

УДК 004.9+004.8]:[504.61:355.01

Vasyl Marushchak, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** stydjaga.fo.ru@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL FOR AERIAL IMAGE DECODING AND AUTOMATED ANALYSIS OF URBAN INFRASTRUCTURE

Abstract. *This study addresses a scientific and practical challenge focused on improving the monitoring of urbanized areas by utilizing remotely piloted aerial systems (RPAS) to enhance the efficiency of detecting urban infrastructure objects (UIOs). The key factors influencing the accuracy and timeliness of UIO identification based on aerial imagery have been analyzed. The study formulates the main requirements for the image interpretation process, emphasizing the need to ensure high levels of detection speed and reliability.*

Particular attention is paid to the prospects of automating the recognition of UIOs using computer vision technologies and deep learning methods based on artificial neural networks. Within the framework of the research, a conceptual mathematical model for automated image interpretation is proposed, which provides for the detection of urban infrastructure objects through computer vision algorithms implemented via artificial intelligence technologies.

Integration of the developed model into the image processing system makes it possible to significantly improve the operational efficiency of UIO recognition while maintaining an acceptable level of interpretation accuracy. The application of such solutions is particularly relevant for real-time monitoring of changes in urban development, the condition of transportation infrastructure, engineering networks, and technogenic facilities. The use of machine learning algorithms not only facilitates object detection but also enables their functional classification with a high degree of accuracy.

Implementation of the proposed approach creates prerequisites for the automated processing of large volumes of visual data, ensuring timely responses to changes in the urban environment.

Prospects for further work include: accumulation and structuring of a specialized database of aerial photographs with marked objects of urban infrastructure, creation of a comprehensive method for automating the decoding of aerial photographs with its subsequent software implementation, implementation of comprehensive experimental studies aimed at verifying the effectiveness of the proposed mathematical model according to the criteria of efficiency and reliability.

Keywords: *information technologies, image interpretation, aerial photography, geographic information systems, object recognition, aerial data processing, machine learning.*

В.М. Марущак

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕШИФРУВАННЯ АЕРОФОТОЗНІМКІВ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

***Анотація.** У роботі розглянуто науково-прикладне завдання, що полягає у вдосконаленні процесу моніторингу урбанізованих територій шляхом використання дистанційно керованих літальних апаратів (БПЛА) з метою підвищення ефективності виявлення об'єктів міської інфраструктури (ОМІ). Проаналізовано основні фактори, які впливають на якість і своєчасність ідентифікації ОМІ за даними аерофотозйомки. Сформульовано вимоги до процесу дешифрування аерофотознімків з урахуванням необхідності забезпечення високої оперативності та достовірності результатів ідентифікації.*

Особливу увагу приділено перспективам автоматизації розпізнавання ОМІ з використанням технологій комп'ютерного зору та глибокого навчання на основі штучних нейронних мереж. У межах дослідження запропоновано концептуальну математичну модель автоматизованого дешифрування, яка передбачає виявлення об'єктів міської інфраструктури на основі алгоритмів комп'ютерного зору, що реалізуються засобами штучного інтелекту.

Інтеграція розробленої моделі в систему обробки зображень дає змогу підвищити рівень оперативності розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, одночасно зберігаючи допустимий рівень достовірності дешифрування.

Застосування таких рішень особливо актуальне для оперативного моніторингу змін забудови, стану транспортної інфраструктури, інженерних комунікацій та техногенних об'єктів. Використання алгоритмів машинного навчання дає змогу не лише виявляти об'єкти, а й класифікувати їх за функціональним призначенням із високим рівнем точності. Завдяки впровадженню запропонованого підходу створюються передумови для автоматизованої обробки великих обсягів візуальної інформації, що забезпечує оперативне реагування на зміни в міському середовищі.

***Ключові слова:** інформаційні технології, дешифрування, аерофотознімки, геоінформаційні системи, розпізнавання об'єктів, обробка аерофотоданих, машинне навчання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.154-163>

Вступ

У сучасних умовах бурхливого розвитку інфраструктури міста зросло значення відеоінформації, що надходить із бортів БПЛА, як одного з ключових інструментів інформаційного забезпечення структури управління міським господарством та плануванням. Це зумовлено швидкими змінами в міському середовищі, що, у свою чергу, підвищує вимоги до актуальності та своєчасності даних, отриманих із використанням БПЛА. Особливо важливо це на рівні оперативного управління, де дані з БПЛА посідають одне з провідних місць у системі інформаційної підтримки.

На сьогоднішній день типовими засобами аерофотозйомки є комерційні безпілотники серії DJI Mavic, які отримали широке розповсюдження завдяки поєднанню хороших технічних характеристик (зокрема бортових відеокамер) із доступною вартістю. Застосування таких БПЛА дає змогу отримувати інформацію (відеопотік, фотофіксацію) з високою деталізацією, що суттєво сприяє виявленню об'єктів міської інфраструктури, зразків забудови або скупчень об'єктів. Водночас існує низка проблем, що обмежують ефективність такого застосування, зокрема:

- потреба в планшетних пристроях із високою продуктивністю для аналізу відеозображень у реальному часі;
- складність ідентифікації таких об'єктів оператором, зумовлена впливом людського чинника (кваліфікація оператора, особливості візуального сприйняття);
- часові затримки між моментом отримання даних та їх обробкою, пов'язані з архітектурою системи збереження даних.

Остання проблема зумовлена тим, що інформація, отримана під час аеромоніторингу, зберігається не на планшеті керування, а безпосередньо на бортовому накопичувачі безпілотника. Як наслідок, повноцінне дешифрування аерофотознімків можливе лише після завершення польоту.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває завдання пошуку сучасних рішень, які дозволили б підвищити ефективність дешифрування отриманих матеріалів шляхом скорочення часу на їх обробку.

Отже, важливою науково-прикладною проблемою є підвищення оперативності дешифрування даних аерофотознімків при збереженні високого рівня достовірності виявлення об'єктів міської інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд останніх наукових публікацій демонструє активний розвиток технологій, спрямованих на підвищення оперативності доставки результатів, отриманих з БПЛА. Зокрема, активно впроваджуються методи компресійного кодування, алгоритми кластерного аналізу зображень та інші підходи до оптимізації подання кодованих даних.

Паралельно, з метою забезпечення високої достовірності аерофотоданих, застосовуються технології завадостійкого кодування, а також удосконалюються існуючі методи стиснення інформації.

У випадку розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, значну ефективність демонструють алгоритми комп'ютерного зору та методи штучного інтелекту, побудовані на основі штучних нейронних мереж. Ці технології вже досягли значних успіхів у цивільному секторі, зокрема у виявленні людей, предметів, транспорту.

У зв'язку з цим доцільним є впровадження сучасних методів комп'ютерного зору, що базуються на нейронних мережах, у процес виявлення об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках. Подібні технології вже активно використовуються в різних галузях цивільного сектору (наприклад, у містобудуванні, моніторингу навколишнього середовища, сільському господарстві), що підкреслює їхню універсальність та потенціал для застосування в міському моніторингу.

Разом з тим, використання комерційних рішень на основі штучного інтелекту часто потребує значних фінансових вкладень та високопродуктивної обчислювальної інфраструктури. У зв'язку з цим пропонується

використовувати відкриті (некомерційні) технології машинного навчання, які можуть бути адаптовані та вдосконалені для потреб автоматизованого аналізу отриманих даних. Це дозволить створити основу для реалізації систем автоматичного розпізнавання об'єктів міської інфраструктури з можливістю подальшої інтеграції в існуючі засоби обробки аерофотознімків.

Мета роботи. Метою дослідження є визначення ефективних підходів до автоматизації процесу розпізнавання об'єктів міської інфраструктури для підвищення швидкості дешифрування аерофотознімків.

Об'єктом дослідження є процес виявлення та дешифрування об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках, отриманих за допомогою БПЛА, що включає збір, обробку, аналіз та ідентифікацію візуальних даних, де особливістю є використання комп'ютерного зору і технологій штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для забезпечення результативної роботи моделі автоматизованого розпізнавання об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках необхідно дотримуватись наступних основних критеріїв:

1. Підвищена швидкодія процесу виявлення об'єктів міської інфраструктури. Однією з ключових вимог до моделі є мінімізація часу обробки вхідного зображення для виявлення об'єктів. Це формалізується наступною умовою, що відображає коефіцієнт оперативності дешифрування (Коп):

$$K_{op} = \frac{T_{etalon}}{T_{факт}},$$

де: T_{etalon} – еталонний (мінімально допустимий) час на виявлення ОМІ на аерофотознімку;

$T_{факт}$ – фактичний час, витрачений запропонованою математичною моделлю на виявлення об'єктів.

Для забезпечення необхідної швидкодії, повинна виконуватися умова ефективності, коефіцієнт оперативності дешифрування повинен бути не меншим за одиницю, тобто: $K_{op} \geq 1$.

2. Високий рівень точності (достовірності) ідентифікації об'єктів. Показник достовірності відображає відсоткове співвідношення правильно розпізнаних об'єктів до загальної кількості об'єктів, поданих для дешифрування.

Розрахунок ведеться за формулою, що визначає індекс достовірності розпізнавання ($I_{дор}$):

$$I_{дор} = \frac{N_{виявл_прав}}{N_{заг\ об'єктів}},$$

де: $N_{виявл_прав}$ – кількість об'єктів міської інфраструктури, коректно ідентифікованих математичною моделлю на тестових аерофотознімках;

$N_{заг_об'єктів}$ – загальна кількість об'єктів міської інфраструктури, представлених на тестових аерофотознімках.

Для забезпечення високого рівня достовірності, також повинна виконуватися умова ефективності, де індекс достовірності розпізнавання має перевищувати або дорівнювати встановленому мінімально допустимому порогу ($I_{дор(мін)}$), що визначається специфікою завдань моніторингу, тобто: $I_{дор} \geq I_{дор(мін)}$.

З огляду на те, що на сьогодні процес виявлення ОМІ на аерофотознімках, отриманих за допомогою бортових систем аеромоніторингу, встановлених на БПЛА, здійснюється переважно вручну – тобто оператором із використанням власної зорової системи, то можна стверджувати, що швидкість дешифрування значною мірою залежить від таких чинників, як:

- рівень професійної підготовки оператора (практичні навички);
- фізіологічні особливості зору оператора;
- погодні умови під час зйомки;
- параметри польоту БПЛА (висота, швидкість);
- технічні характеристики оптико-електронних систем спостереження.

Кожен із перелічених факторів чинить істотний вплив на якість і точність виявлення об'єктів міської інфраструктури на зображеннях, що впливає на загальну ефективність аналізу даних дешифрування. У зв'язку з цим доцільним є створення математичної моделі, яка дозволить автоматизувати процес дешифрування аерофотознімків. Такий підхід сприятиме забезпеченню відповідності процесу розпізнавання наступним ключовим вимогам:

1. Підвищення швидкодії ідентифікації об'єктів міської інфраструктури, що оцінюється коефіцієнтом прискорення дешифрування ($K_{пр}$):

$$K_{пр} = \frac{T_{існуючий\ метод}}{T_{автоматизований\ метод}}, \quad (1)$$

де: $T_{існуючий\ метод}$ – середній час, необхідний для дешифрування об'єктів за допомогою традиційних (існуючих, наприклад, ручних) методів;

$T_{автоматизований\ метод}$ – час, витрачений на дешифрування тих самих об'єктів із використанням запропонованого автоматизованого методу.

Зазначимо, що актуальність цієї вимоги зумовлена суттєвими часовими витратами на аналітичну обробку зображень при використанні класичних методів, що у ряді випадків призводить до втрати оперативності отриманих даних.

2. Досягнення заданого рівня достовірності виявлення об'єктів міської інфраструктури, що характеризується коефіцієнтом підвищення достовірності ($K_{дост}$):

$$K_{дост} = \frac{D_{нв}}{D_{цільової}}, \quad (2)$$

де: $D_{нв}$ – досягнутий рівень достовірності розпізнавання об'єктів міської інфраструктури запропонованою математичною моделлю (у відсотках від 1); $D_{цільової}$ – мінімально допустимий або бажаний рівень достовірності, встановлений для завдань моніторингу.

Варто зазначити, що виконання цих вимог є вкрай важливим, оскільки на сьогоднішній день процес дешифрування аерофотознімків залишається трудомістким та потребує значного часу. Це спричиняє затримки в отриманні

інформації та знижує її оперативну цінність, що критично важливо в умовах нестандартних ситуацій динамічного міського середовища. Забезпечення виконання наведених вимог пропонується реалізовувати шляхом впровадження сучасних алгоритмів комп'ютерного зору в процес дешифрування аерофотознімків. Такий підхід пояснюється тим, що застосування алгоритмів, побудованих на основі технологій штучного інтелекту, створює передумови для значного прискорення розпізнавання ОМІ на зображеннях. Водночас ефективність таких рішень безпосередньо залежить від обсягу й якості навчальних даних: чим більшою є база зразків цільових об'єктів, тим точніше працюватиме система розпізнавання. Для реалізації цієї ідеї зазвичай використовуються згорткові нейронні мережі в комбінації з алгоритмами машинного навчання.

Серед найперспективніших інструментів у цій сфері останнім часом виділяються моделі сімейства YOLO (You Only Look Once), які зарекомендували себе як швидкі, точні та порівняно невибагливі до апаратного забезпечення. Зокрема, моделі п'ятої версії та їхні модифікації демонструють переваги у вигляді:

- високої швидкодії;
- простоти використання;
- низьких обчислювальних вимог під час обробки зображень.

Сучасними платформами для реалізації таких алгоритмів виступають PyTorch та TensorFlow. Зокрема, PyTorch відзначається зручністю, економним використанням пам'яті та гнучкістю, тоді як TensorFlow забезпечує широкі можливості масштабування, підтримку паралельних і розподілених обчислень. Аналіз існуючих підходів дає підстави стверджувати, що алгоритми з родини YOLO є дієвим інструментом для оперативного виявлення ОМІ на зображеннях, що робить їх перспективними для подальшої інтеграції в автоматизований процес дешифрування аерофотознімків. Структурно-функціональна схема запропонованої математичної моделі автоматизованого виявлення об'єктів міської інфраструктури, що включає три основні етапи, представлена на рис. 1.

Етапи реалізації моделі

1-й етап: підготовка до навчання штучної нейронної мережі (ШНМ).

На цьому етапі здійснюється формування навчальної вибірки та класифікатора об'єктів міської інфраструктури. Етап включає такі ключові складові:

- формування бази навчальних даних – створення масиву аерофотознімків зі зразками об'єктів міської інфраструктури, які підлягають розпізнаванню;
- формування класифікатора цільових об'єктів – визначення типів об'єктів (класів), що розпізнаватимуться нейронною мережею.

У загальному вигляді масив тренувальних даних задається виразом:

$$A_{train} = \{A_1, A_2, \dots, A_N\},$$

де: A_{train} – набір аерофотознімків для навчання математичної моделі;

N – загальна кількість знімків у навчальному наборі;

A_i – окремий аерофотознімок з набору.

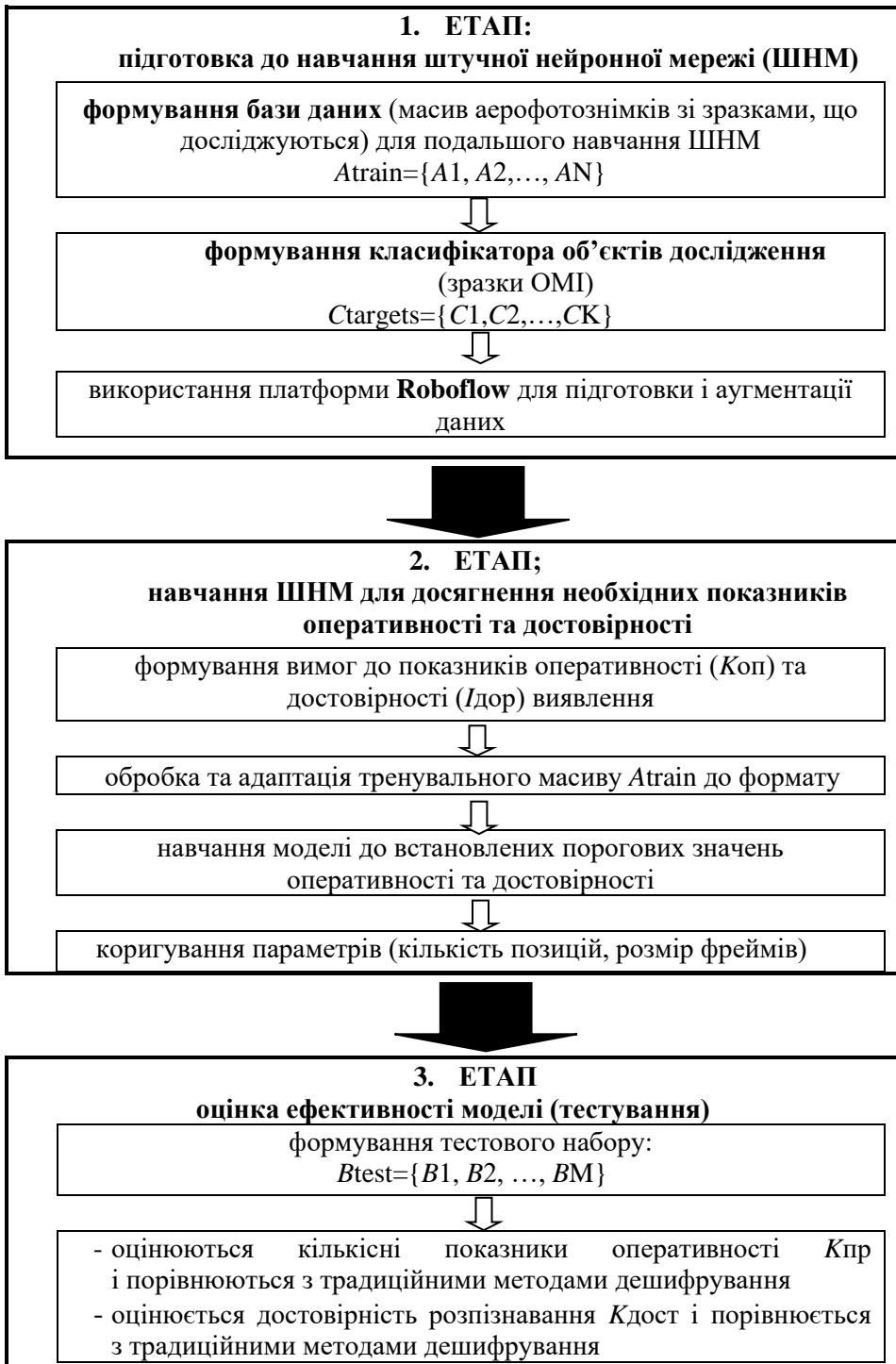


Рис. 1. Структурно-функціональна схема запропонованої моделі автоматизованого виявлення ОМІ

Одним з ключових підходів до збільшення ефективності формування бази є аугментація даних – методика розширення вибірки шляхом внесення трансформацій у зображення (масштабування, обертання). Класи об'єктів визначаються у вигляді множини:

$$C_{\text{targets}} = \{C_1, C_2, \dots, C_K\},$$

де: C_{targets} – множина класів (типів) ОМІ, що підлягають розпізнаванню;
 K – кількість унікальних класів об'єктів;
 C_j – окремий клас об'єктів.

Для реалізації цього етапу доцільно використати платформу Roboflow – сучасне середовище для створення та обробки наборів даних комп'ютерного зору з відкритим кодом. Її застосування дозволяє значно скоротити час на підготовку якісної вибірки для навчання ШНМ.

2-й етап: навчання нейронної мережі.

Метою цього етапу є налаштування математичної моделі нейронної мережі для досягнення необхідного рівня оперативності та достовірності виявлення цільових об'єктів. Етап включає:

- формалізацію вимог до характеристик роботи математичної моделі: зокрема, до показників оперативності ($K_{\text{оп}}$) та достовірності ($I_{\text{дор}}$) виявлення;
- обробку та адаптацію тренувального масиву Atrain до формату, сумісного з вибраною технологічною платформою (PyTorch або TensorFlow);
- процес навчання математичної моделі, який триває доти, доки не буде досягнуто встановлених порогових значень оперативності та достовірності. Під час тренування коригуються гіперпараметри моделі: кількість епох, розмір пакета, стратегії обробки зображень A_1, A_2, \dots, A_N та інші характеристики навчального процесу. Завершення етапу передбачає отримання зважених параметрів нейронної мережі, що забезпечують відповідність цільовим метрикам, визначеним формулами для $K_{\text{пр}}$ та $K_{\text{дост}}$.

3-й етап: оцінка ефективності моделі (тестування).

На заключному етапі виконується валідація якості роботи математичної моделі на незалежній вибірці тестових даних:

- формується тестовий набір:

$$B_{\text{test}} = \{B_1, B_2, \dots, B_M\},$$

де: B_{test} – набір тестових аерофотознімків;

M – загальна кількість знімків у тестовому наборі;

B_k – окремий тестовий аерофотознімок.

- оцінюються кількісні показники оперативності (коефіцієнт прискорення дешифрування, $K_{\text{пр}}$) виявлення об'єктів на тестових зображеннях і порівнюються з традиційними методами дешифрування;

- оцінюється достовірність розпізнавання (коефіцієнт підвищення достовірності, $K_{\text{дост}}$) за аналогічним принципом.

Запропонована математична модель автоматизації дешифрування аерофотознімків базується на інтеграції сучасних алгоритмів комп'ютерного зору та технологій штучного інтелекту. Її реалізація дозволяє значно підвищити ефективність розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, зокрема за рахунок:

1. Скорочення часу обробки аерофотознімків;
2. Зниження впливу людського фактора;
3. Підвищення достовірності та повторюваності результатів дешифрування.

У впровадженні цієї математичної моделі полягає потенціал суттєвого вдосконалення процесу дешифрування інформації в умовах моніторингу міського середовища.

Висновки

У дослідженні розроблено інноваційну концептуальну математичну модель автоматизації дешифрування об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках. Запропонована математична модель, що базується на інтеграції передових алгоритмів комп'ютерного зору та ШІ з відкритим кодом, забезпечує значне підвищення оперативності розпізнавання без додаткових фінансових витрат.

Основною науковою новизною є побудова моделі, яка враховує специфіку урбанізованого середовища та дозволяє в автоматизованому режимі розпізнавати об'єкти різного функціонального призначення (житлову, транспортну, інженерну та комунальну інфраструктуру) – з високим рівнем достовірності. Сформульовано базові вимоги до систем дешифрування в умовах високої мінливості міського ландшафту, а також розроблено структурно-функціональну схему реалізації процесу навчання та тестування штучної нейронної мережі.

Використання даної моделі створює передумови для впровадження автоматизованих систем моніторингу міського середовища, здатних своєчасно виявляти зміни забудови, виявляти потенційні порушення в інфраструктурі, а також підтримувати прийняття рішень у сфері міського управління, безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Перспективи подальшої роботи включають:

1. Накопичення та структуризацію спеціалізованої бази даних аерофотознімків з маркованими об'єктами міської інфраструктури, що враховуватиме динаміку та особливості сучасного міського розвитку;
2. Створення комплексного методу автоматизації дешифрування аерофотознімків з подальшою його програмною реалізацією;
3. Здійснення всебічних експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію ефективності запропонованої математичної моделі за критеріями оперативності та достовірності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebuch, N. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Чижевський, Б. І., Литвиненко, Д. О. (2020). Автоматизація обробки аерофотоданих з БПЛА для потреб цивільної інфраструктури. *Сучасні інформаційні технології*, №3(75), 66–72.
3. Міненко, О. В., Яковенко, П. Г. (2021). Комп'ютерний зір у завданнях екологічного моніторингу урбанізованих регіонів. *Екологічні проблеми мегаполісів*, 4(12), 88–94.

4. Абраменко, С. Ю., Носов, П. В. (2022). Застосування нейронних мереж для автоматичного дешифрування об'єктів на супутникових знімках. *Інформаційні технології та системи управління*, 1(41), 34–41.
5. Андреев, С. М., Крета, Д. Л., Радчук, В. В. (2008). Розробка картографічних моделей морських акваторій та прибережних територій з застосуванням геоінформаційних технологій. "Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій": матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. (С. 112–117). Київ – Харків – АР Крим.
6. Триснюк, В., Триснюк, Т., Варавін, Д. (2022). Геомоделі екологічної безпеки урбанізованого середовища в умовах пандемічних загроз на прикладі м. Києва. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1(25), 7–13. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-1(25)-7-13
7. Roboflow, Inc. (2023). <https://roboflow.com> – онлайн-платформа для створення та анотації датасетів зображень.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 01.05.2025

REFERENCES

1. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., & Hlebuch, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in the Kharkiv region of Ukraine. In: *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347–352). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Chyzhevskiy, B. I., & Lytvynenko, D. O. (2020). Automation of UAV-based aerial data processing for civil infrastructure needs. *Modern Information Technologies*, (3)75, 66–72.
3. Minenko, O. V., & Yakovenko, P. H. (2021). Computer vision in environmental monitoring tasks of urbanized regions. *Environmental Problems of Megacities*, 4(12), 88–94.
4. Abramenko, S. Yu., & Nosov, P. V. (2022). Application of neural networks for automatic decoding of objects in satellite images. *Information Technologies and Control Systems*, 1(41), 34–41.
5. Andreev, S. M., Kreta, D. L., & Radchuk, V. V. (2008). Development of cartographic models of marine areas and coastal zones using geoinformation technologies. In: *Modern Information Technologies for Managing Environmental Safety, Natural Resource Use, and Emergency Response: Proceedings of the 7th International Scientific-Practical Conference*. Kyiv – Kharkiv – AR Crimea (pp. 112–117).
6. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Varavin, D. (2022). Geomodels of ecological safety of the urban environment under pandemic threats using the example of Kyiv. *Ecological safety and balanced resource use*, 1(25), 7–13. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-1(25)-7-13
7. Roboflow, Inc. (2023). Roboflow – Online platform for image dataset creation and annotation. Retrieved from <https://roboflow.com>

The article was received 11.03.2025 and was accepted after revision 01.05.2025

Марущак Василь Миколайович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** stydjaga.fo.ru@gmail.com