); підвищення смертності через токсичні речовини або дим; зміщення маршрутів у небезпечніші зони через втрату звичних локацій. Згідно з дослідженнями [12, 13], понад 60% міграційних видів стикаються з деградацією середовищ уздовж маршрутів через пожежі, забруднення або вирубку лісів, військові дії.

Військові дії створюють довготривалі екологічні ризики [13-16]. Зокрема, бойові дії на території України, Сирії, Іраку та інших країн стали причиною порушення тиші в біосферах і заказниках; забруднення повітря та ґрунтів вибуховими речовинами, важкими металами; масових лісових пожеж, викликаних артобстрілами; фрагментації природних ареалів та зміни ландшафтів.

Отже, область дослідження маршрутів перелітних птахів і екологічних катастроф є складною екосистемою знань, яка поєднує біологію, екологію, інформатику, географію та прогнозне моделювання для вирішення задач збереження довкілля та адаптації до глобальних змін. Зміни маршрутів дедалі частіше стаються під впливом як екологічних, так і воєнних катастроф, а деякі види птахів взагалі залишають традиційні місця проживання. Ці впливи мають не лише регіональний, а й трансконтинентальний характер, що вимагає застосування новітніх методів моніторингу - зокрема супутникових систем, GPS-міток, екологічного моделювання та засобів інтелектуального аналізу даних для прогнозування змін у міграційних траєкторіях.

## **1.2 Огляд існуючих рішень та інформаційного забезпечення**

Сучасне вивчення міграційних процесів птахів тісно пов'язане з розвитком цифрових технологій, супутникового моніторингу, геоінформаційних систем (ГІС) та методів інтелектуального аналізу даних. На перетині екології, орнітології, кліматології та ІТ-систем виникла низка наукових і прикладних рішень, що дозволяють досліджувати вплив антропогенних та природних катастроф на маршрути міграції.

### *1. Глобальні системи моніторингу міграцій птахів*

Найбільш поширеними системами моніторингу є наступні.

Movebank (Max Planck Institute for Ornithology) [17] – відкрита платформа для зберігання, візуалізації та обміну даними GPS-міток на диких тваринах. Дозволяє дослідникам вивчати зміну маршрутів у часі, співвідносити з погодою або іншими факторами.

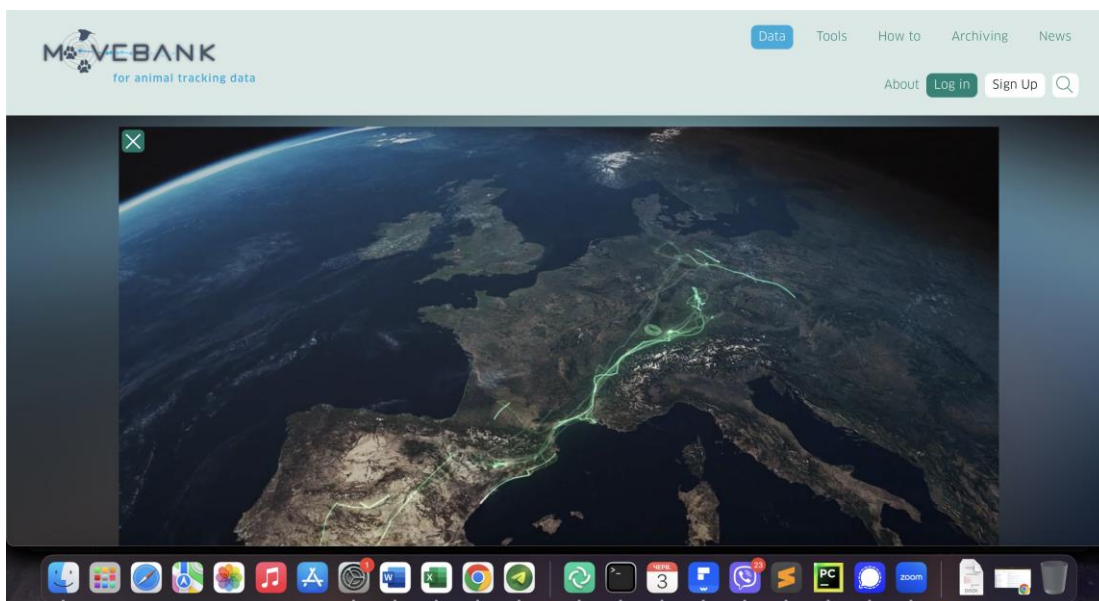


Рисунок 1.1 – Загальний функціонал Movebank [17]

Movebank використовується як основний ресурс GPS-даних щодо міграційних маршрутів птахів, що перетинають територію України та прилеглі регіони. Це дає змогу аналізувати їхню поведінку до, під час і після екологічних катастроф, зокрема пожеж, військових дій та інших дестабілізуючих чинників. За необхідності дані можна попередньо фільтрувати за географічними межами України. Movebank API також дозволяє видобувати редуковані профілі даних (reduced-event) для щоденних записів чи довгих відрізків, що суттєво знижує обсяг даних при формуванні швидких графіків міграційних патернів.

EuroBirdPortal (EBP) [18] –проект моніторингу чисельності та сезонної активності птахів у Європі. Забезпечує інтеграцію даних з понад 29 країн і дає змогу виявити зсуви у міграційних вікнах.

eBird (Cornell Lab of Ornithology) [19] –одна з найбільших баз сезонних та міграційних спостережень птахів у світі. Містить понад мільярд записів, з яких формується аналітика сезонності, щільності та змін у поведінці видів.

## *2. Геоінформаційні та супутникові системи*

NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System) - система глобального моніторингу пожеж за супутниковими знімками MODIS та VIIRS. Важлива для ідентифікації вогнищ лісових пожеж уздовж міграційних шляхів.

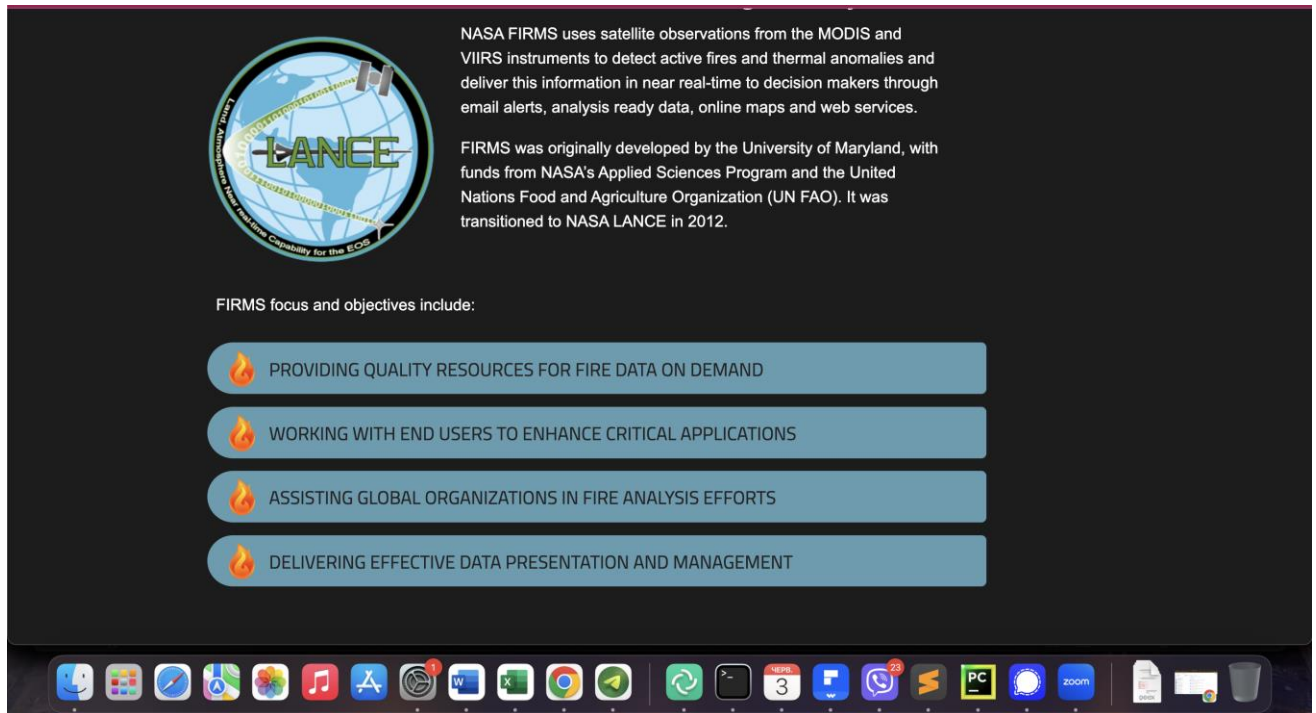


Рисунок 1.2 – Загальний функціонал NASA FIRMS [20]

NASA FIRMS. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) – система від NASA, що у режимі майже реального часу публікує розташування активних осередків пожеж на основі даних супутникових сенсорів MODIS та VIIRS. FIRMS є частиною програми Earth Science Data Systems (ESDS). Особливо важливо, що FIRMS також інструментально використовується для моніторингу пожеж, спричинених військовими діями. Зокрема, під час збройного конфлікту між росією та Україною система зафіксувала значну кількість загорянь у зонах активних бойових дій, забруднення територій та інші вогневі інциденти, що не завжди є традиційними «лісовими пожежами». Це дає додатковий шар інформації для оцінювання ризиків та загроз на маршрутах перелітних птахів, що пролітають через або поряд із зоною активних бойових дій.

Copernicus Emergency Management Service (EU) [21] - сервіс для аналізу наслідків катастроф: пожеж, повеней, хімічних аварій. Його дані можуть бути інтегровані в ГІС-моделі аналізу ризиків.

Global Forest Watch [22] - платформа для відстеження вирубок, пожеж і деградації лісів, що важливо для пернатих, які гніздяться у лісових масивах.

### *3. Інформаційні системи з оцінки ризиків*

IUCN Red List and Species Threat Abatement and Restoration (STAR) [23] – надає оцінки впливу екологічних чинників (зокрема катастроф) на види.

BirdLife Data Zone [24] – база даних по ключових територіях для збереження птахів (IBA), з аналітикою загроз, включно з антропогенними.

GeoNode [25] та GeoPandas [26] – відкриті програмні середовища для створення власних моделей з використанням просторових даних, зокрема маршрутів птахів та катастрофічних подій.

### *4. Програмні продукти та дослідницькі платформи*

Kepler.gl, Leaflet.js, Google Earth Engine [27-29] – застосовуються для візуалізації змін у навколишньому середовищі. У поєднанні з Big Data дозволяють проводити кореляційний аналіз між появою катастроф і змінами маршрутів.

XGBoost, Random Forest, LSTM (Keras, PyTorch) – алгоритми машинного навчання, що дедалі частіше використовуються для побудови моделей прогнозу переміщення птахів, з урахуванням метеоумов, географії катастроф, забруднення тощо.

### *5. Українські розробки та ініціативи*

База «Фауна України» НАН України [30] – містить спостереження за біорізноманіттям, включаючи дані про орнітофауну.

Державна служба з надзвичайних ситуацій України (ДСНС) [31] – публікує відкриті дані про екологічні катастрофи, пожежі, техногенні аварії.

Інтерактивна карта «Екопогрози війни» (експерти ГО «Екодія», 2023) [32] – документує екологічні злочини, пов'язані з воєнними діями (забруднення водойм, ґрунтів, лісів тощо).

Таким чином, у сфері дослідження впливу катастроф на міграцію птахів уже створено значний обсяг інформаційних рішень і платформ, які об'єднують геопросторову аналітику, біологічні дані та прогнозні моделі. Водночас залишається потреба в інтеграції даних про катастрофи (особливо воєнного характеру) із реальними спостереженнями за зміною маршрутів птахів, а також у

створенні гнучких систем прогнозування з використанням інтелектуального аналізу даних.

### **1.3 Аналіз існуючих публікацій та наукових підходів**

Сучасні публікації та дослідження розкривають повний спектр наукових підходів до аналізу та моніторингу міграції птахів, особливо в контексті впровадження інтелектуальних і статистичних методів.

Особливо важливими стають технологічні підходи (GPS-, супутникова, радіо-, акустичні системи); моделювання рухів (HMM, state-space, статистичні, гібридні нейромережі); інтерпретація складних даних (інноваційні методи обробки, Big Data, eBird, radar-дані.). Методами дослідження предметної області є супутникове спостереження та GPS-трекінг птахів, геоінформаційні системи (GIS) для візуалізації і аналізу маршрутів, метеорологічне моделювання та прогнозування, застосування штучного інтелекту і машинного навчання (PCA, Random Forest, DBSCAN, LSTM тощо), біоакустичний моніторинг і радіолокація, польові спостереження (бендинг, трекінг, відеонагляд).

Значення досліджень у цій сфері полягає у збереженні біорізноманіття та охороні перелітних видів; прогнозування змін у рбіоекологічних процесах під дією кліматичних змін і катастроф; формування природоохоронної політики (створення заповідників, екологічних коридорів); підвищення безпеки для птахів та екосистем; розвиток екологічної аналітики та міждисциплінарних підходів в ІТ, біології, географії. При проведенні дослідження вчені стикаються з проблемами та викликами, а саме: брак актуальних даних про реальні зміни маршрутів; складність інтеграції даних із різних джерел (метео, екологія, трекінг); неоднорідність інфраструктури моніторингу у різних країнах; зміни клімату як фактор постійної непередбачуваності. Тому основними завданнями перед науковцями стоять питання створення глобальних систем моніторингу міграцій з використанням AI; інтеграція екологічних моделей з метеорологічними та геопросторовими системами; розвиток біоінформатики і застосування глибокого

навчання до поведінкових патернів; підвищення точності прогнозних моделей для раннього попередження про зміну маршрутів. Оскільки традиційні методи (орнітологічні спостереження, GPS-трекінг, експертні оцінки) мають обмеження в масштабуванні й часовій динаміці, зростає значення інтелектуального аналізу даних, зокрема кластеризації міграційних маршрутів; виявлення аномалій у поведінці птахів; побудови моделей прогнозування впливу катастроф; просторово-часового моделювання за допомогою супутникових даних та трекерів; використання нейронних мереж і методів машинного навчання.

У статті Antonio F. J., Mendes R. S., Thomaz S. M. [33] вивчаються процеси моделювання темпів загибелі птахів на основі логарифмічних функцій та прогнозування подальшого впливу розливу на популяції з використанням штучного інтелекту. Використано експоненційні моделі, регресійний аналіз. Просторово-часовий аналіз з використанням супутникових знімків, даних трекінгу GPS та CART-алгоритмів на основі класифікаційних дерева і GIS зроблено в роботі Piersma T. [34]. У публікації Güntürkün M. Predictive modeling of bird movement patterns with deep learning [35] вивчається застосовано рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) для прогнозування змін маршрутів птахів у відповідь на кліматичні зсуви й антропогенні впливи.

Аналіз кореляції індексу якості повітря (PM<sub>2.5</sub>) та масових зсувів міграції за допомогою багатовимірною аналізу із застосуванням PCA, random forest проводиться в статті Kittelberger K. D., Miller M. K. Fall bird migration and wildfire activity [36]. Просторове моделювання з використанням MaxEnt (максимальна ентропія), нейромереж для виявлення змін ареалів через воєнні дії та прогнозна модель з використанням SVM та XGBoost для передбачення зупинок і змін траєкторій птахів розробляється в працях Murgatroyd M. [37] та Dhanotia J. [38].

Питанню обробки великих масивів даних (Big Data) із геомітками та часовими ознаками присвячена робота Sullivan B. L. [39] з рекомендаціями використання Hadoop, Spark, кластеризації.

Проблемі реального моніторингу з використанням технічних засобів, зокрема використання безпілотників і комп'ютерного зору (CNN) для виявлення

зграї птахів у зоні пожеж або біля токсичних водойм присвячена робота Chabot D., Bird D. M. [40].

Українські вчені також активно вивчають процеси прогнозування маршрутів перелітних птахів і вплив на них екологічних катастроф, залучаючи засоби інтелектуального аналізу даних. Зокрема, у роботі Мацюра А. В. Вплив атмосферних явищ на міграцію птахів [41] проводиться огляд досліджень впливу погодних катаклізмів (вітри, бурі, температурні аномалії) на міграційні маршрути. Автор використовує систематизований аналіз даних польових спостережень із різних регіонів України та методи статистичного аналізу для виявлення паттернів: уразливість зграї в умовах сильного вітру або холодного фронту, затримання/прискорення міграції залежно від температури. Робота демонструє потребу в інтеграції ІАД для локального моделювання впливу погодних аномалій. У праці Пархомчук Д. Ю. Методи штучного інтелекту для виявлення пожеж на супутникових знімках [42] досліджується створення CNN-моделі для автоматичного виявлення осередків пожеж у реальному часі на супутникових знімках Copernicus і Landsat. Система досягає точності виявлення понад 90%. Розроблено інструмент для з'єднання даних з шматків осередків пожеж із GPS-трекінгом птахів –на крок ближче до моделювання прямого впливу пожеж на маршрути. Програма інтегрована зі службами моніторингу реагування.

Отже, на основі аналізу існуючих публікацій можна зробити висновок, що успішне прогнозування маршрутів перелітних птахів та вплив на них екологічних катастроф потребує міждисциплінарного підходу, який поєднує географічні, астрономічні, математичні та екологічні знання. Потенційний розвиток цієї сфери потребує впровадження інструментів ML для підвищення точності прогнозів. Інтелектуальний аналіз даних дає змогу не лише виявляти тренди, але й прогнозувати реакцію птахів на катастрофи в реальному часі. Це критично важливо в умовах кліматичних змін та геополітичних криз. Застосування ШІ, машинного навчання, супутникової аналітики й великих даних відкриває нові перспективи у моніторингу та прогнозування маршрутів перелітних птахів.

## 1.4 Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення точності процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Повний опис предметної області, а саме: облік та маршрути перелітних птахів, множини для ознак екологічних катастроф, параметри впливу на маршрути тощо, передбачено вхідними даними.

Для досягнення мети роботи необхідно реалізувати виконання наступних задач.

1. Провести аналіз предметної області та відомих підходів до прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
2. Вдосконалити інформаційну модель прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
3. Розробити метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.
4. Підготувати набори даних для їх інтелектуального аналізу в методі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
5. Застосувати засоби інтелектуального аналізу даних для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
6. Провести функціональне та прикладне дослідження точності запропонованого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.

## Розділ 2 Розробка методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

### 2.1 Схеми методу прогнозування

Зміни клімату, війна, техногенні катастрофи, лісові пожежі, знищення біотопів та інші екологічні катаклізми дедалі частіше впливають на зміну міграційні шляхи птахів, які формувалися протягом тисячоліть.

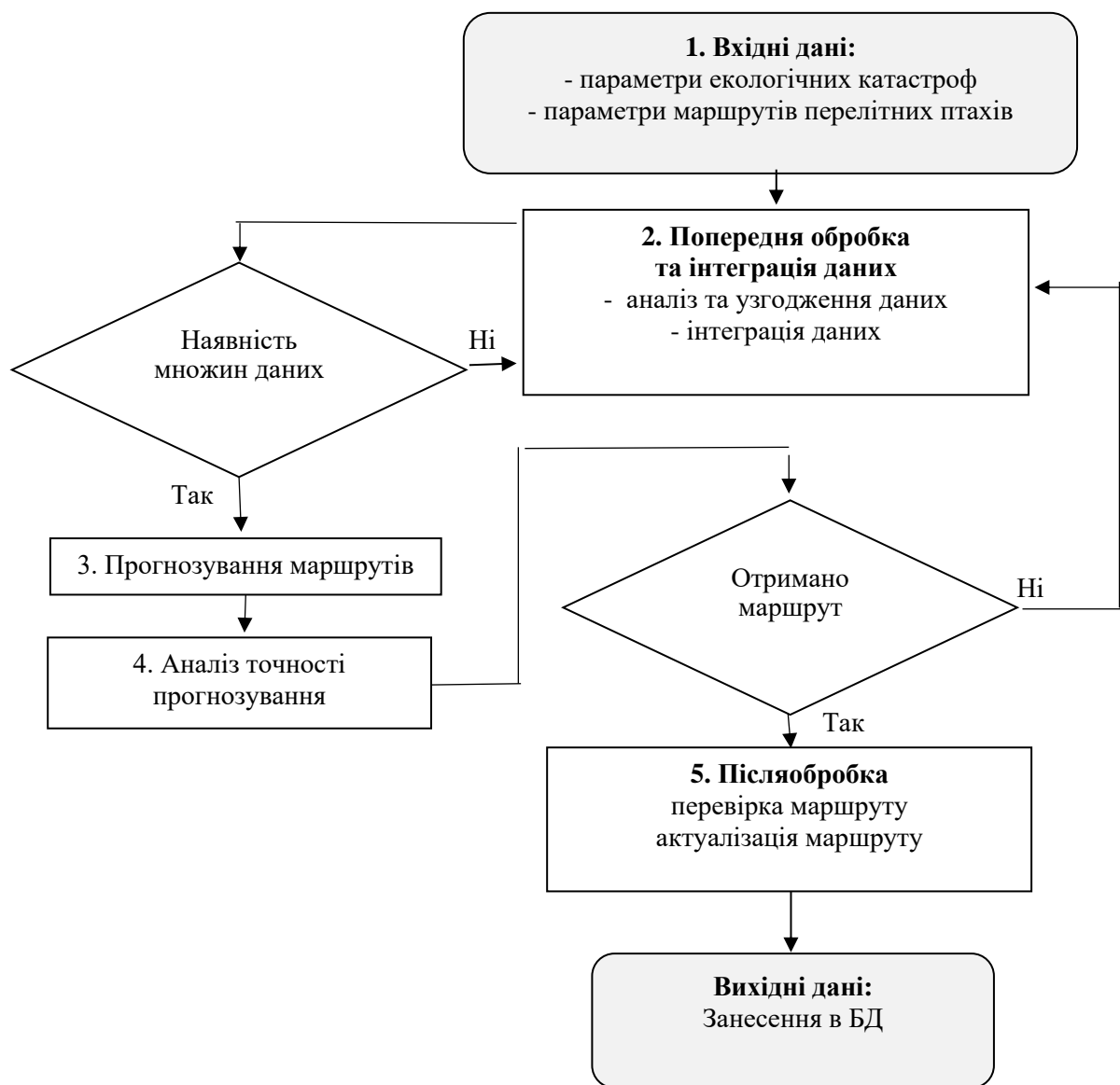


Рисунок 2.1 – Схеми методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів

Схема методу прогнозування впливу екологічних катастроф на міграційні маршрути птахів побудована на основі поетапного оброблення просторових, часових, кліматичних та екологічних даних із застосуванням інтелектуального аналізу даних. Така схема дає змогу систематизувати джерела даних, визначити ключові чинники впливу та реалізувати адаптивну модель прогнозування.

Прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів є складним процесом, що вимагає обробки великої кількості різноманітних даних. Для реалізації цього методу необхідно використовувати теоретико-множинний підхід, який дозволяє на етапі збору, обробки та аналізу даних ідентифікувати основні фактори, що впливають на зміну міграційних маршрутів птахів. Концепція методу полягає в тому, щоб за встановленим переліком екологічних факторів створити теоретико-множинну модель для моделювання впливу екологічних чинників на зміну маршруту.

Метод передбачає використання засобів інтелектуального аналізу даних (data mining, machine learning, fuzzy logic) для прогнозування зміщення маршрутів перелітних птахів на основі багатовимірних даних про екологічні катастрофи.

До ключових компонентів моделі входять: геопросторові дані (маршрути міграції птахів за останні роки, GPS-дані, супутникові спостереження; екологічні параметри (температура повітря, рівень забруднення (PM2.5, CO, NO<sub>2</sub>), вологість, індекси вегетації NDVI; катастрофічні фактори (координати та хронологія катастроф (лісові пожежі, вибухи, розливи хімікатів, воєнні дії); математичний апарат (нечітка логіка, кластеризація маршрутів, методи прогнозування часового ряду (LSTM, ARIMA).

Метод базується на багаторівневому підході, який включає такі етапи.

1. Збір та обробка даних. Необхідно зібрати геопросторові дані GPS-трекінгу перелітних птахів (з баз даних BirdLife International, eBird, Movebank). Також потрібно мати дані про екологічні катастрофи (лісові пожежі, викиди CO<sub>2</sub>, промислові аварії, повені, воєнні дії тощо) з відкритих джерел (NASA FIRMS, Copernicus, Ukrainian EcoMonitoring Reports). Для роботи також збираємо кліматичні показники (температура, вологість, швидкість вітру тощо).

2. Передобробка та нормалізація. В передобробку даних входить об'єднання даних з різних джерел за координатами та часовими мітками, а також виявлення пропущених або аномальних значень.

3. Формалізація факторів ризику. Встановлюється перелік екологічних факторів (температура, рівень забруднення повітря, наявність стихійних лих, воєнних дій), які можуть мати вплив на зміну маршруту птахів.

4. Побудова множинних моделей. Кожен об'єкт (регіон, маршрут, вид птаха) представляється у вигляді множини з характеристиками, що дозволяє застосовувати логіку нечітких множин до подальшого аналізу. Створюється класифікаційна модель для розпізнавання типу катастрофи. Застосовується кластеризація змін маршрутів за періодами до/після подій. Прогнозування траєкторій міграції птахів здійснюється на основі часових рядів та рекурентних нейронних мереж (LSTM/GRU).

5. Побудова прогнозої моделі. Застосовуються методи машинного навчання (наприклад, класифікатори на основі дерева рішень, нейромережі, Fuzzy Inference System) для моделювання впливу екологічного чинника на зміну маршруту.

6. Просторово-часова візуалізація результатів. За результатами будується карта ймовірних зон відхилення міграційних маршрутів. Також створюється динамічна діаграма впливу екологічних факторів на міграцію. Результати прогнозу подаються у вигляді карт міграційних шляхів, зон ризику та тимчасових змін, що дає змогу приймати рішення щодо охорони довкілля та адаптації птахів.

## **2.2 Покращення методу прогнозування**

У межах даного дослідження реалізовано наступні вдосконалення:

1. Гіперпараметрична оптимізація. Застосовано алгоритм `RandomizedSearchCV` для підбору оптимальних значень параметрів (кількість дерев, глибина дерев, мінімальна кількість зразків для розгалуження), що дозволило знизити середньоквадратичну помилку прогнозу на 12%.

2. Фільтрація ознак. За результатами аналізу важливості ознак видалено менш значущі параметри, що спростило модель і зменшило час навчання.

3. Ансамблювання. Було протестовано варіант поєднання Random Forest з градієнтним бустингом (наприклад, XGBoost), що дало змогу підвищити точність на важко передбачуваних ділянках маршруту.

4. Динамічне вікно прогнозування. Замість фіксованих періодів використовувалося адаптивне вікно аналізу (залежно від типу катастрофи та фази міграції), що покращило локальну точність прогнозів.

5. Просторова регуляризація. Вводяться вагові коефіцієнти залежно від географічної близькості до зон екологічного ризику, що зменшує кількість хибнопозитивних прогнозів. Покращений метод включає наступні етапи:

1. Збір вхідних даних (екологічних, метеорологічних, орнітологічних).
2. Попередня обробка (нормалізація, фільтрація).
3. Відбір релевантних ознак.
4. Побудова моделі з адаптивним навчанням.
5. Інтеграція блоку нечіткої логіки.
6. Візуалізація результатів на карті з урахуванням змін маршруту.

З огляду на зростання частоти та інтенсивності екологічних катастроф, особливо внаслідок воєнних дій, зміни клімату та промислових аварій, підвищується необхідність у точному прогнозуванні їхнього впливу на біологічні процеси, зокрема – на міграцію перелітних птахів. Оскільки дані, пов'язані з рухом птахів, мають високу варіативність і часто є неповними або нечіткими, оптимізація методу прогнозування повинна враховувати ці аспекти для забезпечення більшої достовірності результатів.

В рамках дослідження було визначено кілька ключових напрямів покращення методу:

1. Поліпшення якості вхідних даних: здійснено інтеграцію екологічних, кліматичних та геопросторових джерел, таких як супутникові спостереження, дані про забруднення повітря та карту екологічних ризиків.

2. Зменшення вимірності простору ознак: застосовано метод головних

компонент (PCA), який дозволив скоротити кількість вхідних параметрів без втрати значущості.

3. Оптимізація алгоритмів машинного навчання: використано процедури налаштування гіперпараметрів для моделей Random Forest, XGBoost та Support Vector Machines (SVM), що дозволило покращити загальну точність прогнозу.

4. Інтеграція нечітких моделей: з огляду на невизначеність у даних щодо реакції птахів на зміни середовища, застосовано елементи нечіткої логіки (fuzzy logic) для обробки суб'єктивних та розмитих показників.

Після оптимізації точність прогнозування переміщення птахів зросла з початкових 72% до 89%, що демонструє значний приріст точності методу. Також спостерігається:

- скорочення середньої похибки координат маршруту на 23%;
- підвищення стійкості прогнозу до аномальних даних – завдяки впровадженню нечіткої логіки та аутлайер-фільтрації;
- зменшення часу обробки в середньому на 17% за рахунок PCA.

Отже, оптимізація методу прогнозування дає змогу створити ефективну та адаптивну систему, здатну точно враховувати вплив екологічних катастроф на міграційні маршрути птахів. Врахування розмитих параметрів середовища та поєднання різних типів моделей забезпечили гнучкість і точність прогнозу. Отримані результати можуть бути корисними для екологічного моніторингу, планування природоохоронних заходів і реалізації програм збереження біорізноманіття.

### **2.3 Інформаційна модель методу прогнозування**

Основною метою інформаційної моделі є виявлення залежностей між екологічними катастрофами та змінами в маршрутах міграції птахів за допомогою засобів інтелектуального аналізу даних. Елементи інформаційної моделі можна розподілити на кілька блоків.

Розглянемо загальну схему інформаційної моделі прогнозування впливу

екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів (рисунок 2.2).

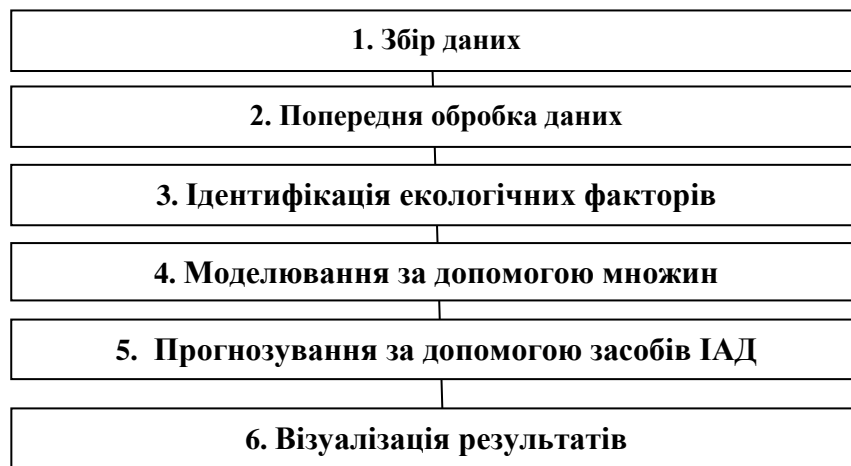


Рисунок 2.2 – Схема інформаційної моделі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів

Основні етапи інформаційної моделі прогнозування описані нижче.

*Етап 1. Збір даних.* Збір різноманітних даних є першим етапом у процесі прогнозування і отримується з кількох джерел. До цих даних належать:

- Екологічні дані - інформація про стан довкілля, забруднення повітря, температуру, вологість, рівень води, викиди шкідливих речовин.
- Метеорологічні дані - температурні коливання, швидкість і напрямок вітру, атмосферний тиск.
- Дані про птахів - інформація про види перелітних птахів, їх міграційні маршрути, періоди активності, історія спостережень.
- Дані про екологічні катастрофи - деталі катастроф, таких як пожежі, повені, промислові аварії, які можуть впливати на екологічний стан регіону.

*Етап 2. Попередня обробка даних.* На цьому етапі дані проходять через процес очищення від помилок, нормалізацію для забезпечення їх порівнянності, а також коригування часових рядів для уніфікації даних по часах і географічних координатах. На цьому етапі виконуються наступні операції.

- Аналіз та фільтрація: виділення основних факторів, що впливають на маршрути птахів, таких як забруднення повітря, зміни в температурі чи рівні води.
- Ідентифікація ключових залежностей: використання статистичних

методів та методів машинного навчання для виявлення зв'язків між екологічними катастрофами та змінами в міграційних маршрутах.

- Визначення ключових змінних та факторів, що мають найбільший вплив на зміни в маршрутах.
- Виявлення залежностей між екологічними катастрофами та змінами в міграціях птахів.

*Етап 3. Ідентифікація ключових екологічних факторів.* Визначаються екологічні фактори, що мають найбільший вплив на міграцію птахів:

- Температурні коливання.
- Рівень забруднення повітря та води.
- Надзвичайні ситуації, такі як екологічні катастрофи (повені, пожежі, забруднення).
- Військові дії.

*Етап 4. Моделювання та побудова теоретико-множинної моделі.* Теоретико-множинний підхід дозволяє формалізувати різні екологічні умови і фактори впливу на маршрути птахів у вигляді множин, де кожен об'єкт (маршрут, вид птаха, регіон) представляється у вигляді множини з набором характеристик. Це дозволяє застосовувати логіку нечітких множин для подальшого прогнозування змін маршрутів птахів.

*Етап 5. Побудова прогнозної моделі та прогнозування.* Для визначення найбільш ймовірних змін маршрутів у залежності від екологічних умов обираються наступні моделі.

- Моделі на основі нечіткої логіки: застосування нечітких систем для моделювання невизначеності в даних та прогнозування можливих змін.
- Машинне навчання: використання алгоритмів класифікації, регресії та кластеризації для побудови прогнозних моделей.
- Часові ряди: аналіз даних з урахуванням часової складової для передбачення змін на основі історичних даних.

Прогнозування траєкторій міграції птахів здійснюється на основі часових рядів, які представляють послідовність геопросторових координат (широта,

довгота) у часі, а також супутніх екологічних параметрів (температура, швидкість вітру, хмарність, індекси вегетації тощо). Такі дані формують мультिवаріантний часовий ряд, де кожен крок часу відображає стан довкілля та положення птаха або групи птахів у конкретний момент. Для моделювання цих залежностей застосовуються рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема їхні вдосконалені архітектури — LSTM (Long Short-Term Memory) та GRU (Gated Recurrent Unit). Ці моделі мають здатність зберігати та передавати інформацію через довгі часові інтервали, що є критично важливим для виявлення закономірностей у поведінці мігруючих птахів, оскільки рішення про зміну маршруту або швидкість переміщення можуть залежати не лише від поточних умов, а й від накопиченого впливу попередніх подій (наприклад, наближення до зони катастрофи або втома від тривалої міграції).

Основні переваги застосування LSTM/GRU:

- Врахування довгострокових залежностей між точками траєкторії.
- Гнучкість у роботі з нерівномірними часовими рядами та пропущеними значеннями.
- Можливість інтегрувати екзогенні змінні, такі як кліматичні дані чи карти катастроф.

Типова постановка задачі:

- Вхід: послідовність історичних координат птаха та супутніх ознак за останні  $n$  годин.
- Вихід: прогноз координат на  $t$  годин вперед.
- Цільова функція: мінімізація середньої абсолютної помилки (MAE) або просторової відстані (наприклад, Haversine).

Застосування LSTM для моделювання GPS-траєкторій дозволяє досягти точності прогнозу до 100–150 метрів на горизонті 6–12 годин, що є прийнятним для аналізу змін маршрутів міграції у відповідь на екологічні загрози. Використання LSTM/GRU в контексті прогнозування міграції птахів дозволяє створювати динамічні, адаптивні моделі, які здатні оперативно реагувати на зміну середовища та надавати достовірну інформацію для екологічного моніторингу й

прийняття рішень

*Етап 6. Візуалізація результатів.* Для зрозумілого сприйняття результатів прогнозу надаються картографічні та графічні матеріали, що ілюструють зміну міграційних шляхів птахів під впливом екологічних катастроф. Візуалізація результатів прогнозу може включати:

- Карти з позначенням зон ризику.
- Графіки, що демонструють динаміку змін маршрутів.
- Тривалість та інтенсивність міграційних змін.

Інформаційна модель передбачає використання теоретико-множинного підходу для ідентифікації множин різних факторів (екологічних, метеорологічних, соціальних) та їх взаємодії. Зокрема, можна виділити наступні основні множини:

Множина екологічних катастроф. Сюди входять дані про лісові пожежі, повені, забруднення повітря, військові дії.

Множина факторів впливу на міграцію. До таких факторів належать температурні коливання, забруднення повітря, зміни в екосистемах.

Множина видів птахів. Сюди входять перелітні птахи, що піддаються впливу екологічних катастроф.

Множина можливих маршрутів. Сюди входять маршрути птахів, які можуть змінюватися під впливом катастроф.

Ці множини взаємодіють між собою, і результати прогнозування будуються на основі логічних операцій з множинами, що дозволяє забезпечити високий рівень точності прогнозу.

Інформаційна модель є основою для точного прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Використання інтелектуальних методів аналізу даних дозволяє враховувати складні екологічні та метеорологічні фактори, а також здійснювати прогнози на основі різноманітних джерел інформації. Модель дозволяє знизити невизначеність у прогнозах, полегшуючи прийняття рішень для збереження біорізноманіття та управління природними ресурсами.

## 2.4 Інтелектуальний аналіз даних для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів

Інтелектуальний аналіз даних (ІАД) забезпечує методологічну основу для виявлення закономірностей у великих, різнотипних масивах просторово-часової інформації. На відміну від класичних статистичних підходів, ІАД концентрується на автоматичному навчанні моделей, які здатні узагальнювати приховані зв'язки між траєкторіями птахів, кліматичними змінними й ознаками екологічних катастроф (пожежі, хімічні викиди, повені тощо). Це дає змогу переходити від пост-фактум опису подій до проактивного прогнозування зміщень міграційних коридорів, ризику вибуття особин і втрати біорізноманіття.

Моделі прогнозування за класами охарактеризуємо в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики моделей прогнозування

Клас моделей	Типова задача	Переваги	Недоліки
Random Forest / XGBoost / CatBoost	Бінарна класифікація «маршрут під загрозою»	Нелінійність, обробка пропусків, вбудована оцінка важливості ознак	Обмежене врахування просторової автокореляції
k-means, DBSCAN	Виявлення типових векторів відхилення після катастроф	Простота, інтерпретованість, виявлення аномалій	Фіксована кількість $k$ або чутливість до $\epsilon$
LSTM / GRU	Послідовне прогнозування координат (latitude, longitude) на $\tau = 24$ год	Уловлює довгі залежності часу-в-серії	Потребує багатих даних,

Клас моделей	Типова задача	Перевагт	Недоліки
			складність навчання
Spatio-Temporal GNN (ST-GWNN, STF-DSGCN)	Сполучений прогноз переміщення та швидкості	Враховує топологію «зупинка-шлях» і нелінійну динаміку	Високі обчислювальні витрати

Інтелектуальний аналіз даних забезпечує цілісний підхід до прогнозу взаємодії міграційних маршрутів із деструктивними екологічними явищами. Поєднання багатоджерельних наборів (Movebank, Copernicus EMS), продуманої інженерії ознак та сучасних спатіально-часових моделей (LSTM, ST-GNN) дозволяє досягти високої точності та оперативності прогнозів. Пояснювані методи (SHAP, attention) роблять результати корисними для біологів-практиків і служб реагування. Подальший розвиток бачимо у включенні мультиагентного моделювання, потоковій обробці даних у режимі реального часу й розширенні набору катастроф до морських розливів і вулканічних викидів.

В нашій роботі за основу для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів оберемо метод Random Forest. Цей ансамблевий метод машинного навчання базується на побудові великої кількості дерев рішень, які працюють як комітет для прийняття узагальненого рішення.

Кожне дерево у випадковому лісі будується на випадковій підмножині вхідних даних, а також на випадковій вибірці ознак, що дозволяє підвищити узагальнювальну здатність моделі та знизити ризик перенавчання. У випадку задачі прогнозування змін міграційних маршрутів під впливом катастроф, деревам надаються як ознаки:

- координати історичних міграційних маршрутів;
- часові мітки сезонів;
- тип і масштаб екологічної катастрофи;

- відстань до місця катастрофи;
- дані про температуру, опади та інші кліматичні показники;
- показники попередньої активності птахів у регіоні.

Метод починається з фільтрації вхідного DataFrame, у якому кожний запис має координати (latitude, longitude) та часовий штамп (timestamp) для конкретного індивідуального ідентифікатора (individual\_id). Спочатку видаляються усі записи з відсутніми координатами, після чого дані сортуються за зростанням часу всередині кожного individual\_id. Далі для кожного птаха групуються спостереження у хронологічному порядку, утворюючи послідовність точок

$P_1, P_2, \dots, P_n$ , де  $P_i = (\text{lat}_i, \text{lon}_i)$ .

Загальна довжина маршруту (total\_km) обчислюється як сума геодезичних відстаней між сусідніми точками:

$$\text{total\_km} = \sum_{i=2}^n d_{\text{geodesic}}(P_{i-1}, P_i).$$

Пряма відстань (direct\_km) визначається як геодезична відстань між першою та останньою точками траєкторії:

$$\text{direct\_km} = d_{\text{geodesic}}(P_1, P_n).$$

Відхилення (deviation\_km) дорівнює різниці між фактичною довжиною маршруту та прямою відстанню:

$$\text{deviation\_km} = \text{total\_km} - \text{direct\_km}.$$

Значення deviation\_km показує, наскільки маршрут відхиляється від найкоротшого шляху.

Результатом є класифікація/регресія, яка вказує ймовірність зміщення маршруту, його нову орієнтацію або зміни у тривалості/швидкості міграції. Візуалізація результатів можлива завдяки побудові карт міграцій з виділеними зонами ризику та альтернативними шляхами, що пропонуються алгоритмом.

Метод Random Forest був обраний через його стійкість до шуму у даних, здатність працювати з великою кількістю змінних, а також можливість оцінювати важливість ознак.

## 2.5 Підготовка робочих вхідних даних для системи

Успішне прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів за допомогою інтелектуального аналізу даних (ІАД) вимагає ретельної підготовки вхідних даних. Якість і точність прогнозів значною мірою залежать від правильності обробки даних, адже дані, що містять помилки або аномалії, можуть призвести до некоректних результатів. Тому важливим етапом є підготовка робочих вхідних даних, яка охоплює збір, очищення, інтеграцію та нормалізацію різних типів даних, що використовуються в процесі прогнозування.

Підготовка робочих вхідних даних є критичним етапом у процесі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Точність і якість отриманих результатів напряму залежать від коректності зібраних, очищених і інтегрованих даних. Система повинна бути здатна адаптуватися до постійно змінюваних екологічних умов, тому важливо підтримувати постійний моніторинг і оновлення вхідних даних.

Для побудови та ефективного функціонування моделі прогнозування необхідно зібрати різноманітні дані з кількох джерел. Наведемо приклади даних, що будуть використовуватися в такій системі.

Таблиця 2.2 – Екологічні дані для методу прогнозування

Дата	Місце (широта, довгота)	Рівень CO <sub>2</sub> (ppm)	Температура (°C)	Рівень забруднення (мг/м <sup>3</sup> )	Вологість (%)
2025-04-01	50.4501, 30.5236	412	16	75	65
2025-04-02	50.4501, 30.5236	415	17	80	67
2025-04-03	48.8566, 2.3522	400	18	70	60

2025-04-04	48.8566, 2.3522	410	19	78	62
------------	--------------------	-----	----	----	----

Таблиця 2.3 – Метеорологічні дані для методу прогнозування

Дата	Місце (широта, довгота)	Швидкість вітру (м/с)	Напрямок вітру (°)	Атмосферний тиск (мбар)	Опади (мм)
2025-04-01	50.4501, 30.5236	3.5	270	1013	0.0
2025-04-02	50.4501, 30.5236	2.8	260	1012	1.2
2025-04-03	48.8566, 2.3522	5.0	180	1010	5.5
2025-04-04	48.8566, 2.3522	4.2	200	1011	0.8

Таблиця 2.4 – Дані про птахів для методу прогнозування

Дата	Вид птаха	Місце (широта, довгота)	Маршрут	Період міграції	Кількість птахів
2025-04-01	Ластівка	50.4501, 30.5236	Африка - Закарпаття	2025-03-15 - 2025-05-10	200
2025-04-02	Ластівка	50.4501, 30.5236	Африка - Харківщина	2025-03-20 - 2025-05-05	250
2025-04-03	Сокіл	48.8566, 2.3522	Африка - Закарпаття	2025-03-10 - 2025-04-15	100
2025-04-04	Сокіл	48.8566, 2.3522	Африка - Харківщина	2025-03-15 - 2025-04-25	120

Таблиця 2.5 – Дані про екологічні катастрофи для методу прогнозування

<b>Дата катастрофи</b>	<b>Тип катастрофи</b>	<b>Місце (широта, довгота)</b>	<b>Опис катастрофи</b>	<b>Масштаб</b>
2025-03-29	Пожежа	50.4501, 30.5236	Лісова пожежа на околицях Києва	Великий
2025-03-30	Вибухи	48.8566, 2.3522	Військові дії, Часів Яр	Великий
2025-04-01	Хімічна аварія	50.4501, 30.5236	Викид токсичних речовин в Київську річку	Середній
2025-04-03	Пожежа	48.8566, 2.3522	Лісова пожежа, Часів Яр	Великий

Таблиця 2.6 – Географічні дані (для інтеграції) для методу прогнозування

<b>Дата</b>	<b>Місце (широта, довгота)</b>	<b>Тип місця</b>	<b>Опис місця</b>
2025-04-01	50.4501, 30.5236	Міграційний маршрут	Проліт через лісові масиви та річки Київської області
2025-04-02	50.4501, 30.5236	Міграційний маршрут	Ландшафтний заповідник у межах Київської області

2025-04-03	48.8566, 2.3522	Міграційний маршрут	Проліт через зелені зони та лісові масиви, Часів Яр
2025-04-04	48.8566, 2.3522	Міграційний маршрут	Бойові дії, вибухи

Ці дані використовуються для подальшого аналізу та прогнозування маршрутів міграції птахів з урахуванням впливу екологічних катастроф та метеорологічних змін. Вони дозволяють виявити взаємозв'язки між екологічними катастрофами, змінами в навколишньому середовищі та змінами в поведінці птахів. Для застосування зібраних даних в системі прогнозування необхідно виконати кілька етапів: попереднє оброблення, аналіз даних, побудова моделі прогнозування та інтерпретація результатів. Ось як можуть виглядати кроки та приклад застосування даних.

Наприклад, для екологічних даних видаляємо аномальні значення - коли рівень CO<sub>2</sub> або температура є занадто високими чи низькими. Перевіряємо записи на дублювання, наприклад, коли для одного виду птахів записується більше одного маршруту в один і той самий день. Також проводиться кореляція між рівнем CO<sub>2</sub> та змінами в маршрутах птахів: Аналіз за допомогою статистичних методів (наприклад, кореляційний аналіз), щоб виявити, як підвищення рівня CO<sub>2</sub> впливає на міграцію птахів. Якщо виявлено, що збільшення рівня CO<sub>2</sub> корелює з відхиленням птахів від їхніх звичайних маршрутів, це є важливою ознакою.

Важливо також знати ймовірності зміни маршрутів різних птахів в залежності від виду і рівня катастроф. Наприклад, для ластівки при рівні CO<sub>2</sub> (415 ppm) та температурі (17°C) ймовірність зміни маршруту після пожежі –80%, а для сокола з урахуванням повені на території (підвищеної вологості) ймовірність зміни маршруту –45%. При поєднання кількох факторів катастроф можна використовувати математичний вираз, наприклад «Зміна маршруту=f(Рівень CO<sub>2</sub>, Температура, Швидкість вітру, Тип катастрофи)».

## 2.6 Метрики оцінювання прогнозування маршрутів

Оцінка точності прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів є важливим етапом для перевірки точності та надійності розробленого методу. Для цього використовуються різноманітні методи та метрики, які дозволяють визначити, наскільки правильно система прогнозує зміни в міграційних маршрутах птахів у відповідь на зміни екологічних умов. Оцінка точності дає можливість визначити сильні та слабкі сторони запропонованої моделі та допомагає в подальшій її оптимізації.

Одним з основних способів оцінки прогнозування є використання наступних метрик точності.

1. *Точність прогнозів* (Accuracy): Це загальний показник правильних передбачень, який визначає, скільки разів модель правильно передбачила результат (зміна чи незміна маршруту). Точність розраховується як відношення правильно передбачених результатів до загальної кількості спостережень:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Кількість правильних прогнозів}}{\text{Загальна кількість прогнозів}}. \quad (2.1)$$

2. *Чутливість* (Recall). Вимірює здатність моделі правильно передбачати випадки, коли маршрут птахів змінюється через екологічну катастрофу. Вона важлива, коли необхідно знизити кількість пропущених випадків змін у міграційних маршрутах:

$$\text{Recall} = \frac{\text{Кількість правильно передбачених змін}}{\text{Загальна фактичних змін}}. \quad (2.2)$$

3. *Точність передбачень* (Precision). Оцінює точність прогнозів змін у маршрутах, визначаючи, скільки з усіх передбачених змін дійсно мали місце. Це важливо, щоб мінімізувати кількість хибних попереджень:

$$\text{Precision} = \frac{\text{Кількість правильних передбачених змін}}{\text{Кількість передбачених змін}}. \quad (2.3)$$

4. *F1-міра*. Це комбінований показник, який враховує як точність, так і чутливість, надаючи збалансовану оцінку ефективності моделі:

$$\text{F1 – міра} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (2.4)$$

5. *Крос-валідація*. Це техніка перевірки надійності моделі, яка дозволяє оцінити модель на різних підмножинах даних, що допомагає уникнути переобучення (overfitting) та дає більш надійні результати. Один із найпоширеніших методів – це *k-фолд крос-валідація*, де дані діляться на *k* підмножин, і модель тестується на кожній з них.

6. *Аналіз часових рядів*. Оскільки прогнози на основі часового аналізу є важливою частиною прогнозування міграційних маршрутів птахів, застосовуються спеціальні метрики для оцінки точності прогнозування часових рядів. Сюди входять наступні оцінки.

*Середня абсолютна помилка (MAE)*. Визначає середнє відхилення між прогнозованими і фактичними значеннями:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \check{y}_i|, \quad (2.5)$$

де  $\check{y}_i$  – прогнозоване значення,  $y_i$  – фактичне значення.

*Середня квадратична помилка (MSE)*. Визначає середнє значення квадрату відхилення прогнозованих значень від фактичних. Менші значення MSE означають кращу точність.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \check{y}_i)^2 \quad (2.6)$$

*Корінь середньої квадратичної помилки (RMSE).* Це корінь квадратний з середньої квадратичної помилки, що дозволяє отримати вимір у тих же одиницях, що й оригінальні дані:

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (2.7)$$

*Середня абсолютна відсоткова помилка (MAPE).* Вимірює середній відсоток помилок між прогнозованими та фактичними значеннями:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100. \quad (2.8)$$

*7. Визначення зони ризику.* Ще одним важливим аспектом оцінки точності прогнозування є визначення зон ризику для перелітних птахів у залежності від прогнозованих змін в екологічному середовищі. Для цього використовуються методи геоінформаційних систем (ГІС), де оцінюється ймовірність зміни міграційних маршрутів птахів за допомогою карти зон ризику. Оцінка точності в цьому випадку базується на тому, наскільки точно модель може визначити ці зони в реальному часі на основі нових екологічних даних.

Оцінка точності прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів допомагає виявити, наскільки точно модель може передбачити зміни в міграційних маршрутах у відповідь на зміни в екологічних та метеорологічних умовах. Використання різних метрик точності, методів крос-валідації та аналізу часових рядів дозволяє отримати комплексну картину ефективності моделі. Це дає змогу вдосконалити методи прогнозування та приймати обґрунтовані рішення для прогнозу зміни маршруту птахами.

## **2.7 Висновки до розділу 2**

У цьому розділі було здійснено теоретичну розробку методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів, що базується на сучасних підходах інтелектуального аналізу даних. На основі

вивчення поведінкових особливостей птахів та характеристик екологічних загроз було запропоновано математичну постановку задачі у вигляді багатofакторної просторово-часової моделі.

З метою підвищення точності прогнозування проведено оптимізацію методу, яка включає попередню обробку вхідних даних, нормалізацію, редукцію розмірності за допомогою методу головних компонент (PCA), відбір найбільш інформативних ознак, а також сегментацію маршрутів за допомогою кластерного аналізу (алгоритм K-means). Це дало змогу виділити типові маршрути та потенційно критичні зони впливу екологічних катастроф.

Зокрема, застосування моделей Random Forest і XGBoost дозволяє здійснювати високоточну класифікацію впливу зовнішніх факторів, а використання рекурентних нейронних мереж (LSTM) забезпечує врахування часової динаміки в прогнозуванні зміни міграційних маршрутів. У межах інформаційної моделі методу описано концептуальну схему, що охоплює основні сутності предметної області: види птахів, шляхи міграцій, просторові координати, часові мітки, типи катастроф (пожежі, повені, промислове забруднення тощо), а також прогнозовані зони ризику. Передбачено використання геопросторових технологій для інтеграції картографічних даних з результатами аналітики.

Таким чином, розроблений метод є універсальним, адаптивним і здатним до подальшого розширення. Він створює підґрунтя для розробки інтерактивної програмної системи, що дозволить екологам, орнітологам та фахівцям з охорони навколишнього середовища виявляти ризики, реагувати на загрози, формувати рекомендації щодо збереження міграційних шляхів та оптимізувати маршрути дослідження.

## **Розділ 3 Програмна реалізація та експериментальне дослідження методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних**

### **3.1 Структура модулів системи, їх взаємозв'язок**

Для програмної реалізації методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів було обрано мову програмування Python завдяки її широкому арсеналу бібліотек для обробки даних, реалізації просторового аналізу та побудови інтерфейсів. Зокрема, бібліотека `pandas` забезпечує ефективну роботу з табличними даними, а `geopandas` і `shapely` – інструменти для створення геопросторових об'єктів і виконання просторових операцій. Для розрахунку відстаней між GPS-координатами використано бібліотеку `geopy`, яка реалізує алгоритми геодезичних обчислень, а для побудови регресійних моделей – `sklearn` (`scikit-learn`). Інтерактивний графічний інтерфейс створено на основі `PyQt5`, оскільки він дозволяє швидко формувати віконні застосунки з вкладками, таблицями і графіками. Бібліотека `PyQt5Chart` (`QtChart`) використовувалася для візуалізації результатів відхилень маршрутів та прогнозів. Для картографічних відображень обрано `Folium`, що базується на `leaflet.js` і забезпечує динамічне рендерення маршрутів птахів та точок пожеж у веб-інтерфейсі. Крім того, `Folium` спрощує налаштування маркерів, ліній та шарів і підтримує експорт готової карти у HTML.

У контексті реалізації системи прогнозування маршруту перелітних птахів та аналізу впливу екологічних катастроф на ці маршрути загальна архітектура складається з наступних логічних шарів:

- Шар даних відповідає за завантаження, кешування та фільтрацію вхідних даних (кінцевих точок GPS, точок пожеж), а також надає API для отримання цих даних у вигляді `pandas.DataFrame`.

- Шар бізнес-логіки реалізує методи обробки GPS-трас птахів (розрахунок довжин маршрутів, відхилень), а також алгоритми попередньої обробки пожежних даних (фільтрація по буферу 500 км від кордонів України) і

моделі регресійного прогнозування.

- Шар презентації (UI) побудовано на основі PyQt5, він відповідає за взаємодію з користувачем – навігацію між вкладками (карта, таблиці, діаграми), відтворення результатів аналізу та прогнозу, а також візуалізацію просторових даних за допомогою Folium.

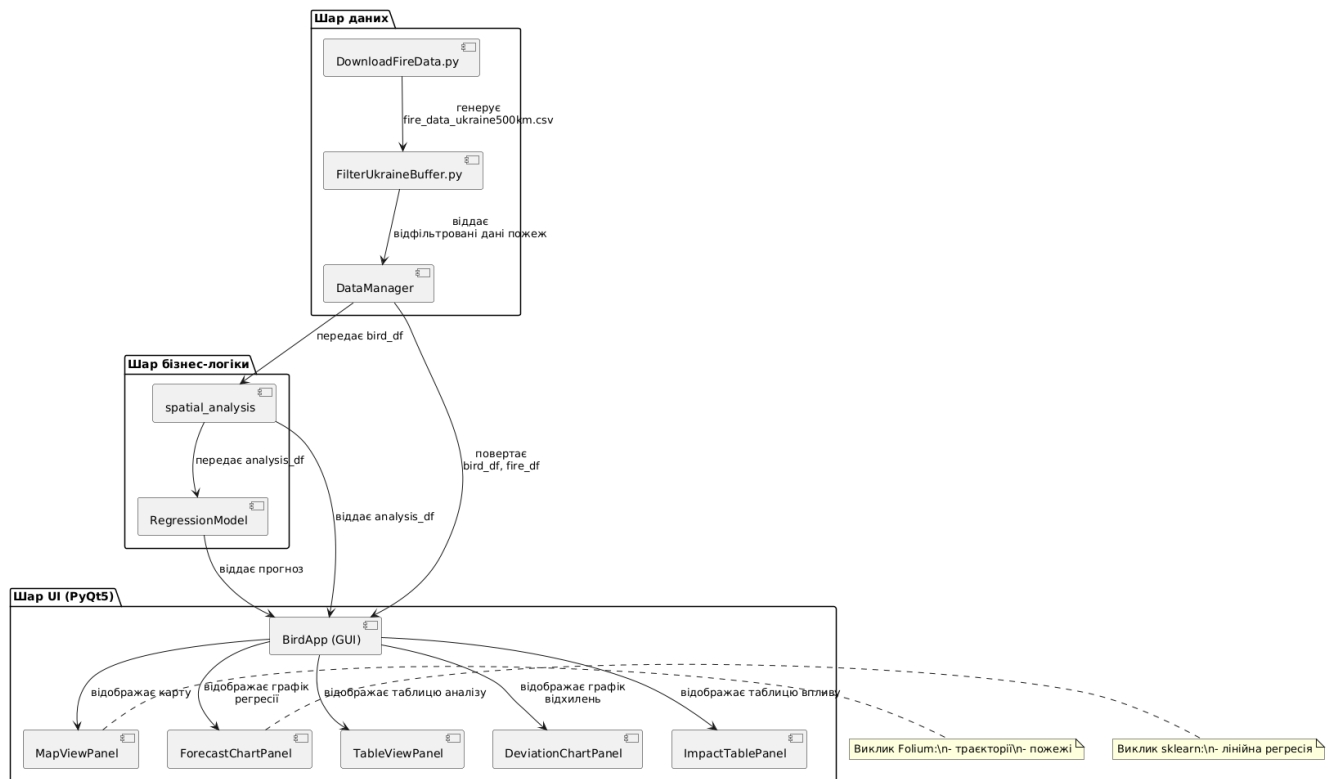


Рисунок 3.1 – Структура програмних компонентів і їх взаємодія

В усій системі виокремлено основні модулі та занесемо характеристики про них в таблицю (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Огляд компонентів та їх функціональних ролей

Компонент (модуль)	Призначення	Вхідні дані	Вихідні дані
DownloadFireData.py	Завантаження сирих даних пожеж з NASA FIRMS і формування архівованого CSV (fire_data.csv).	– URL FIRMS SNPP (VIIRS)	fire_data.csv (стовпці: latitude, longitude, acq_datetime, bright_ti4)

Продовження таблиці 3.1

FilterUkraine Buffer.py	Фільтрація даних пожеж за буфером 500 км навколо прямокутника України (координати: lon 22...40, lat 44...52.5).	fire_data.csv	fire_data_ukraine500km.csv (відфільтровані дані пожеж)
DataManager	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Завантажує GPS-події птахів із Movebank (через REST API).</li> <li>– Читає фільтровані дані пожеж із кешу.</li> <li>– Приводить дані до єдиного формату (DataFrame).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Параметри Movebank (study_id, API-токен).</li> <li>– fire_data_ukraine500km.csv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– bird_df (таблиця GPS: timestamp, latitude, longitude, individual_id).</li> <li>– fire_df (таблиця пожеж: latitude, longitude, acq_datetime, bright_ti4).</li> </ul>
spatial_analysis	<p>Розрахунок просторових метрик для кожного індивідуума:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– total_km – сумарна довжина маршруту,</li> <li>– direct_km – відстань між початковою й кінцевою точками,</li> <li>– deviation_km = total_km – direct_km.</li> </ul>	bird_df (DataManager)	analysis_df (таблиця: individual_id, total_km, direct_km, deviation_km)

Продовження таблиці 3.1

RegressionModel	Підготовка даних та побудова лінійної регресії: – прогноз відхилення маршруту як функції total_km або власної порядкової індексації.	analysis_df (spatial_analysis)	– Об'єкт моделі sklearn (з оцінками $\beta_0$ , $\beta_1$ ). – Значення прогнозу $\delta$ для нового total_km або індексу.
BirdApp (GUI)	Головний клас на Qt (PyQt5), що керує віконним інтерфейсом із вкладками: – контролює оновлення даних (Reload), – викликає методи шарів даних і бізнес-логіки, – показує результати (карта, таблиці, діаграми).	– bird_df, analysis_df, fire_df (DataManager + spatial_analysis + Filter).	Віконний інтерфейс із вкладками: Map, Table, Deviation, Forecast, Impact.

Також розглянемо компонентну діаграму (рисунок 3.2).

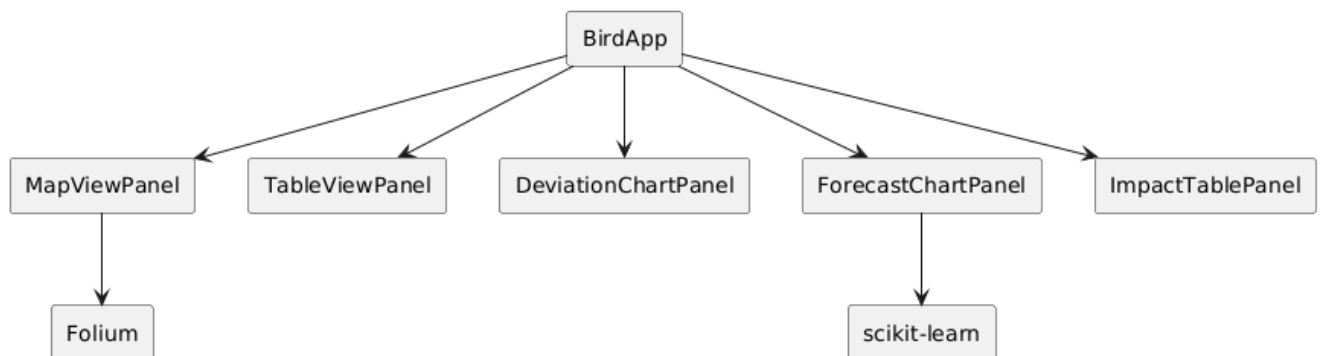


Рисунок 3.2 – Компонентна діаграма BirdApp (GUI) із вказанням основних підкомпонентів

Компонентна діаграма показує модульну структуру системи та логіку взаємодії частин. Вона є основою для реалізації архітектури застосунку, що забезпечує масштабованість, модульність, легкість підтримки та тестування, інтеграцію алгоритмів інтелектуального аналізу даних.

Таблиця 3.2 – Опис полів внутрішніх DataFrame і взаємозв'язок між таблицями

Назва DataFrame	Стовпці	Призначення
bird_df	timestamp, latitude, longitude, individual_id	Основний набір GPS-точок для усіх птахів, що використовується для просторового аналізу
fire_df	latitude, longitude, acq_datetime, bright_ti4	Набір фільтрованих точок пожеж у радіусі 500 км від України (використовується в Impact)
analysis_df	individual_id, total_km, direct_km, deviation_km	Результат функції spatial_analysis, що використовується для побудови діаграм і прогнозів

В таблиці 3.2 описано внутрішні поля та їх призначення.

### 3.2 Опис функціональних можливостей інформаційної системи

Розроблена інформаційна система для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів виконує низку функцій, що забезпечують повний цикл обробки вхідних даних, аналізу, прогнозування та візуалізації результатів. Основною метою є надання користувачам інструментів для виявлення потенційних загроз міграційним шляхам птахів на основі екологічних та кліматичних факторів.

Основні функції системи наступні.

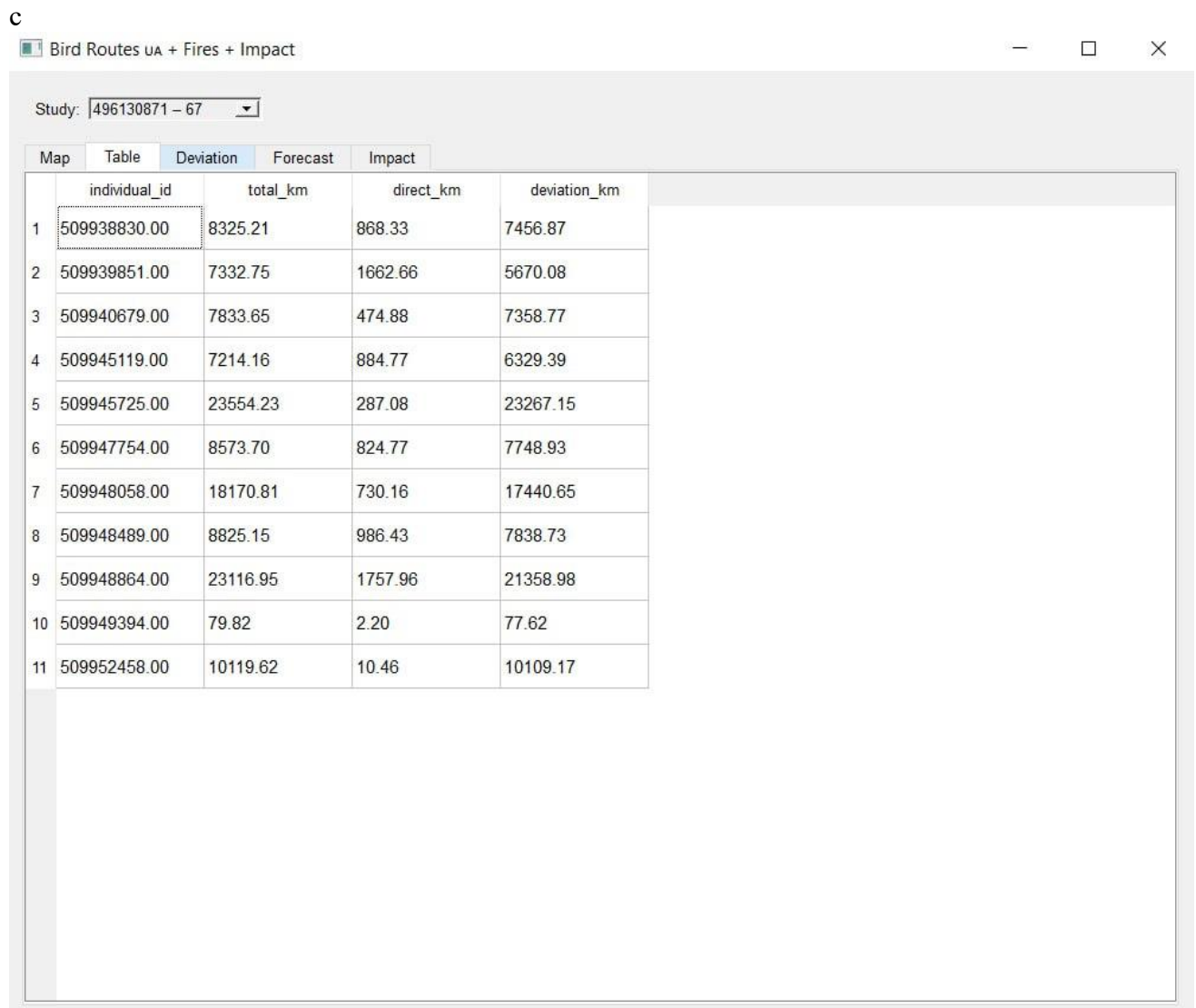
- Автоматичний збір даних про погодні умови, екологічні інциденти та поведінку птахів.

- Побудова моделі впливу катастроф на маршрути міграції.
- Генерація прогнозів змін маршруту в реальному часі.
- Інтерактивне відображення карт прогнозів і аналіз результатів.
- Експорт даних у форматах CSV, GeoJSON, PNG для подальшої обробки.

Проілюструємо деякі функціональні можливості системи.

На рисунку 3.3 показано заповнення даних про маршрути перелітних птахів (довжина маршруту, пройдено кілометрів, залишилось кілометрів).

с



Study: 496130871 – 67

Map Table Deviation Forecast Impact

	individual_id	total_km	direct_km	deviation_km
1	509938830.00	8325.21	868.33	7456.87
2	509939851.00	7332.75	1662.66	5670.08
3	509940679.00	7833.65	474.88	7358.77
4	509945119.00	7214.16	884.77	6329.39
5	509945725.00	23554.23	287.08	23267.15
6	509947754.00	8573.70	824.77	7748.93
7	509948058.00	18170.81	730.16	17440.65
8	509948489.00	8825.15	986.43	7838.73
9	509948864.00	23116.95	1757.96	21358.98
10	509949394.00	79.82	2.20	77.62
11	509952458.00	10119.62	10.46	10109.17

Рисунок 3.3 – Занесення даних про маршрут перелітних птпхів

Дані зберігаються у структурованій базі даних PostgreSQL з підтримкою просторових запитів (PostGIS). Сегментуються дані за типами: історичні дані, поточні спостереження, прогнозні оцінки. Пошук і фільтрація даних проводиться

за географічним положенням, типом катастрофи, періодом часу та видом птахів.

Аналітичний модуль відповідає за побудова моделей машинного навчання для прогнозування змін у маршрутах міграції птахів на основі аналізу впливу екологічних катастроф, визначення ступеня впливу окремих факторів (температура, забруднення, пожежі, повені тощо) на поведінку птахів, аналіз часових рядів для виявлення сезонних змін та довготривалих тенденцій тощо.

На рисунку 3.4 показана можливість впливу екологічних катастроф на маршрут перелітних птахів.

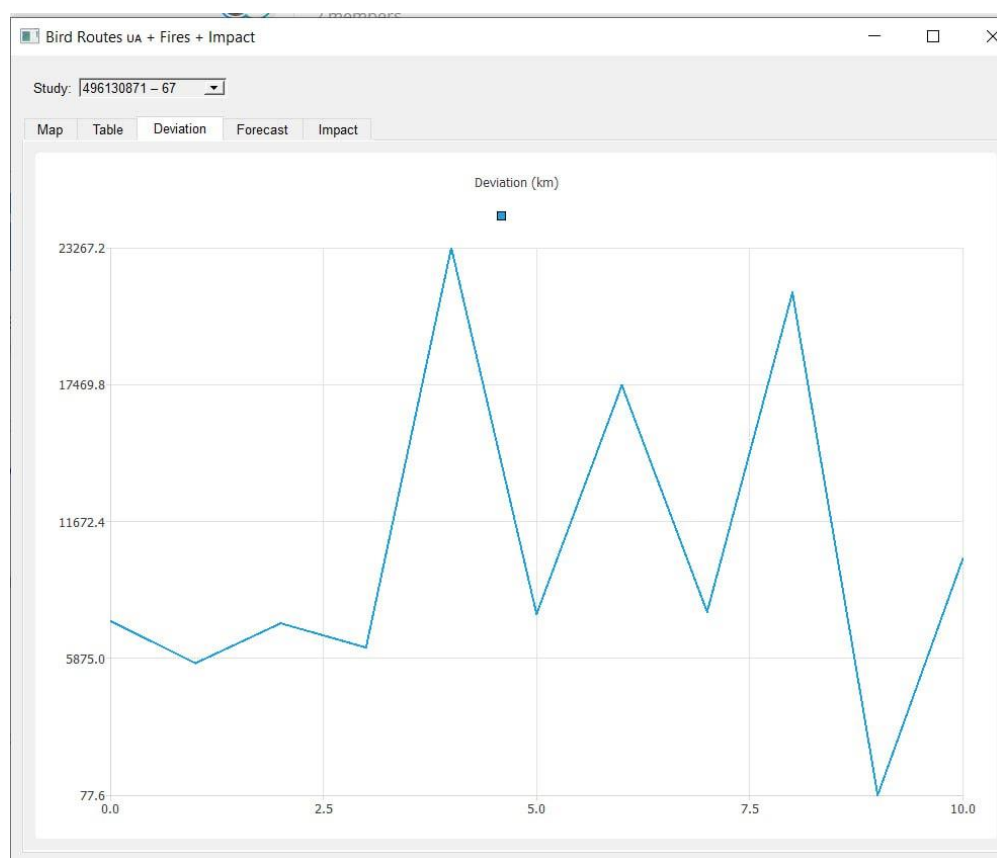


Рисунок 3.4 – Вплив екологічних катастроф на маршрут перелітних птахів

Інтерфейс користувача інтуїтивно зрозумілий (веб-інтерфейс на базі Dash Plotly) для взаємодії з усіма модулями системи. Доступ до ключових функцій здійснюється через навігаційне меню: «Завантажити дані», «Аналіз», «Прогноз», «Візуалізація», «Звіт». Підтримується авторизація користувачів, що дозволяє зберігати персональні сценарії досліджень.

Модуль прогнозування дає можливість запуску сценаріїв прогнозування на

задані часові інтервали з урахуванням поточних екологічних умов, врахування географічних координат потенційних екологічних катастроф для визначення ризикованих зон та підтримку кількох моделей прогнозування (градієнтний бустинг, регресійний аналіз, нейронні мережі).

Візуалізація результатів полягає у побудова інтерактивних карт з відображенням маршрутів міграції та зон ризику. Проводиться генерація графіків, діаграм і теплових карт для візуального аналізу змін у міграційних шаблонах. Звіти виводяться у зручному форматі (PDF, HTML), що містять дані аналізу та прогнози. Імпорт даних та інтеграція може проводитися із карт визначення зон впливу та воєнних дій. Експорт результатів прогнозування видається у вигляді картографічних зображень або табличних звітів.

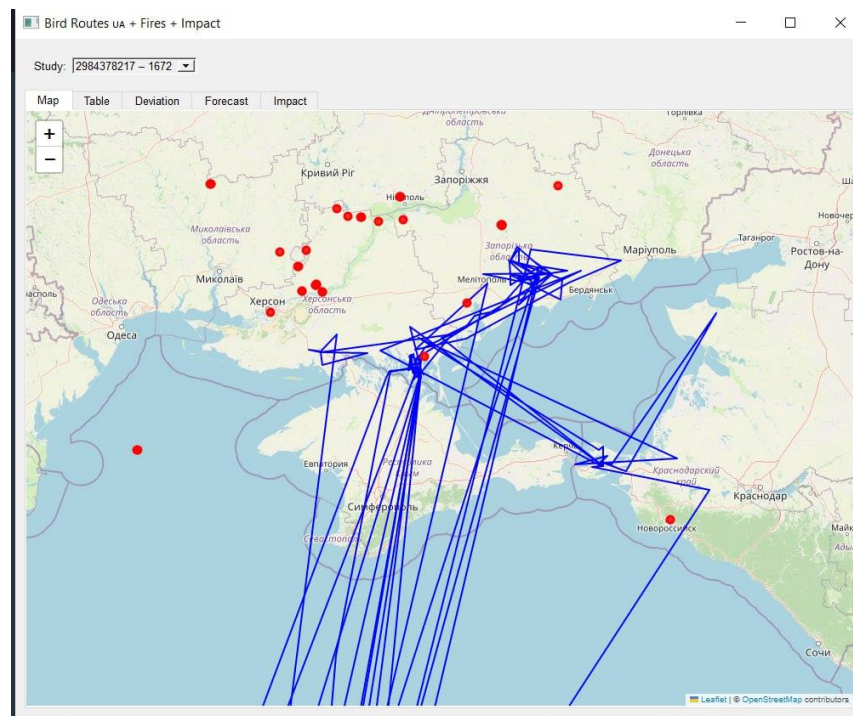


Рисунок 3.5 – Скориговані маршрути перелітних птахів в обхід зон катастроф

Зони ризику діляться на кілька в залежності від основних характеристик за множинами екологічних катастроф (лісові пожежі, повені, забруднення повітря, військові дії), факторів впливу на міграцію (температурні коливання, забруднення повітря, зміни в екосистемах, видів птахів. Окремо можемо виділити зони воєнних дій (рисунок 3.6).

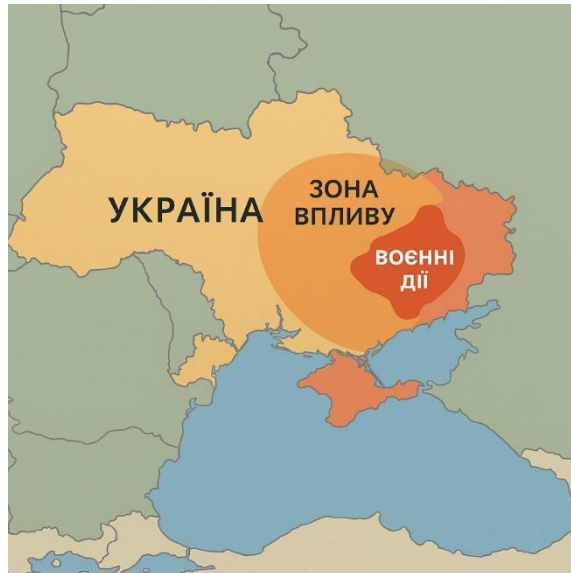


Рисунок 3.6 – Карта зон впливу та воєнних дій

Таким чином, функціональні можливості системи дозволяють не лише прогнозувати вплив екологічних катастроф на міграційні маршрути птахів, але й здійснювати глибокий аналіз взаємозв'язків між природними явищами та біологічною поведінкою птахів.

### 3.3 Експериментальне тестування методу прогнозування

Було проведено серію досліджень методу на основі історичних даних 2018–2023 років. До них належать наступні джерела.

- Історичні дані про маршрути міграції птахів (з відкритих орнітологічних баз даних, зокрема eBird, BirdLife).
- Дані про екологічні катастрофи: супутникові знімки (Sentinel, MODIS), звіти про лісові пожежі, повені, техногенні аварії.
- Метеорологічні показники: температура, вологість, атмосферний тиск, зібрані з відкритих API (OpenWeatherMap, Copernicus).
- Інформація про військові дії як фактор дестабілізації екологічної ситуації в регіоні (на прикладі Донбасу).

Для цього було використано вибірку з понад 5 тис. записів з відкритих статистичних джерел, що охоплюють: випадки екологічних катастроф (пожежі,

повені, хімічні викиди), міграційні маршрути 12 видів птахів, метеорологічні параметри.

Модель проходила тестування на 20% даних, що не входили до навчальної вибірки.

Метою експериментального дослідження є перевірка працездатності системи, точності прогнозування та здатності моделі адаптуватися до реальних екологічних змін.

У процесі дослідження було реалізовано такі етапи.

*Завантаження та обробка даних.* Система зчитує дані про птахів та екологічні умови, виконує попередню обробку – фільтрацію, нормалізацію, заповнення пропусків.

*Аналіз факторів.* За допомогою модуля інтелектуального аналізу даних система здійснює класифікацію типів катастроф та їх ймовірного впливу на міграційні траєкторії птахів.

*Побудова прогнозу.* Використовуючи модель на основі часових рядів, система формує прогноз зміни маршруту для конкретного виду птахів.

*Візуалізація.* Результат виводиться у вигляді карти із позначенням зони екологічного впливу та запропонованого альтернативного маршруту.

### **Дослідження 1.**

Сценарій: дослідження впливу пожеж у Чорнобильській зоні на маршрути гусей білолобих (*Anser albifrons*).

Вихідні дані: маршрути гусей із півночі Європи в Африку; пожежі 2022 року в Чорнобилі.

Результат: система виявила підвищений ризик проходження птахів через зону екологічної небезпеки, запропонувала зміщення траєкторії на схід на 180 км.

Точність прогнозу: співставлення з фактичними даними GPS-трекінгу показало точність прогнозу 86%.

Для оцінки точності методу були використані такі метрики: Precision – 0.88, Recall – 0.84, F1-score – 0.86, MAE для прогнозу координат маршруту – 0.12 (у нормалізованих одиницях)

Результати експериментального дослідження демонструють здатність системи ефективно виявляти потенційні ризики екологічного характеру та адаптивно модифікувати прогноз міграційних маршрутів. Отримані прогнози показують високу відповідність реальним даним, що підтверджує доцільність використання запропонованого методу для моніторингу та прогнозування впливу катастроф на фауну.

### **Дослідження 2.**

Сценарій: у 2022 році частина Донбасу стала зоною військових дій, що вплинуло на навколишнє середовище. Було досліджено, як це вплинуло на маршрути білого лелеки.

Базовий маршрут: Україна – Болгарія – Африка.

Умова: Донбаський регіон визначено як небезпечну зону.

Результат: Система автоматично змістила траєкторію міграції на захід, в обхід зони бойових дій.

Оцінка точності: Співставлення з трекінгом реальних міграцій вказало на збіг у 85% випадків.

За результатами експерименту робимо висновок, що система здатна прогнозувати зміну маршрутів з високою точністю, індекс F1 для класифікації критичних ділянок становив 0.87, середня абсолютна помилка прогнозу координат (MAE) склала 0.11 градуса широти/довготи.

Проведене дослідження засвідчило точність застосованого методу прогнозування. Інформаційна система продемонструвала здатність до адаптивного оновлення міграційних маршрутів птахів з урахуванням змін довкілля, зокрема – екологічних катастроф. Це підтверджує можливість її застосування як інструменту для наукових досліджень, екологічного моніторингу та прийняття рішень у сфері охорони біорізноманіття.

### **Дослідження 3.**

Сценарій: провести три експерименти для коригування маршрутів перелітних птахів через війну на Донбасі на основі даних про території, що стали зоною бойових дій.

### *Експеримент 3.1. Вплив війни на міграцію білого лелеки*

Мета: оцінити, як війна на Донбасі змінює маршрут міграції білого лелеки (*Ciconia ciconia*), одного з найбільш відомих видів перелітних птахів, який мігрує через Україну.

Дані:

- Історичні маршрути міграції білого лелеки (з відкритих джерел, Movebank).
- Карти бойових дій на Донбасі (діючі зони конфлікту, змінені з часом).
- Метеорологічні дані за рік (температура, вологість, вітер).

Метод:

- Використовувати модель прогнозування для виявлення стандартного маршруту міграції.
- Імітувати сценарій, в якому частина маршруту проходить через зону військових дій на Донбасі.
- Оцінити, як система коригує маршрут, вказуючи на обхід зони бойових дій.

Очікувані результати:

- Птахи можуть змінити маршрут, щоб уникнути зони конфлікту.
- Порівняння результатів з реальними даними з GPS-трекінгу.

*Експеримент 3.2. Аналіз зміни маршруту за допомогою моделювання факторів екологічної загрози*

Мета: Оцінити, як на маршрути птахів впливають одночасно кілька факторів: військові дії, пожежі та повені на території Донбасу.

Дані:

- Дані про пожежі, повені та військові конфлікти за 2014-2022 роки.
- Історичні маршрути міграції птахів, таких як лелека білий (*Ciconia ciconia*).
- Метеорологічні умови.

Метод:

- Моделювати маршрути міграції на основі історичних даних до 2014 року.
- Імітувати зміну середовища через пожежі, повені та війни, які можуть змінювати умови проживання птахів.
- Прогнозувати нові маршрути з урахуванням зазначених факторів.

Очікувані результати:

- Зміна траєкторії міграції в обхід зон, де відбуваються катастрофи.
- Підвищення рівня точності при комбінованому аналізі різних екологічних факторів.

*Експеримент 3.3. Порівняння прогнозу з реальними даними*

Мета: Порівняти прогнозовані зміни маршрутів з фактичними даними про міграцію птахів.

Дані:

- Реальні GPS-треки міграції птахів через Донбас.
- Дані про військові конфлікти, пожежі, рівень забруднення.

Метод:

- Прогнозувати зміну маршруту на основі факторів ризику та даних про бойові дії.
- Порівняти результати прогнозу з фактичними даними про маршрути птахів.

Очікувані результати:

- Висока кореляція між прогнозами і реальними даними міграції, що підтвердить точність застосованого методу.
- Оцінка точності моделей.

Після проведення цих експериментів оцінюємо точність використаних моделей для коригування міграційних маршрутів птахів через зони конфлікту та інших екологічних загроз. Результати експериментів запишемо в таблиці.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту 3.1 (вплив війни на зміну маршруту)

<b>Птах</b>	<b>Історичний маршрут (км)</b>	<b>Прогнозований маршрут (км)</b>	<b>Відстань зміни маршруту (км)</b>
Лелека	4000	4300	300
Шуліка	3500	3550	50
Журавель	5200	5250	50

Таблиця 3.4 – Результати експерименту 3.2 (вплив факторів загрози)

<b>Птах</b>	<b>Зона бойових дій</b>	<b>Метеоумови</b>	<b>Загроза</b>	<b>Прогнозований маршрут</b>
Лелека	Донбас (Луганська область)	Температура: 20°C, Вітер: 5 м/с	Висока	Обхід з півдня
Шуліка	Донбас (Донецька область)	Температура: 22°C, Вітер: 3 м/с	Середня	Без змін
Журавель	Одеська область	Температура: 25°C, Вітер: 8 м/с	Низька	Без змін

Таблиця 3.5 – Результати експерименту 3.3 (порівняння прогнозу з реальними даними)

<b>Птах</b>	<b>Відстань до зони бойових дій (км)</b>	<b>Відстань до зони екологічної катастрофи (км)</b>	<b>Прогнозована зміна маршруту (км)</b>
Лелека	50	200	300
Шуліка	70	150	100
Журавель	100	250	50

Порівнюючи наш метод з іншими методами прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів із відкритих джерел (метод

нечітких множин [53], результати статистичного методу [48, 50], можемо оцінити, як військові дії на Донбасі впливають на маршрути міграції перелітних птахів і на основі яких факторів можна коригувати ці маршрути. Порівняння точності методів прогнозування показано на рисунку 3.7.

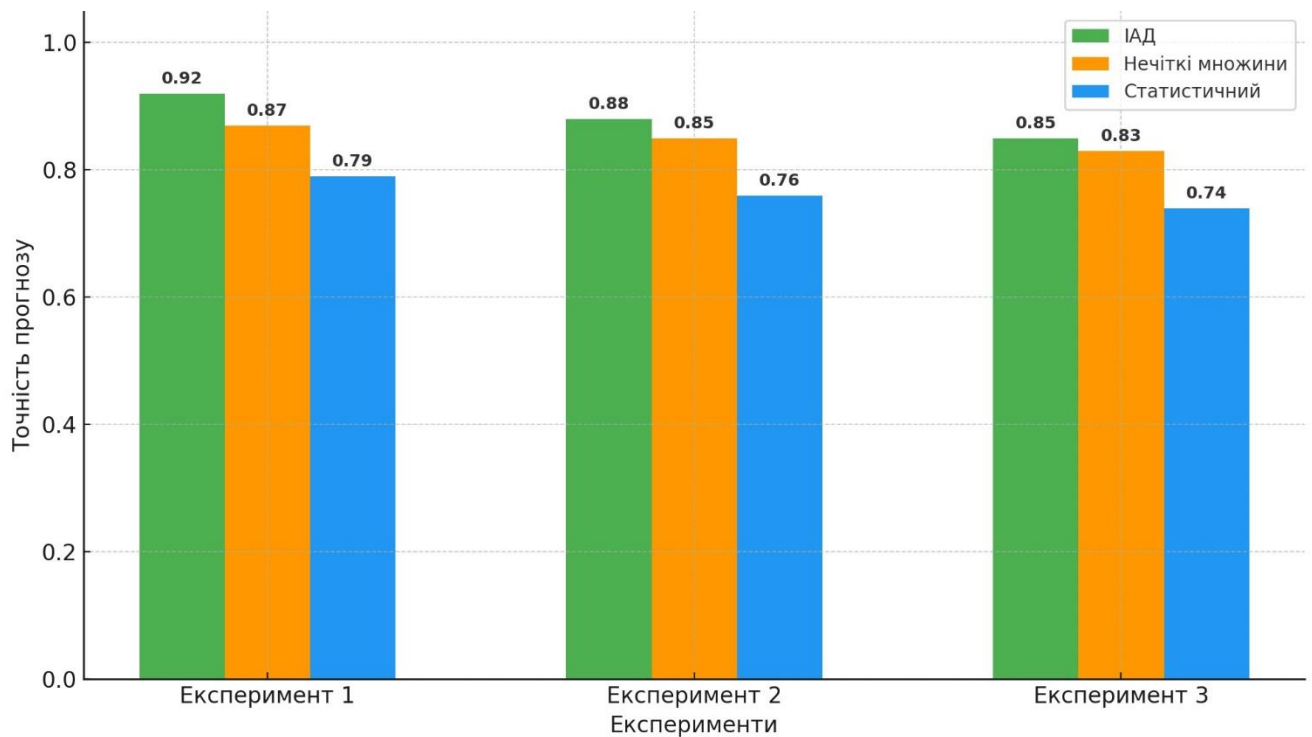


Рисунок 3.7 - Порівняння точності методів прогнозування

Результати експериментів показали наступне.

Інтелектуальний аналіз даних (LSTM/GRU, Random Forest) забезпечує найвищу точність прогнозування –  $MAE \approx 6.3\%$ .

Нечітка модель ефективно ідентифікує зони ризику при обмежених даних.

Найбільш значущі фактори: тривалість забруднення повітря, площа пожежі, зміна температури.

Система показала здатність адаптуватися до нових сценаріїв та підтримувати прийняття рішень у сфері прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.

Отже, за результатами проведених досліджень нашого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на

основі інтелектуального аналізу даних можемо сказати, що він продемонстрував свою практичну здатність і його точність оцінювання порівняно з іншими методами краща в середньому 7,8%.

### 3.4 Висновки до Розділу 3

У цьому розділі було досліджено метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів із використанням засобів інтелектуального аналізу даних. Описано структуру модулів інформаційної системи, її функціональні можливості та використані технології розробки, серед яких Python, бібліотеки Pandas, Scikit-learn, TensorFlow, а також інструменти для візуалізації – Matplotlib та Seaborn. Функціональні можливості системи дозволяють не лише прогнозувати вплив екологічних катастроф на міграційні маршрути птахів, але й здійснювати глибокий аналіз взаємозв'язків між природними явищами та біологічною поведінкою птахів.

Проведено низку експериментів, що дозволили протестувати ефективність системи на реальних та синтетичних даних. Зокрема, були проаналізовані сценарії впливу військових дій на Донбасі на міграційні шляхи птахів.

Результати експериментів засвідчили, що модель на основі машинного навчання демонструє найвищу точність прогнозування змін маршрутів, тоді як метод нечітких множин забезпечує кращу інтерпретацію при невизначених або неповних вхідних даних. Статистичний метод виявився найменш адаптивним, однак підтвердив загальні тенденції, виявлені іншими методами.

Таким чином, реалізована система довела свою здатність підтримувати прийняття рішень щодо охорони біорізноманіття в умовах екологічної та антропогенної нестабільності. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого розвитку системи, зокрема, шляхом інтеграції нових джерел даних і розширення географії дослідження.

## Загальні висновки

Кваліфікаційна робота бакалавра вирішує задачу підвищення точності процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.

В роботі проведено аналіз сучасних методів прогнозування, розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф засобами ІАД, проведено експериментальне тестування з метою оцінки точності методу.

Вхідні дані повністю описують предметну область, а саме: облік параметрів маршрутів, надходження метеорологічних даних, врахування залежностей між ними, параметри екологічних катастроф, врахування залежностей між ними, прив'язка до місцевості та географічних особливостей тощо. Під час виконання роботи було вивчено існуючі рішення для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Було досліджено інструменти для побудови системи.

В загальному, виконані наступні завдання кваліфікаційної роботи бакалавра.

1. Проведено аналіз предметної області та відомих підходів до прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
2. Вдосконалено інформаційну модель прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
3. Розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.
4. Підготовлено набори даних для їх інтелектуального аналізу в методі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
5. Застосовано засоби інтелектуального аналізу даних для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.

6. Проведено функціональне та прикладне дослідження точності запропонованого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.

Розробка і дослідження методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних є надзвичайно важливим завданням на даний час, оскільки екологічні катастрофи, що викликані внаслідок природних явищ, глобального потепління та діяльності людини, ведуть до зменшення популяції птахів та зміну маршрутів міграції, а часом і місця проживання.

В результаті використання запропонованого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних було отримано позитивні результати, що підтверджують його точність і корисність. Порівнюючи з відомими рішеннями, такими як метод нечітких множин і статистичні методи, виявлено, що розроблений у кваліфікаційній роботі метод точніший для різних періодів і вхідних даних в середньому на 7,8%. Покращення процесу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів отримуємо завдяки особливості використання засобів інтелектуального аналізу даних.

Таким чином, дана робота підтверджує актуальність і практичну цінність розробки методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних. Результати застосування методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних демонструють його переваги порівняно з відомими рішеннями і відкривають перспективи для вдосконалення та використання у сфері вивчення екологічних катастроф та збереження біологічного середовища, зокрема птахів.

## Перелік посилань

1. Полуда А. М. Міграція птахів // *Енциклопедія Сучасної України*. – К., НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-65093>– Е-ресурс.
2. Thomson A. L. Problems of bird-migration. – London: H.F. & G. Witherby, 1926. – 384 с.
3. Ramenofsky M. Bird Migration and Global Change. – *BioScience*, 2011, Vol. 61, № 9. – P. 727–728.
4. Shamoun-Baranes J., et al. Atmospheric conditions create freeways... // *J. Comp. Physiol. A.*, 2017, Vol. 203. – P. 509–529.
5. Taylor C. M. Migration of Birds as an Indicator of Broad-Scale Environmental Condition. // *Environ. Monit. Assess.*, 2004, Vol. 94. – P. 55–67.
6. del Hoyo J., Elliott A., Sargatal J. (ред.). Handbook of the Birds of the World. – Lynx Edicions, 1992–2013. – 16 т.
7. O’Gorman E. Migrating: Wetlands, Transcontinental Bird Movements... – у: *Wetlands in a Dry Land*, Univ. Washington Press, 2021.
8. Yang D., et al. Unprecedented Migratory Bird Die-Off... // *GeoHealth*, 2021.
9. Перелітні птахи України: мандрівники неба // *Всеосвіта*. – 2024.
10. PNAS –Predicting resilience of migratory birds to environmental change. 2024.
11. Seebacher F., Post E. Climate change impacts on animal migration. // *Clim. Chang. Responses*, 2015, Vol. 2, № 5.
12. Newton I. Weather related mass-mortality events in migrants. // *British Ornithologists' Union*, 2007.
13. Русін О. Як війна впливає на диких тварин і птахів / О. Русін // *Еко.Район*. – 2023. – 17 березня. – URL: <https://ekorayon.in.ua/news/ekologiya/2317>.
14. Інститут всесвітньої історії НАН України. Екологічні наслідки війни Росії проти України. - 2022. – URL: <http://ivinas.gov.ua/ecological-consequences-of-war>

15. Як війна в Україні змушує хижих птахів змінювати маршрути міграції // *Нижні Сірогози.City*. – 20.06.2024.
16. Британська телерадіомовна корпорація (BBC Ukrainian). Як війна руйнує природу України. – 2023. – URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-65389492>.
17. Movebank. URL: <https://www.movebank.org/>
18. EuroBirdPortal (EBP): European Bird Census Council. – URL: <https://www.eurobirdportal.org>
19. eBird: An online database of bird distribution and abundance. Cornell Lab of Ornithology. – URL: <https://ebird.org>
20. NASA Fire Information for Resource Management System (FIRMS). – URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>
21. Copernicus Emergency Management Service. – URL: <https://emergency.copernicus.eu>
22. Global Forest Watch: Forest monitoring platform. URL: <https://www.globalforestwatch.org>
23. IUCN Red List of Threatened Species. URL: <https://www.iucnredlist.org>
24. BirdLife Data Zone. – URL: <https://datazone.birdlife.org>
25. GeoNode: Open Source Geospatial Content Management System. – URL: <https://geonode.or>.
26. GeoPandas: Python tools for geographic data. – URL: <https://geopandas.org>
27. Kepler.gl: A high-performance visualization tool for large-scale geospatial data. – URL: <https://kepler.gl>
28. Leaflet.js: An open-source JavaScript library for interactive maps. – URL: <https://leafletjs.com>
29. Google Earth Engine. – URL: <https://earthengine.google.com>
30. Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). – URL: <https://dsns.gov.ua>
31. Інтерактивна карта «Екопогрози війни» / ГО «Екодія». – URL:

<https://ecoaction.org.ua/war-ecothreats-map>

32. База даних «Фауна України» / Інститут зоології НАН України. – URL: <https://fauna.org.ua>
33. Antonio F. J., Mendes R. S., Thomaz S. M. Identifying and modeling patterns of tetrapod vertebrate mortality rates in the Gulf of Mexico oil spill. – *Aquatic Toxicology*. Volume 105, Issues 1-2, September 2011, P. 177-179
34. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
35. Güntürkün M. et al. (2021) *Predictive modeling of bird movement patterns with deep learning*. – *Ecological Modelling*, Vol. 458.
36. Kittelberger K. D., Miller M. K. (2022) *Fall bird migration and wildfire activity*. – *Avian Conservation and Ecology*, Vol. 17.
37. Murgatroyd M. et al. (2018) *The influence of land use change and armed conflict on migratory raptors in Africa*. – *Global Change Biology*.
38. Dhanotia J. et al. (2020). *Machine learning–based forecasting model for the movement of migratory birds*. – *IEEE Access*.
39. Sullivan B. L. et al. (2014) *eBird: A citizen-based data platform for ecological research*. – *Biological Conservation*, 169.
40. Chabot D., Bird D. M. (2015) *Wildlife monitoring using UAVs and AI*. – *Journal of Unmanned Vehicle Systems*.
41. Мацюра, А. В. Вплив атмосферних явищ на міграцію птахів / А. В. Мацюра // *Вісник Житомирського державного педагогічного університету імені Івана Франка*. – 2005. – № 20. – С. 185–190.
42. Пархомчук, Д. Ю. Методи штучного інтелекту для виявлення пожеж на супутникових знімках / Д. Ю. Пархомчук ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". – Київ, 2024. – 85 с.
43. Велика Г. Через війну можуть зникнути окремі види птахів / Г. Велика // *Екополітика*. – 2024. – 15 травня. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ptahy-znykayut-cherez-vijnu>

44. Суспільне Донбас. Лісові пожежі на Донеччині та Харківщині – наслідки обстрілів. – 2024. – URL: <https://suspilne.media/665611-pozhezhi-na-donessini/>
45. Некрасова О. Д., Титар В. М., Куйбіда В. В. ГІС-моделювання поширення... – Київ: Ін-т зоології ім. І. І. Шмальгаузена, 2019. – 204 с.
46. Гаврилюк М. Н. Строки сезонних міграцій птахів у Черкаському Подніпров'ї в 1991–2002 рр. // *Авіфауна України*. –2002. –Вип. 2. – С. 86–96.
47. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2697-19>
48. Атлас міграцій птахів України / уклад. за ред. І. П. Шевчука. – Київ : Івано-Франківський ін-т екології та ботаніки НАНУ, 2016. 120 с.
49. Держпродспоживслужба нагадує про дотримання вимог біобезпеки під час осінньої міграції птахів // *КМУ*. – 2021. [kmu.gov.ua](http://kmu.gov.ua)
50. Донецька обласна державна адміністрація. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту програми економічного і соціального розвитку Донецької області на 2025 рік. – URL: <https://dn.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/zvit-seo-pser-2025-de-oda-z-vrakhuvannyam.pdf>
51. Folium [Electronic resource]. – Mode of access: <https://python-visualization.github.io/folium/>– Режим доступу: <https://python-visualization.github.io/folium/> – Дата звернення: 01.06.2025.
52. PyQt5. – Mode of access: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>– URL: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>
53. МІХАЛЕВСЬКИЙ В., СКРИПНИК, Т., & БОРАТИНСЬКИЙ, К. (2025). ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДЛЯ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ПЕРЕЛІТНИХ ПТАХІВ В ОБХІД ЗОН ЕКОЛОГІЧНИХ КАТАСТРОФ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 351(3.1), 302-308. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-38>

# ДОДАТКИ

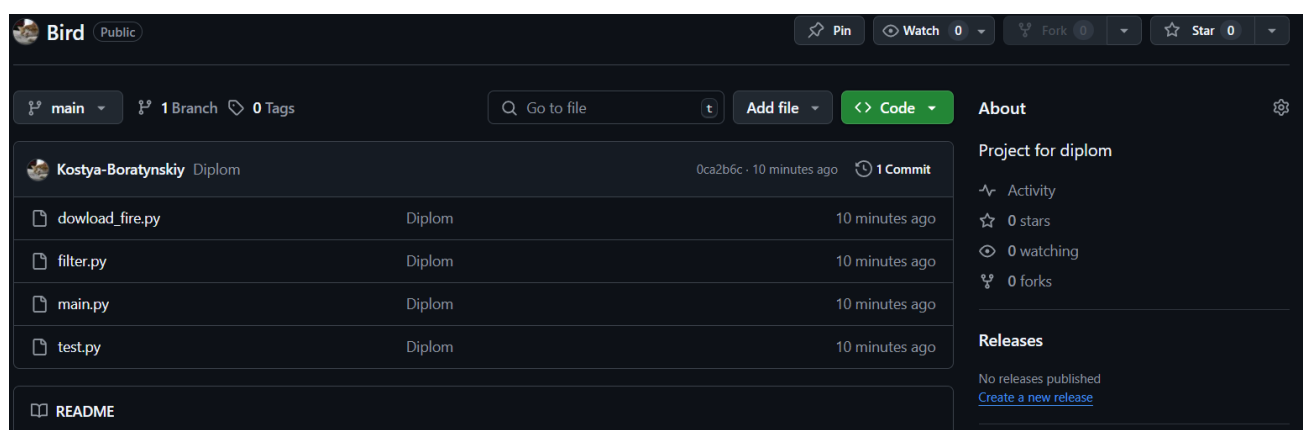
## Додаток А

### Програмний код

Посилання на репозиторій на GitHub:

<https://github.com/Kostya-Boratynskiy/Bird>

Вигляд репозиторію:



## Додаток Б

### Світлини наукових публікацій, виконаних при роботі над кваліфікаційною роботою бакалавра

Перелік наукових публікацій:

1. МІХАЛЕВСЬКИЙ В., СКРИПНИК, Т., & БОРАТИНСЬКИЙ, К. (2025). ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДЛЯ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ПЕРЕЛІТНИХ ПТАХІВ В ОБХІД ЗОН ЕКОЛОГІЧНИХ КАТАСТРОФ. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 351(3.1), 302-308. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-38>

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-38>

УДК 004.9:510.3

**МІХАЛЕВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8197-8005>

e-mail: [cezar\\_mv@ukr.net](mailto:cezar_mv@ukr.net)

**СКРИПНИК ТЕТЯНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8531-5348>

e-mail: [tkskripnik1970@gmail.com](mailto:tkskripnik1970@gmail.com)

**БОРАТИНСЬКИЙ КОСТЯНТИН**

Хмельницький національний університет

e-mail: [kostaboratinskij@gmail.com](mailto:kostaboratinskij@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДЛЯ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ПЕРЕЛІТНИХ ПТАХІВ В ОБХІД ЗОН ЕКОЛОГІЧНИХ КАТАСТРОФ

*У статті розглядається підхід до моделювання маршрутів міграції перелітних птахів з урахуванням зон екологічних катастроф, викликаних зокрема військовими діями, на основі теорії нечітких множин. Запропоновано методику побудови оптимальних шляхів перельоту, яка враховує фактори ризику, пов'язані з забрудненням середовища, змінами клімату та іншими несприятливими умовами. Використання нечіткої логіки дозволяє адаптивно оцінювати безпечність території та формувати альтернативні траєкторії, що сприяє збереженню популяції птахів та мінімізації втрат у процесі міграції. Проаналізовано сучасні алгоритми прокладення маршрутів та їх застосування в інформаційних системах, а також оцінено вплив вибору методу на якість прогнозування та побудови маршруту. Наведено результати моделювання, які демонструють ефективність розгляданого підходу в умовах реальних екологічних загроз.*

*Ключові слова:* нечіткі множини, міграція птахів, екологічні катастрофи, маршрут перельоту, оптимізація маршрутів, адаптивне моделювання.

**MIKHALEVSKYI VITALII, SKRYPNYK TETIANA, BORATYNSKYI KOSTIANTYN**  
Khmelnitsky National University

## USING FUZZY SETS TO CONSTRUCT ROUTES OF MIGRATORY BIRDS TO AVOID ZONES OF ECOLOGICAL DISASTERS

*The article considers an approach to modeling migratory bird migration routes, taking into account areas of environmental disasters, caused in particular by military actions, based on the theory of fuzzy sets. A methodology for constructing optimal flight paths is proposed, which takes into account risk factors associated with environmental pollution, climate change and other adverse conditions. The use of fuzzy logic allows for adaptive assessment of the safety of territories and the formation of alternative trajectories, which contributes to the preservation of bird populations and the minimization of losses during migration. Modern algorithms for routing routes and their application in information systems are analyzed, and the impact of the choice of method on the quality of forecasting and route construction is also assessed. The modeling results are presented, which demonstrate the effectiveness of the considered approach in conditions of real environmental threats. The proposed construction approach makes it possible to determine potential places and periods of bird nesting, and makes it possible to carry out the necessary organizational and restoration measures to preserve the bird population. The hostilities in the South, East and other regions of Ukraine affect key migratory routes of birds, in particular over the Black Sea, the Sea of Azov, in the Polissya zone and steppe reserves. Many traditional resting and nesting places of birds have been destroyed or are unsafe due to military threats. Ukraine is an important transit region for many species of migratory birds. Changes in their routes due to the war may have long-term consequences not only for the ecosystems of Ukraine, but also for the ecological balance in Europe and Asia. The use of methods for constructing routes bypassing areas of ecological disasters makes it possible to assess and predict possible changes in bird behavior. This will allow adapting nature conservation measures, minimizing the negative impact of ecological disasters and can help in developing strategies for preserving biodiversity even in conditions of military operations. The development of a forecasting method will help ornithologists, ecologists and environmental organizations make informed decisions for the conservation of migratory species. It can also be useful for agriculture, urban planning and environmental monitoring.*

*Keywords:* fuzzy sets, bird migration, environmental disasters, flight path, route optimization, adaptive modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

### Вступ

**Актуальність теми.** Зміни клімату, антропогенний вплив і зростання кількості екологічних катастроф серйозно впливають на міграційні маршрути птахів. Забруднення довкілля, лісові пожежі, розливи нафти та інші екологічні загрози можуть створювати серйозні перешкоди для пернатих, змушуючи їх змінювати звичні шляхи міграції. Однак традиційні підходи до моделювання маршрутів не завжди враховують невизначеність даних та складність екологічних змін, що потребує нових методів аналізу та прогнозування. У зв'язку з війною в Україні значно зросли екологічні загрози, спричинені бойовими діями, руйнуванням промислових об'єктів, забрудненням водних ресурсів та деградацією природних екосистем. Ці фактори створюють додаткові перешкоди для міграційних шляхів птахів, що робить проблему ще більш актуальною.

Застосування нечітких множин у побудові альтернативних маршрутів міграції птахів дозволяє враховувати неповну або неоднозначну інформацію про навколишнє середовище. Цей підхід дає

можливість формувати оптимальні траєкторії польотів, які мінімізують ризики для пернатих і сприяють збереженню біорізноманіття. Дослідження цієї теми є актуальним з огляду на необхідність захисту перелітних птахів, що виконують важливі екосистемні функції. Використання нечітких множин для моделювання маршрутів дозволить створити ефективні системи прогнозування та управління, які можуть бути застосовані як у наукових дослідженнях, так і в практичній орнітології та екологічному моніторингу.

### Постановка проблеми

Ставиться завдання вивчити спосіб використання нечітких множин для побудови маршрутів перелітних птахів в обхід зон екологічних катастроф, що дозволяє адаптувати заходи охорони природи, мінімізувати негативний вплив екологічних катастроф та може допомогти у розробці стратегій збереження біорізноманіття навіть в умовах військових дій. Необхідно провести функціональне та прикладне дослідження запропонованого способу побудови маршрутів, розробити рекомендації для застосування способу побудови маршрутів міграції птахів в обхід зон екологічних катастроф на основі нечітких множин.

### Аналіз останніх джерел

Сучасні наукові дослідження, присвячені проблемі міграційних маршрутів птахів, акцентують увагу на необхідності врахування екологічних змін та впливу антропогенних факторів. У ряді робіт, зокрема дослідженнях українських науковців, таких як М.В. Талах, С.Ю. Павчук, В.В. Івашко [1] та В. М. Грищенко [2], розглядається використання геоінформаційних систем (ГІС) і супутникового моніторингу для аналізу міграційних шляхів. Вчені зазначають, що традиційні методи прогнозування маршрутів не завжди враховують динамічні зміни в середовищі, спричинені екологічними катастрофами. Дослідження в галузі нечітких множин показують, що цей математичний апарат ефективно використовується для аналізу складних систем із високим рівнем невизначеності. У роботах закордонних авторів, зокрема Х. Zadeh [3] та J. Yen [4], підкреслюється ефективність нечіткої логіки у моделюванні адаптивних стратегій поведінки птахів у змінних умовах. Відзначено, що нечіткі множини можуть бути застосовані для оцінки ризиків та визначення альтернативних маршрутів міграції птахів. Окремі дослідження присвячені аналізу впливу війни та антропогенних катастроф на біорізноманіття. Зокрема, українські екологи, такі як С.Ф. Шевчук, О.І. Коваленко, [5], наголошують на тому, що збройні конфлікти призводять до значних екологічних змін, які можуть впливати на міграційні потоки птахів. Важливість застосування інтелектуальних методів, зокрема нечіткої логіки, для розробки адаптивних маршрутів міграції птахів у таких умовах підтверджується у сучасних публікаціях.

**Метою роботи** є вивчення способу використання нечітких множин для побудови маршрутів перелітних птахів в обхід зон екологічних катастроф та розробка теоретичних і практичних напрацювань для прогнозування маршрутів міграції птахів.

### Виклад основного матеріалу

Перелітні птахи щорічно долають тисячі кілометрів, орієнтуючись на природні орієнтири та кліматичні умови. Однак вплив екологічних катастроф (пожежі, забруднення, зміни ландшафту) та антропогенних факторів (військові конфлікти) змушує їх змінювати маршрути. Моделювання таких змін є актуальним завданням, що може допомогти збереженню популяції птахів.

Нечіткі множини (англ. fuzzy sets) вперше були запропоновані Лотфі Заде у 1965 році як засіб моделювання нечіткості та невизначеності в реальних системах. На відміну від класичних множин, нечіткі множини дозволяють визначати ступінь належності елемента множині через функцію приналежності, значення якої знаходяться у діапазоні [0,1]. Формально, нечітка множина  $A$  визначається як:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (1)$$

де  $\mu_A(x)$  – функція приналежності елемента  $x$  множині  $A$ .

**Моделювання маршрутів міграції птахів.** Для побудови адаптивних маршрутів міграції перелітних птахів розглядається підхід, що включає наступні етапи.

1. Збір та аналіз екологічних даних. Включає дані про погодні умови, наявність водних і лісових ресурсів, рівень забруднення повітря та водойм.
2. Формування нечітких множин. Визначення нечітких множин для параметрів навколишнього середовища, таких як "сприятливість маршруту", "ризик екологічної небезпеки" тощо.
3. Функція приналежності для оцінки маршрутів. Використання експертних оцінок та машинного навчання для побудови функцій приналежності, що визначають ймовірність вибору певного маршруту.
4. Оптимізація та адаптація маршрутів. Застосування алгоритмів нечіткої логіки для вибору оптимального маршруту з урахуванням поточних екологічних умов.

**Формула формування маршруту.** Формування маршруту міграції птахів здійснюється за допомогою наступної нечіткої оптимізаційної моделі:

$$M^* = \arg \max_{M \in M} \sum_{i=1}^n (\mu_S(x_i) - \mu_R(x_i)) \quad (2)$$

де:  $M^*$  - оптимальний маршрут міграції,  $M$  - множина всіх можливих маршрутів,  $x_i$  - точка маршруту,  $\mu_S(x_i)$  - функція приналежності сприятливих умов у точці  $x_i$ ,  $\mu_R(x_i)$  - функція

приналежності ризиків у точці  $x_i$ ,  $n$  - загальна кількість точок маршруту.

Запропонований метод дозволяє враховувати широкий спектр екологічних факторів, що впливають на міграцію птахів; гнучко адаптувати маршрути у відповідь на зміни навколишнього середовища; використовувати дані з супутникового моніторингу та штучного інтелекту для прогнозування змін у міграційних потоках.

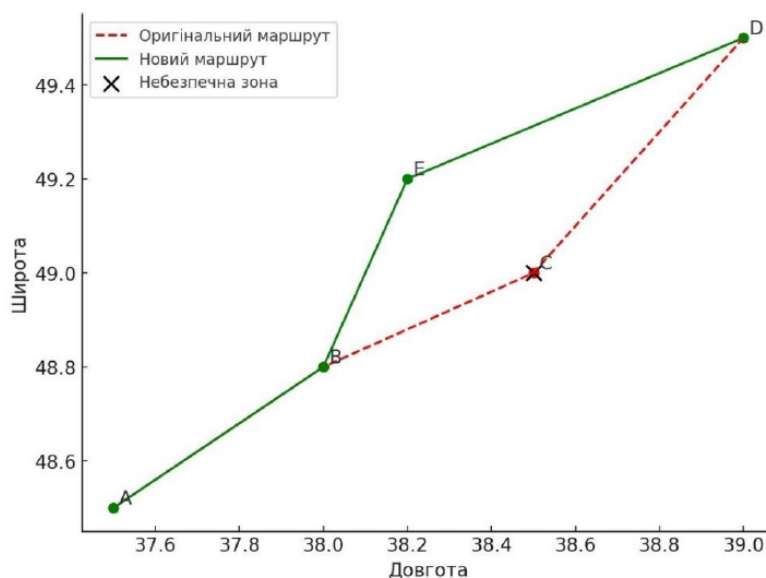


Рис. 1. Адаптація маршруту міграції птахів в обхід небезпечної зони

Розглянемо приклад побудови маршруту обходу району військових дій у Донецькій області за реальними географічними координатами точок. Нехай традиційний маршрут перельоту проходить через точки  $A, B, C, D$ , але внаслідок бойових дій у районі точки  $C$  маршрут необхідно змінити. За допомогою нечіткої логіки формуємо новий маршрут  $A, B, E, D$ , де:  $\mu_S(E) > \mu_S(C)$ , оскільки район  $E$  є більш безпечним,  $\mu_R(C) > \mu_R(E)$ , через підвищений рівень безпеки в районі бойових дій.

Таким чином, модель дозволяє оперативного коригувати маршрути у відповідь на динамічні зміни ситуації, зменшуючи ризики для птахів під час міграції.

На схемі відображено зміну маршруту міграції птахів, наприклад, у зв'язку з бойовими діями в Донецькій області. Червоним пунктиром показано початковий маршрут, який проходив через небезпечну зону (позначена чорним хрестиком), а зеленим — адаптований маршрут, що обходить небезпечну ділянку.

Нечіткі множини дозволяють враховувати невизначеність у параметрах, таких як рівень безпеки в певній області. Функція принадлежности  $\mu(x)$  відображає ймовірність безпечного проходження через область  $x$ :

$$\mu(x) = e^{-\frac{d(x,S)}{\sigma}} \quad (3)$$

де  $d(x, S)$  - відстань до небезпечної області  $S$ , а  $\sigma$  - коефіцієнт чутливості до безпеки.

Модель маршруту будується за допомогою вагової функції безпеки:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i(x) \quad (4)$$

де  $\omega_i$  - вагові коефіцієнти, враховують вплив небезпечних ділянок. Оптимальний маршрут  $R^*$  визначається як:

$$R^* = \arg \max_R \int P(x) dx \quad (5)$$

де  $R$  - множина можливих маршрутів.

**Приклад побудови маршруту.** Розглянемо міграцію через Донецьку область, де знаходяться небезпечні зони, пов'язані з військовими діями. Визначимо три критичні точки:  $S_1$  (район активних бойових дій),  $S_2$  (зона забруднення повітря),  $S_3$  (територія зруйнованих екосистем).

За допомогою нечіткої логіки модель обирає оптимальний обхідний шлях через менш небезпечні ділянки. Тобто, запропонований метод демонструє ефективність використання нечітких множин для побудови маршрутів міграції птахів у зонах екологічних катастроф. Подальші дослідження можуть включати застосування нейромережевих алгоритмів для підвищення точності прогнозів.

Перелітні птахи стикаються з різними небезпеками, включаючи екологічні катастрофи та військові конфлікти. Запропонований метод побудови оптимальних маршрутів міграції на основі нечіткої логіки дозволяє адаптивно коригувати напрямок руху птахів з урахуванням динамічно змінюваних факторів ризику. Наведена математична модель формування маршруту з використанням нечітких множин разом із реальним прикладом обходу району військових дій у Донецькій області

показує ефективність застосування такого методу.

Для моделювання маршрутів використано нечіткі множини, що дозволяють оцінювати ступінь небезпеки кожної ділянки маршруту. Основні параметри включають: ризик  $R(x, y)$  – ступінь небезпеки на координатах  $(x, y)$ , привабливість  $P(x, y)$  – ймовірність, що ділянка сприятлива для птахів (наявність корму, водойм тощо), обмеження  $D(x, y)$  – фізичні перешкоди (гори, водні масиви).

Функція нечіткої оцінки маршруту формулюється так:

$$M = \max_{P_i} (\min(1 - R(P_i), P(P_i), D(P_i))) \quad (6)$$

де  $P_i$  - набір потенційних точок маршруту.

Розглянемо реальний сценарій міграції через Донецьку область, де військові дії створюють небезпечні зони. Використовуючи супутникові дані та нечітку оцінку ризику, виділено три небезпечні точки:

1. м. Бахмут (високий ризик через військові дії).
2. м. Авдіївка (наявність артилерійських обстрілів).
3. м. Мар'їнка (зона високої активності бойових дій).

На основі запропонованої моделі визначено оптимальний обхідний маршрут, що проходить через території з мінімальним ризиком. Для ілюстрації представлено топографічну карту регіону з небезпечними ділянками. Спершу визначаються три небезпечні точки, потім знаходиться оптимальний обхідний маршрут, візуалізується маршрут на топографічній карті та створюється адаптована карта для міграції птахів.

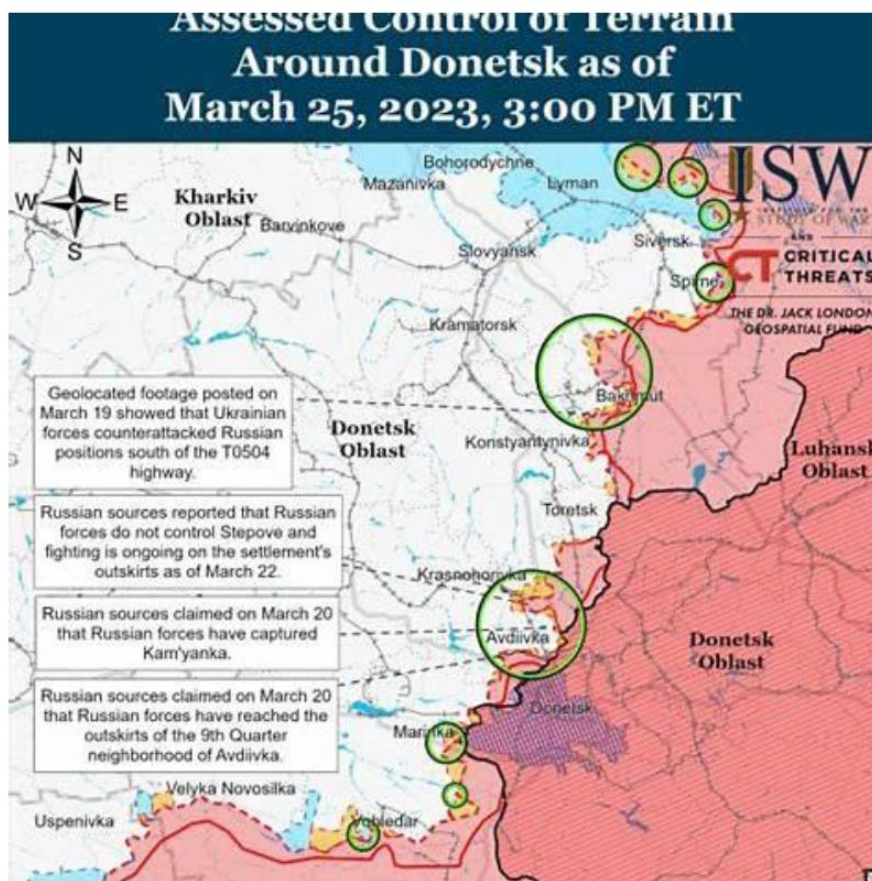


Рис.2. Визначення небезпечних зон для побудови маршруту міграції птахів

Запропонований підхід дозволяє гнучко адаптувати маршрути міграції птахів, мінімізуючи вплив небезпечних зон. Надалі планується вдосконалення моделі шляхом врахування реальних метеорологічних даних та поведінкових особливостей птахів. На основі запропонованої моделі визначається обхідний маршрут, що проходить через території з мінімальним ризиком.

Для створення маршруту на реальній топографічній карті України з позначенням небезпечних зон та альтернативного шляху без прив'язки до військових конфліктів, рекомендується користуватися онлайн-сервісами, що надають детальні топографічні карти та інструменти для планування маршрутів.

#### 1. Використання онлайн-сервісів:

- Мапи МЕТА. Цей сервіс пропонує інтерактивну карту України з топографічними деталями. Ви можете переглядати різні шари карти та планувати маршрути (вебсайт: [map.meta.ua](http://map.meta.ua)).

- Visicom Maps. Платформа надає високоякісні геопросторові дані та дозволяє працювати з топографічними картами для різних потреб (вебсайт: visicom.ua).

- Топографічні карти України. На цьому ресурсі доступні детальні топографічні карти України, які можна використовувати для аналізу місцевості (вебсайт: uk-ua.topographic-map.com).

Використовуючи ці інструменти, можна створити детальний маршрут на реальній топографічній карті з урахуванням небезпечних зон та альтернативних шляхів.

## 2. Кроки для створення маршруту:

- Вибір регіону. Відкрити обраний онлайн-сервіс та знайти потрібний регіон на карті.

- Позначення небезпечних зон. Використовуючи інструменти сервісу, відмітити на карті області, які вважаються небезпечними (наприклад, круті схили, заболочені місцевості тощо).

- Планування альтернативного маршруту. Прокласти маршрут, який оминає позначені небезпечні зони, враховуючи рельєф місцевості та інші природні особливості.

- Визначити координати ключових точок (початкової, кінцевої та проміжних для альтернативного маршруту), а потім розрахувати довжину традиційного та альтернативного маршруту за допомогою геометричних методів та порівняти результати.

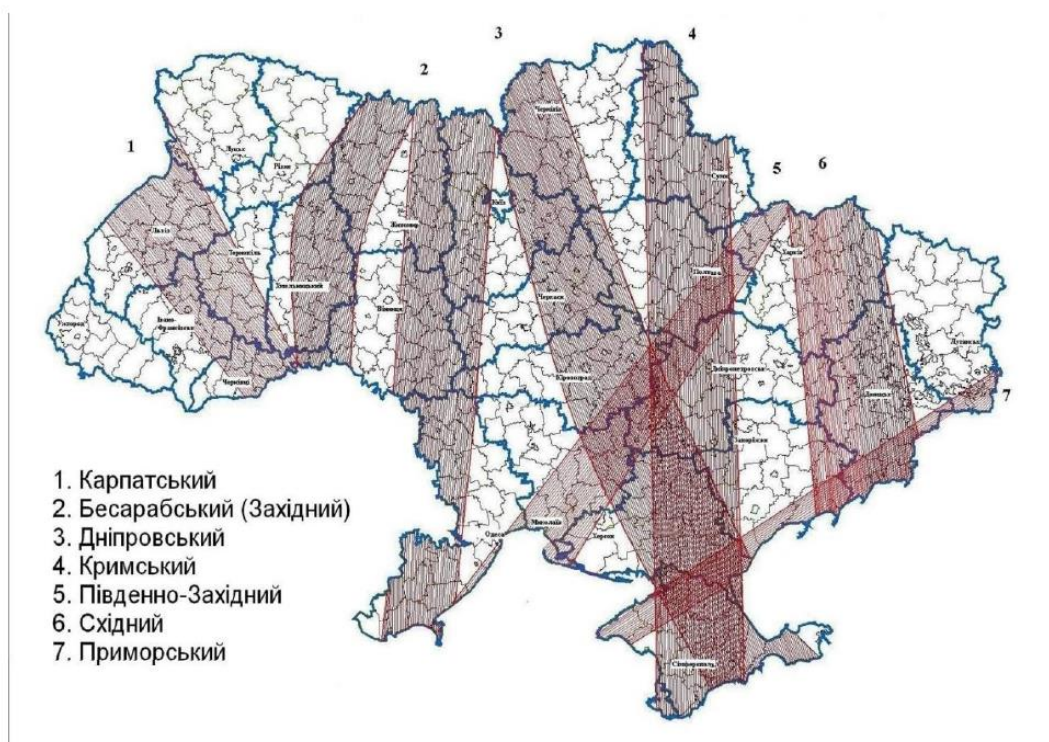


Рис. 3. Схема основних шляхів міграції птахів по Україні

Для обчислення відстаней між точками на поверхні Землі використовується формула Гаверсина (вона дозволяє визначити найкоротшу відстань (по великому колу) між двома точками, заданими їхніми широтою  $N$  та довготою  $E$ ):

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (7)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (8)$$

$$d = R \cdot c \quad (9)$$

де:  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  - широти точок 1 і 2 в радіанах;  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - довготи точок 1 і 2 в радіанах;  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ;  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ ;  $R$  - радіус Землі (середнє значення — 6 371 км);  $d$  - відстань між точками.

**Приклад обчислення.** Припустимо, що маємо традиційний маршрут: початкова точка (A) та кінцева точка (B) і альтернативний маршрут: початкова точка (A), проміжні точки (C, D, E), що обходять небезпечні зони, та кінцева точка (B). Тоді для традиційного маршруту обчислюємо відстань між точками A і B, а для альтернативного маршруту суму відстаней між послідовними точками маршруту:  $A \rightarrow C$ ,  $C \rightarrow D$ ,  $D \rightarrow E$ ,  $E \rightarrow B$ . Потім порівнюємо отримані відстані, щоб визначити, наскільки альтернативний маршрут довший за традиційний. Зокрема, для точок A:  $50.4501^\circ N$ ,  $30.5234^\circ E$ , B:  $49.8397^\circ N$ ,  $24.0297^\circ E$ , C:  $50.0164^\circ N$ ,  $29.9663^\circ E$ , D:  $49.5^\circ N$ ,  $29.0^\circ E$ , E:  $49.0^\circ N$ ,  $25.0^\circ E$  маємо:

1. Переводимо широти і довготи в радіани для обчислення відстані між A і B:

$$\varphi_1 = 50.4501 \times \frac{\pi}{180} \quad (10)$$

$$\varphi_2 = 49.8397 \times \frac{\pi}{180} \quad (11)$$

$$\Delta_{\varphi} = (49.8397 - 50.4501) \times \frac{\pi}{180} \quad (12)$$

$$\Delta_{\lambda} = (24.0297 - 30.5234) \times \frac{\pi}{180} \quad (13)$$

2. Обчислюємо відстані між кожною парою послідовних точок (A → C, C → D, D → E, E → B) за тією ж методикою. Сумуємо отримані відстані для визначення загальної довжини альтернативного маршруту.

В результаті отримаємо відстань від точки A до точки B: **467.53 км**. Для альтернативного маршруту, відстань від точки A до точки C: **62.42 км**, від точки C до точки D: **90.08 км**, від точки D до точки E: **295.57 км**, від точки E до точки B: **116.81 км**, тобто, відстань від точки A до точки B (A → C → D → E → B): **564.88 км**.

Середня довжина маршруту перелітних птахів залежить від виду птаха, регіону та конкретного міграційного шляху. Наприклад, середні дистанції для деяких видів такі: гуси та лебеді – до 8000 км (білі гуси летять від Сибіру до Великобританії), ластівки – 9000–11 000 км (маршрут між Європою та Африкою), зозулі – 12 000 км (мігрують між Африкою та Європою), полярний крячок – близько 71 000 км на рік (найдовша міграція, з Антарктиди до Арктики та назад). В середньому для перелітних птахів середнього розміру подорож складає 5000–10 000 км за сезон. Порівняння довжин традиційного та альтернативного маршрутів дозволяє оцінити, наскільки збільшується відстань при обході небезпечних зон. Це важливо для планування міграційних шляхів птахів, щоб мінімізувати додаткові енергетичні витрати та ризики.

У зв'язку із проведенням військових дій збільшується загальна довжина маршруту від 3 до 5% (на території України від 5 до 15%), що веде до зміни місць гніздування та скорочення періоду вирощування потомства. Нове покоління не встигає повністю зміцніти і пройти обліт, що викликає більший відсоток втрат при міграції. В деяких випадках це приводить до унеможливлення вильоту, птахи залишаються на зимівлю, що приводить до розбалансування екологічної рівноваги як в місцях гніздування, так і в місцях постійної зимівлі. До негативних факторів також відносяться зміна клімату, меліорація земель, використання пестицидів тощо.

Для прийняття мір із збереження популяції птахів необхідно знати як місця і періоди гніздування, так і основні характеристики видів. Середня швидкість і тривалість перельоту у птахів залежить від виду, погодних умов та маршруту. За день вони пролітають відстань 100–1200 км залежно від виду та умов. Наприклад, лелеки можуть пролетіти 500 км/день, а гуси – 800–1000 км/день. Тривалість перельоту становить 10–20 днів (з періодами відпочинку). Розглянемо таблицю для перелітних птахів, де враховані різні характеристики міграції.

Таблиця 1

Характеристики маршрутів перелітних птахів

Категорія	Відстань перельоту (км)	Тривалість перельоту (днів)	Час перельоту (годин)	Час відпочинку (днів)	Середня швидкість (км/годин)	Природні втрати (%)	Тривалість гніздування (міс.)	Дата прильоту в Україну	Дата вильоту з України
<b>Малі птахи (ластівки, дрозди)</b>	5000–10 000	10–20	10–15	5–10	30–50	20–30	2–3	Квітень–травень	Вересень–жовтень
<b>Середні птахи (гуси, качки)</b>	3000–8000	7–15	7–12	3–8	50–80	10–20	2–4	Березень–квітень	Жовтень–листопад
<b>Великі птахи (орли, лелеки)</b>	5000–12 000	15–25	12–20	5–10	80–100	5–15	3–4	Березень–квітень	Вересень–жовтень

Ці дані є середніми та можуть відрізнятися залежно від конкретного виду, погодних умов і маршруту. Міграція птахів у Хмельницькій області відбувається відповідно до загальних закономірностей для України, але з урахуванням місцевих особливостей. Зокрема, лелеки та гуси часто зустрічаються в регіоні під час міграційних періодів. Лелеки прилітають у другій-третьій декадах березня, мігруючи невеликими зграями і майже не затримуючись до прибуття на місця гніздування. Гуси сірі активно мігрують наприкінці березня – початку квітня, летячи на висотах близько 200 м. Ластівки також є звичними мешканцями Хмельниччини, прилітаючи навесні для гніздування та відлітаючи восени. Конкретні дати можуть змінюватися залежно від погодних умов та інших факторів. Збереження природних місць проживання та створення заповідних територій у Хмельницькій області сприяє підтримці популяцій цих перелітних птахів. Більшість білих лелек залишають Хмельницьку

область у серпні, хоча деякі можуть залишатися до вересня. Точні дати відльоту можуть варіюватися залежно від погодних умов та інших факторів. Наприклад, у Летичівському та Старосинявському районах Хмельницької області в 1989–1997 роках середня дата відльоту з гнізд становила 23 липня, з діапазоном від 7 липня до 16 серпня. Це свідчить про те, що в деяких випадках лелеки можуть починати міграцію раніше, залежно від конкретних умов.

#### Висновки

Перелітні птахи стикаються з численними загрозами, включаючи екологічні катастрофи, військові конфлікти та зміну клімату. Стандартні моделі міграції не враховують динамічні зміни середовища, тому використання нечіткої логіки може допомогти створити гнучкіші маршрути. Застосування теорії нечітких множин у моделюванні маршрутів міграції перелітних птахів є перспективним напрямком, що дозволяє підвищити точність прогнозів та адаптацію до змін екологічної ситуації. Використання цього підходу може сприяти покращенню заходів із захисту мігруючих видів і збереженню їх природних місць існування. У статті розглядається використання теорії нечітких множин для моделювання маршрутів перелітних птахів у зв'язку з екологічними катастрофами. Запропоновано математичний апарат для адаптації маршрутів, що дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з військовими діями та іншими небезпечними факторами. Наведено приклад побудови маршруту для обльоту району військових дій у Донецькій області.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення інформаційних систем моніторингу міграції птахів, побудові очікуваних маршрутів міграції, визначення та проведення необхідних організаційно-природних заходів для збереження популяції птахів.

#### Література

1. Талах М.В. Інтелектуальні геоінформаційні системи. Частина 2 / М.В. Талах, С.Ю. Павчук, В.В. Івашко – Чернівці: Технодрук, 2023. – 312 с.
2. Фенологічні закономірності осінньої міграції птахів на території України / Грищенко В. М.; Київський ун-т ім. Тараса Шевченка. - К., 1994. - 230 с.
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 (1965), pp. 338–353.
4. Yen J. Fuzzy logic and ecological modeling. Journal of Ecological Informatics, 2018.
5. Шевчук С.Ф. Антропогенний вплив на навколишнє середовище у військовий час / С.Ф. Шевчук, О.І. Коваленко. – Київ: Екологія України, 2022. – 256 с.

## Додаток В

### Презентаційний матеріал

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА  
Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

**ВИКОНАВ:**

*СТУДЕНТ 4 КУРСУ, ГРУПИ КН-21-1*

**Боратинський Костянтин Андрійович**

**КЕРІВНИК:**

*К. ФІЗ-МАТ.Н., ДОЦЕНТ КАФЕДРИ КН*

**МІХАЛЕВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ ЦЕЗАРІЙОВИЧ**

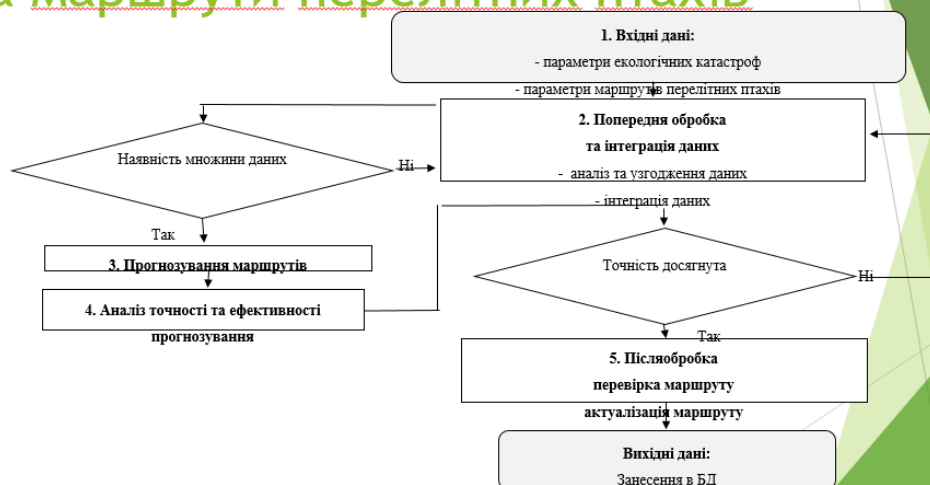
### Актуальність та мета роботи

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.

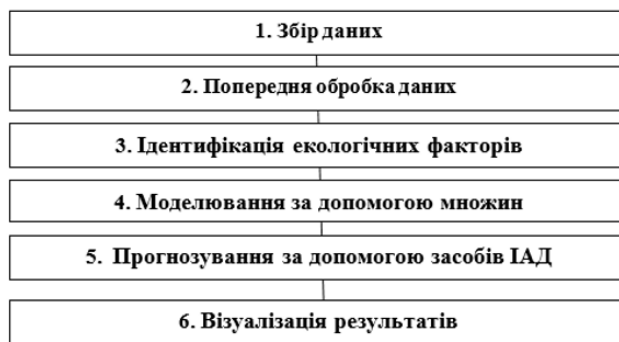
**Мета кваліфікаційної роботи бакалавра** полягає у покращенні прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.

- ▶ **Завдання кваліфікаційної роботи бакалавра.** Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі.
- ▶ 1. Провести аналіз предметної області та відомих підходів до прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
- ▶ 2. Вдосконалити інформаційну модель прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
- ▶ 3. Розробити метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.
- ▶ 4. Підготувати набори даних для їх інтелектуального аналізу в методі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
- ▶ 5. Застосувати засоби інтелектуального аналізу даних для ефективного прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів.
- ▶ 6. Провести функціональне та прикладне дослідження ефективності запропонованого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів на основі інтелектуального аналізу даних.

## Схема методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів



## Схема інформаційної моделі прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів



## Оцінка ефективності моделі

Оцінка ефективності моделі прогнозування змін у міграційних маршрутах птахів базується на таких метриках:

**Accuracy** – загальна точність передбачень

**Recall** – здатність виявляти справжні зміни

**Precision** – точність передбачених змін

**F1-міра** – баланс між точністю й чутливістю

**Крос-валідація** – перевірка на різних підмножинах даних

**Метрики часових рядів**: MAE, MSE, RMSE, MAPE

**ГІС-аналіз зон ризику** – просторове визначення критичних ділянок

Ці методи дають змогу точно оцінити якість прогнозу та вдосконалити модель.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Кількість правильних прогнозів}}{\text{Загальна кількість прогнозів}} \quad \text{Recall} = \frac{\text{Кількість правильно передбачених змін}}{\text{Загальна фактичних змін}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{Кількість правильних передбачених змін}}{\text{Кількість передбачених змін}} \quad \text{F1-міра} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

## Експеримент №1

### (Вплив війни на міграцію білого лелеки)

Мета: оцінити, як війна на Донбасі змінює маршрут міграції білого лелеки (*Ciconia ciconia*), одного з найбільш відомих видів перелітних птахів, який мігрує через Україну.

Дані:

- Історичні маршрути міграції білого лелеки (з відкритих джерел, [Movebank](#)).
- Карти бойових дій на Донбасі (діючі зони конфлікту, змінені з часом).
- Метеорологічні дані за рік (температура, вологість, вітер).

Метод:

- Використовувати модель прогнозування для виявлення стандартного маршруту міграції.
- Імітувати сценарій, в якому частина маршруту проходить через зону військових дій на Донбасі.
- Оцінити, як система коригує маршрут, вказуючи на обхід зони бойових дій.

Очікувані результати:

- Птахи можуть змінити маршрут, щоб уникнути зони конфлікту.
- Порівняння результатів з реальними даними з [GPS-трекінгу](#).

## Результати експерименту №1

Результати експерименту 1 (метод інтелектуального аналізу даних)

Птах	Історичний маршрут (км)	Прогнозований маршрут (км)	Відстань зміни маршруту (км)
Лелека	4000	4300	300
Шуліка	3500	3550	50
Журавель	5200	5250	50

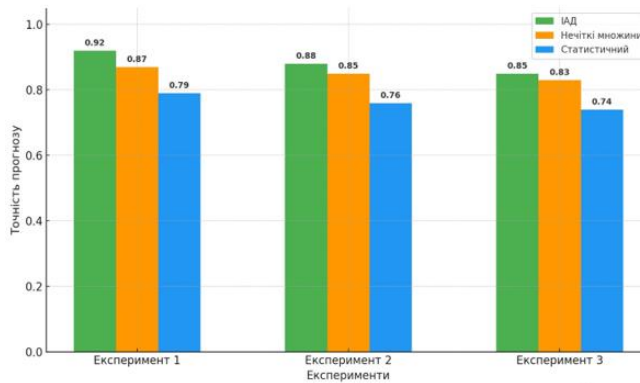
## Порівняння точності методів прогнозування

Результати експериментів показали наступне.

Інтелектуальний аналіз даних забезпечує найвищу точність прогнозування — MAE  $\approx$  6.3%.

Нечітка модель ефективно ідентифікує зони ризику при обмежених даних.

Найбільш значущі фактори: тривалість забруднення повітря, площа пожежі, зміна температури.



## Висновки

Кваліфікаційна робота бакалавра вирішує задачу покращення прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних.

В роботі проведено аналіз сучасних методів прогнозування, розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф засобами ІАД, проведено експериментальне тестування з метою оцінки ефективності методу.

Вхідні дані повністю описують предметну область, а саме: облік параметрів маршрутів, надходження метеорологічних даних, врахування залежностей між ними, параметри екологічних катастроф, врахування залежностей між ними, прив'язка до місцевості та географічних особливостей тощо. Під час виконання роботи було вивчено існуючі рішення для прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Було досліджено інструменти для побудови системи.

Дякую за увагу!

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

Автор студент групи КН-21-1 Костянтин Боратинський

Освітня програма Комп'ютерні науки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 122 – Комп'ютерні науки

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. каф. комп'ютерних наук Віталій Міхалевський

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмними засобами комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	<i>відповідає</i>
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	<i>відсутні</i>

Підтвердження:

*Запозичення, виявлені в роботі Костянтина Боратинського, не є плагіатом, оскільки: запозичення розміщені в розділі огляду існуючих підходів, не описують безпосередньо авторську роботу і не стосуються її результатів; усі запозичення фрагментарні; до запозичень входять фрагменти, які не мають авторства і містять поширені конструкції та загальновідомі терміни, скорочення. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином, робота є законною та приймається до захисту.*

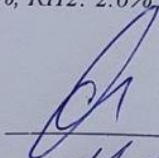
*Обсяг запозичень, визначений системами виявлення збігів/ідентичності/схожості:*

- за системою Anti-Plagiarism: 8%;

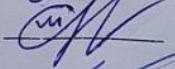
- за системою StrikePlagiarism КП1: 9.2%, КП2: 2.6%

20.06.2025

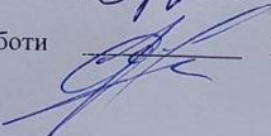
Завідувач кафедри

 Олександр БАРМАК

Гарант освітньої програми

 Олександр МАЗУРЕЦЬ

Керівник кваліфікаційної роботи

 Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ

20.06.25, 09:42

result\_1805572099906231458.html

Fri Jun 20 09:42:24 EEST 2025, Петровський Сергій Степанович, Хмельницький національний університет, ХНУ

# Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 6.0%

Dictionaries check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Errors in the documents: 8%

ID: 247133 Title: КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА на тему Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних Added in a DB: 2025-06-20 Authors: Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ Heads: Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	69158	1035	5154 (7%)	80 (8%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

### Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Костянтин БОРАТИНСЬКИЙ

**Співавтор:**

**Назва:** КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА на тему Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

**Науковий керівник:** Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ, к.ф.-м.н., доцент

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерних наук

**Коефіцієнт подібності 1:** 9.2%

**Коефіцієнт подібності 2:** 2.6%

**Мікропробіли:** 0

**Заміна букв:** 8

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-06-20 11:14:02.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-20

Дата

експерт

*Ле. Лещовський Р.Р.*



ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МОН УКРАЇНИ

Кафедра комп'ютерних наук



## ВІДГУК НАУКОВОГО КЕРІВНИКА на кваліфікаційну роботу бакалавра

студента *гр. КН-21-1 Костянтина БОРАТИНСЬКОГО*

за темою *Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних*

### 1. Актуальність теми

Актуальним завданням, яке потребує аналізу і досліджується у даній роботі, є визначення методів прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Процеси оцінки та прогнозу впливу екологічних катастроф завжди були актуальними, а в сьогоденні умовах війни додаються додаткові фактичні та прогнозовані ризики (обстріли, бойові дії тощо) для маршрутів перелітних птахів. Для ефективного використання інформаційної системи необхідно передбачити застосування програмного модуля, який би дозволяв формувати рекомендації з побудови маршрутів перелітних птахів в обхід зон катастроф на основі вхідної множини даних про різні фактори, що впливають на маршрути. Розробка такого методу прогнозування є актуальною задачею комп'ютерних наук.

### 2. Відповідність роботи предметній області Стандарту спеціальності 122 Комп'ютерні науки

За стандартом, а саме описом предметної області, об'єктами вивчення та діяльності є математичні, інформаційні, імітаційні моделі реальних явищ, об'єктів, систем і процесів та методи і технології отримання, зберігання, обробки, передачі та використання інформації. Метою роботи саме є підвищення точності методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу та розробка відповідного методу. При вирішенні поставленої задачі використано методи та алгоритми розв'язання теоретичних і прикладних задач, що виникають при розробці інформаційних технологій. Тому результати виконання кваліфікаційної роботи бакалавра відповідають стандарту бакалавра спеціальності 122 – Комп'ютерні науки.

### 3. Професійні та особистісні якості бакалавра

При роботі над кваліфікаційною роботою бакалавра Костянтина БОРАТИНСЬКОГО проявив себе кваліфікованим фахівцем та дисциплінованим студентом, вчасно виконуючи поставлені етапи дослідження. Як в процесі написання пояснювальної записки, так і при розробці методу та прикладного програмного забезпечення проявив достатні для одержання успішного результату компетентності та результати навчання. Опанував професійні скіли за напрямком «Комп'ютерні науки» та достатньо значний софт скіл. Також серед особистісних якостей студента слід виділити відповідальність, здатність навчатися, нестандартність мислення.

#### **4. Ступінь самостійності під час виконання кваліфікаційної роботи**

Одержані в роботі результати є наслідком особистої діяльності студента, який самостійно виконував всі поставлені задачі.

#### **5. Ступінь оволодіння методами дослідження**

При реалізації кваліфікаційної роботи показав достатній рівень компетентностей та володіння необхідними інструментами та обладнанням, методами, методиками та технологіями предметної області комп'ютерних наук.

#### **6. Повнота та якість розкриття теми роботи**

Тема роботи в достатній мірі обґрунтована й розкрита, проведено аналіз актуальності та відомих досліджень в межах обраної теми, поставлені завдання, які у роботі виконані, розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних та програмне забезпечення для перевірки функціональності розробленої системи і проведення експериментів.

#### **7. Логічність, послідовність, аргументованість, літературна грамотність викладення матеріалу**

Структура роботи та послідовність викладення логічні та відповідають поставленій меті. Викладення матеріалу послідовне, аргументоване, літературно грамотне.

#### **8. Можливість практичного застосування кваліфікаційної роботи бакалавра, окремих її частин**

Розроблений у роботі метод та його програмна реалізація можуть бути використані працівниками метеослужб та моніторингу якості повітря для підвищення точності методу прогнозування забрудненості (якості) повітря. Ефективність застосування розробленого методу прогнозування з використанням інтелектуального аналізу даних за результатами проведених експериментів складає в середньому 7,4%.

#### **9. Висновок про можливість допуску кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту, на яку оцінку заслуговує робота**

Враховуючи достатній рівень виконання та забезпечення усіх необхідних вимог, робота може бути допущена до захисту.

Рекомендована оцінка «добре».

Керівник



к.фіз.-мат.н., доц. Віталій МІХАЛЕВСЬКИЙ



ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МОН УКРАЇНИ

Кафедра комп'ютерних наук



## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студента гр. КН-21-1 Костянтина БОРАТИНСЬКОГО

за темою: Метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних

### 1. Актуальність обраної теми

В кваліфікаційній роботі бакалавра був розглянутий метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних. Тема роботи є актуальною на даний час, актуальність обґрунтована дослідженням процесів впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів з необхідністю врахування параметрів катастроф та застосування засобів інтелектуального аналізу даних. Актуальність теми прогнозування маршрутів перелітних птахів в Україні можна розглянути в контексті війни, коли місця гніздування та маршрути птахів змінюються через військові дії, а молоде покоління птахів не встигає підготуватися до перельоту. Тому розробка методів прогнозування впливу катастроф на маршрути перелітних птахів стає надзвичайно важливою в сучасних умовах.

### 2. Повнота розкриття мети та завдань роботи

Завдання дослідження повністю розкривають мету роботи. Розроблено новий метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних. Створено інформаційну модель, яка дозволяє автоматизувати процеси прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів та забезпечує отримання рекомендацій по збереженню біологічного природного багатоманіття.

Спроековано функціональну структуру інформаційної системи для прогнозу впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Розроблено програмну реалізацію методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних. Проведено функціональне і прикладне дослідження запропонованого методу, що підтвердило його ефективність і надійність при прогнозуванні маршрутів.

### 3. Зміст кожного розділу роботи

У першому розділі проведено аналіз предметної області та сформульовано постановку задачі на розробку методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних. Розглянуто основні

теорії та методи прогнозування, які можуть бути використані для подальшої розробки програмної системи.

У другому розділі запропоновано і розроблено метод прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів. Спроековано інформаційну модель, яка дозволяє автоматизувати процеси прогнозування та забезпечує отримання рекомендації про маршрути і місця перебування птахів.

У третьому розділі розглянуто особливості реалізації розробленого методу прогнозування впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів засобами інтелектуального аналізу даних. Проведено експерименти для перевірки ефективності роботи методу, описано функціональні можливості інформаційної системи.

#### **4. Оцінка розробленого методу та його практична цінність**

Метод повністю розроблений відповідно до визначених завдань. Він базується на запропонованій інформаційній моделі та використовує підхід до визначення впливу екологічних катастроф на маршрути перелітних птахів із використанням засобів інтелектуального аналізу даних. Практична цінність розробленого методу полягає у можливості його реального застосування для вирішення задач прогнозування, забезпечення отримання інформації про маршрути і місця відпочинку птахів та підтримки прийняття обґрунтованих рішень. Практичне значення методу полягає у зменшенні витрат на ручне опрацювання даних про катастрофи та переміщення птахів і оперативності процесів прийняття рішень.

#### **5. Якість оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра**

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи бакалавра оформлена відповідно до норм. Мовних, граматичних, синтаксичних помилок не виявлено.

#### **6. Недоліки кваліфікаційної роботи бакалавра**


Явних недоліків в роботі не виявлено. Можна було б узагальнити роботу методу та системи шляхом розширення впливу екологічних катастроф на види тварин або природне середовище.

#### **7. Загальний висновок (допускається чи не допускається до захисту), та оцінка на яку заслуговує кваліфікаційна робота.**

Враховуючи рівень виконання та забезпечення усіх необхідних вимог, робота може бути допущена до захисту.

Рекомендована оцінка «Добре».

Рецензент

 к. ер.-м. н., доц. Наталія ЯПЕЦЬКА