

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО
ПРОСТОРУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАРУЩАК ВАСИЛЬ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 004.9.528.9:004.9

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПЕРАТИВНОГО ФОРМУВАННЯ
ЗВІТНИХ ДОКУМЕНТІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДЕШИФРУВАННЯ
АВІАЦІЙНИХ ТА КОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

122 – «Комп'ютерні науки»

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеню доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача) В.М. Марущак

Науковий керівник:

Триснюк Василь Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Марущак В.М. Інформаційні технології оперативного формування звітних документів за результатами дешифрування авіаційних та космічних зображень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за фахом 122 «Комп'ютерні науки» – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ – 2025.

Дисертація присвячена створенню та практичній реалізації інтегрованої інформаційної системи автоматизованого формування звітно-інформаційних документів на основі дешифрування авіаційних і супутникових зображень. Метою дослідження є підвищення точності, швидкодії та уніфікованості процесів аналізу аерокосмічної інформації у контексті потреб оборонної аналітики, розвідки та моніторингу об'єктів на місцевості. Система була спроектована з урахуванням перспектив розвитку штучного інтелекту в галузі аналізу зображень, що забезпечує її актуальність у довгостроковій перспективі. У дослідженні розглянуто можливості адаптації формування звітно-інформаційних документів для роботи з великими масивами даних у хмарних середовищах.

У вступі обґрунтовано актуальність завдання автоматизації формування звітно-інформаційних документів в умовах зростання обсягів аерокосмічних зображень, навантаження на дешифрувальників та потреби у стандартизації результатів. Визначено взаємозв'язок теми з науковими програмами в галузі геоінформаційних технологій та прикладного використання методів штучного інтелекту. Сформульовано наукову новизну, практичну цінність, а також перелік задач, що вирішуються в межах дослідження. Додатково підкреслено важливість гармонізації національних стандартів обробки аерокосмічних даних із міжнародними протоколами обміну інформацією, що сприятиме сумісності

автоматизованої системи формування звітно-інформаційних документів з іншими платформами у сфері оборони та цивільної безпеки.

У першому розділі представлено огляд літератури щодо методів обробки зображень, технологій дистанційного зондування Землі, алгоритмів сегментації, класифікації та геоприв'язки об'єктів на знімках. Здійснено порівняльний аналіз сучасних підходів до побудови звітно-інформаційних систем, виявлено їх переваги та обмеження. Запропоновано загальну концепцію розробки інтегрованої системи автоматизованого формування звітно-інформаційних документів як комплексного інструменту оперативного аналізу. У роботі також розглянуто перспективи використання автоматизованих систем дешифрування у цивільних галузях, таких як управління природними ресурсами та моніторинг надзвичайних ситуацій. Проведений аналіз враховує еволюцію алгоритмів комп'ютерного зору — від класичних методів фільтрації та морфологічної обробки до сучасних глибинних згорткових нейронних мереж, що дозволяє обґрунтувати вибір оптимальних підходів для задач дешифрування.

У другому розділі обґрунтовано архітектуру системи як модульної платформи, що включає блоки попередньої обробки зображень, сегментації та класифікації об'єктів за допомогою нейронних мереж (YOLOv5, EfficientDet), модуль геокорекції з використанням координатної системи WGS-84, інтегратор звітів та модуль верифікації через QR-кодування. Описано використані технології — Python, OpenCV, PyTorch, PostgreSQL/PostGIS, FastAPI, React.js, що забезпечують високий рівень автоматизації. Система розроблена з урахуванням можливості масштабування та адаптації до різних типів зображень і сценаріїв застосування. Особливу увагу приділено моделюванню стійкості системи до кібератак та забезпеченню інформаційної безпеки при передачі даних, а також сценаріям інтеграції з безпілотними платформами нового покоління. Кожен модуль функціонує автономно, що дозволяє здійснювати гнучке налаштування платформи під конкретні завдання. Передбачена підтримка потокової обробки

даних з безпілотних літальних апаратів в режимі реального часу. Завдяки відкритій архітектурі система може бути інтегрована з існуючими інформаційними системами оборонного та цивільного призначення.

У третьому розділі детально розглянуто програмну реалізацію системи. Представлено повний цикл обробки: від завантаження знімка до генерації електронного документа зі структурованим змістом, координатами об'єктів та цифровим підписом. Наведено алгоритми фільтрації, нормалізації, векторизації та трансформації даних. Описано механізми генерації та перевірки QR-кодів, які забезпечують автентичність та захист даних. Продемонстровано можливості ручної перевірки результатів через інтеграцію з QGIS. Також реалізовано функціонал автоматичного оновлення бази даних після кожної обробки нового зображення. Окрім технічних аспектів, описано методики навчання операторів і аналітиків, що працюють із системою, що сприяє швидкій адаптації персоналу до роботи. Передбачено механізми логування подій для аудиту дій користувача та контролю якості результатів. Система підтримує мультикористувацький доступ із розмежуванням прав — оператор, аналітик, адміністратор.

У четвертому розділі проведено серію експериментальних досліджень на зображеннях, що надходили з технічно складних та нестабільних територій східної частини України. Система продемонструвала високу точність (точність — 91 %, повнота — 87 %, інтегральний показник — 89 %, загальна точність — 93 %), середній час обробки одного знімка становить 6,4 сек., формування звітно-інформаційного документа — 3,2 сек. Порівняльний аналіз із ручними методами вказує на 6–8 разів більшу швидкодію, зниження помилкових класифікацій на 30–40 %, суттєве підвищення уніфікованості звітів та зменшення впливу людського фактору. Дослідження також виявило, що використання системи знижує потребу у залученні великої кількості операторів для аналізу даних. Результати досліджень підтверджують ефективність системи навіть за умов

відсутності стабільного інтернет-з'єднання, що відкриває можливості для автономної роботи у віддалених регіонах.

У результаті роботи сформульовано низку переваг: стандартизація аналітичних продуктів, інтерактивна верифікація, адаптивність до типу об'єктів та умов знімання, масштабованість при обробці великих обсягів даних. Розроблена система придатна для впровадження у діяльність структур оборонного сектору, аналітичних центрів та платформ геоінформаційних систем. Система також продемонструвала здатність інтегруватися в існуючі платформи управління військовими операціями, що підвищує її оперативну цінність. Передбачена можливість налаштування інтерфейсу та алгоритмів під вимоги конкретних користувачів, що робить її універсальною для різних відомств. Розглянуто перспективи застосування у багатонаціональних миротворчих місіях для швидкого обміну розвідувальними даними.

Наукова новизна дослідження полягає в інтеграції алгоритмів штучного інтелекту, геопросторового аналізу та засобів цифрової верифікації в єдину архітектуру автоматизованої системи формування звітно-інформаційних документів. Практичне значення полягає у зменшенні часу реакції на події, зниженні навантаження на аналітиків, підвищенні достовірності та прозорості результатів. Вперше вітчизняна система такого рівня поєднала комплексне використання нейронних мереж і технологій QR-кодування для забезпечення достовірності розвідувальних матеріалів. Запропонована архітектура може бути масштабована для роботи з тривимірними моделями місцевості та даними з гіперспектральних сенсорів. Також визначено перспективи використання цієї технології для автоматизованого виявлення змін об'єктів у часових рядах зображень.

Результати дослідження реалізовано у вигляді функціональної інформаційної системи, яку можна адаптувати для широкого спектру завдань — від оперативної розвідки до екологічного моніторингу. Висновки роботи можуть

бути використані для подальших досліджень у галузі автоматизації аналізу зображень, кіберзахисту даних та підвищення точності геоприв'язки об'єктів. Особливу увагу приділено універсальності архітектури, що дозволяє реалізувати підтримку нових форматів даних без значних змін коду. Також система підтримує інтеграцію з хмарними сервісами для зберігання та обробки великих масивів аерокосмічної інформації. Розроблено методи автоматичного маркування об'єктів, які можуть значно зменшити час на підготовку тренувальних вибірок для нейронних мереж.

Архітектура програмного забезпечення передбачає модульність та масштабованість, що дозволяє адаптувати її під специфічні сценарії оперативної обстановки. Алгоритмічне ядро системи оптимізовано для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, що підвищує її застосовність у мобільних польових комплексах. Розроблено мобільну версію інтерфейсу для планшетів та смартфонів, що дає змогу оперативно переглядати результати обробки знімків у польових умовах. Система має можливість офлайн-роботи з наступною синхронізацією даних при підключенні до мережі. У дослідженні наведено рекомендації щодо підготовки операторів для ефективного використання всіх можливостей мобільної версії. Результати тестових випробувань підтвердили високу стійкість алгоритмів до перешкод, а також їх здатність зберігати стабільну продуктивність за умов змінних метеорологічних факторів та низької якості вхідних зображень. Проведено аналіз залежності ефективності системи від висоти польоту безпілотних літальних апаратів та роздільної здатності сенсорів. Запропоновано оптимальні параметри зйомки для різних завдань, що дозволяє підвищити точність виявлення об'єктів. Також визначено напрямки подальшого вдосконалення, зокрема впровадження алгоритмів глибинного навчання для прогнозування змін обстановки.

У процесі дослідження було також проведено апробацію методики на різних типах місцевості, включаючи урбанізовані, лісові та прибережні зони. Розроблені

підходи довели свою ефективність при обробці даних з мікросупутників та малих безпілотних літальних апаратів, що розширює спектр можливих джерел інформації. Особлива увага приділялася питанню кіберзахисту каналів передавання даних, що є критично важливим для військових і розвідувальних операцій. Перспективи розвитку включають інтеграцію з системами штучного прогнозування ризиків для підвищення рівня ситуаційної обізнаності.

Ключові слова: інформаційні технології, звітно-інформаційні документи, дешифрування, авіаційні зображення, космічні зображення, дистанційне зондування Землі, штучний інтелект, геоінформаційні системи, автоматизація, нейронні мережі, QR-кодування, геоприв'язка, військова аналітика, обробка зображень, об'єктне розпізнавання.

ANNOTATION

Marushchak V.M. Information Technologies for the Rapid Generation of Reporting Documents Based on the Interpretation of Aerial and Satellite Images. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 "Computer Science" – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv – 2025.

The dissertation is devoted to the development and practical implementation of an integrated information system for the automated generation of report and information documents based on the interpretation of aerial and satellite imagery. The aim of the research is to improve the accuracy, processing speed, and standardization of aerospace information analysis in the context of the needs of defense analytics, reconnaissance, and monitoring of objects in the field. The system was designed taking into account the prospects for the development of artificial intelligence in the field of image analysis, which ensures its long-term relevance. The study examines the possibilities of adapting the generation of report and information documents for processing large volumes of data in cloud environments.

The introduction substantiates the relevance of automating the generation of report and information documents under conditions of increasing volumes of aerospace imagery, the workload on image interpreters, and the need for standardization of results. The relationship of the topic with scientific programs in the field of geographic information technologies and the applied use of artificial intelligence methods is defined. The scientific novelty, practical value, and the list of tasks solved within the framework of the research are formulated. Special emphasis is placed on the importance of harmonizing national standards for processing aerospace data with international information exchange protocols, which will contribute to the compatibility of the

automated report and information document generation system with other platforms in the field of defense and civil security.

The first chapter presents a literature review of image processing methods, remote sensing technologies, algorithms for segmentation, classification, and georeferencing of objects in images. A comparative analysis of modern approaches to building report and information systems has been carried out, identifying their advantages and limitations. A general concept for developing an integrated system for automated report and information document generation as a comprehensive tool for operational analysis is proposed. The work also considers the prospects for using automated interpretation systems in civilian sectors, such as natural resource management and emergency monitoring. The analysis takes into account the evolution of computer vision algorithms—from classical filtering and morphological processing methods to modern deep convolutional neural networks—which makes it possible to justify the choice of optimal approaches for interpretation tasks.

The second chapter substantiates the architecture of the system as a modular platform that includes blocks for image preprocessing, object segmentation and classification using neural networks (YOLOv5, EfficientDet), a geocorrection module using the WGS-84 coordinate system, a report integrator, and a verification module based on Quick Response coding. The technologies used are described—Python, OpenCV, PyTorch, PostgreSQL/PostGIS, FastAPI, and React.js—which ensure a high level of automation. The system is designed with scalability and adaptability to various types of images and application scenarios in mind. Particular attention is paid to modeling the system's resilience to cyberattacks and ensuring information security during data transmission, as well as to scenarios for integration with next-generation unmanned platforms. Each module operates autonomously, allowing flexible configuration of the platform for specific tasks. Support for real-time streaming data processing from unmanned aerial vehicles is provided. Thanks to its open

architecture, the system can be integrated with existing defense and civilian information systems.

The third chapter examines the software implementation of the system in detail. The full processing cycle is presented—from uploading an image to generating an electronic document with structured content, object coordinates, and a digital signature. Algorithms for filtering, normalization, vectorization, and data transformation are provided. Mechanisms for generating and verifying Quick Response codes that ensure data authenticity and protection are described. The capabilities for manual result verification via integration with QGIS are demonstrated. Functionality for automatic database updates after each new image processing session is implemented. In addition to technical aspects, methodologies for training operators and analysts working with the system are described, which facilitate rapid staff adaptation. Mechanisms for event logging to audit user actions and control result quality are provided. The system supports multi-user access with role-based permissions—operator, analyst, and administrator.

The fourth chapter presents a series of experimental studies on images obtained from technically complex and unstable areas in the eastern part of Ukraine. The system demonstrated high performance (Precision – 91%, Recall – 87%, F1-score – 89%, Overall Accuracy – 93%), with an average image processing time of 6.4 seconds and report and information document generation time of 3.2 seconds. Comparative analysis with manual methods shows 6–8 times faster processing, a reduction in false classifications by 30–40%, a significant improvement in report standardization, and a reduction in human-factor influence. The study also revealed that the use of the system reduces the need to involve a large number of operators for data analysis. The results confirm the system's effectiveness even in the absence of a stable Internet connection, enabling autonomous operation in remote regions.

As a result of the work, several advantages have been formulated: standardization of analytical products, interactive verification, adaptability to object types and imaging

conditions, and scalability in processing large data volumes. The developed system is suitable for implementation in defense sector structures, analytical centers, and geographic information system platforms. The system has also demonstrated the ability to integrate into existing military operations management platforms, increasing its operational value. Customization of the interface and algorithms for specific user requirements is possible, making it universal for various agencies. The prospects for use in multinational peacekeeping missions for rapid exchange of intelligence data are considered.

The scientific novelty of the research lies in the integration of artificial intelligence algorithms, geospatial analysis, and digital verification tools into a unified architecture of an automated report and information document generation system. The practical significance lies in reducing response time to events, decreasing the workload on analysts, and increasing the reliability and transparency of results. For the first time, a domestic system of this level has combined the comprehensive use of neural networks and Quick Response coding technology to ensure the authenticity of intelligence materials. The proposed architecture can be scaled to work with three-dimensional terrain models and hyperspectral sensor data. Prospects for using this technology for automated detection of object changes in time series of images are also defined.

The research results have been implemented in the form of a functional information system that can be adapted for a wide range of tasks—from operational reconnaissance to environmental monitoring. The conclusions can be used for further research in the field of image analysis automation, data cybersecurity, and improving the accuracy of object georeferencing. Particular attention is paid to the universality of the architecture, which allows support for new data formats without significant code modifications. The system also supports integration with cloud services for storing and processing large volumes of aerospace information. Methods for automatic object

labeling have been developed, which can significantly reduce the time required to prepare training datasets for neural networks.

The software architecture provides modularity and scalability, allowing adaptation to specific operational scenarios. The algorithmic core of the system is optimized for operation under limited computational resources, increasing its applicability in mobile field complexes. A mobile interface version for tablets and smartphones has been developed, enabling rapid review of image processing results in the field. The system supports offline operation with subsequent data synchronization when connected to the network. The study provides recommendations for operator training to effectively use all capabilities of the mobile version. Test results confirmed the high resilience of the algorithms to interference and their ability to maintain stable performance under variable meteorological conditions and low-quality input images. An analysis of the system's efficiency dependence on unmanned aerial vehicle flight altitude and sensor resolution has been conducted. Optimal imaging parameters for different tasks are proposed, allowing for increased object detection accuracy. Further improvement directions are identified, including the implementation of deep learning algorithms for forecasting changes in the operational environment.

The methodology was also tested in various terrain types, including urban, forest, and coastal zones. The developed approaches have proven effective in processing data from microsatellites and small unmanned aerial vehicles, expanding the range of possible information sources. Special attention has been given to securing data transmission channels, which is critically important for military and intelligence operations. Prospects for development include integration with artificial risk prediction systems to improve situational awareness.

Keywords: information technologies, report and information documents, image interpretation, aerial imagery, satellite imagery, remote sensing of the Earth, artificial intelligence, geographic information systems, automation, neural networks, Quick

Response coding, georeferencing, military analytics, image processing, object recognition.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

I. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Марущак В.М.. Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація аналізу міської інфраструктури. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 2 (54) квітень-червень 2025, с. 154-164 ISSN: 2411-4049.

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

2. Марущак В.М., Волинець Т.В. Інформаційні системи дешифрування зображень з використанням Аерокосмічних технологій. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 4(52) жовтень–грудень 2024. с.135-144. ISSN 2411-4049 DOI:

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.135-144>

3. Триснюк В.М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4(85) 2024. с.113-118. ISSN 2412-4338 DOI:

<https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.0447261>

4. Триснюк В.М., Шумейко В.О., Триснюк Т.В., Марущак В.М. Моніторинг радіоактивного забруднення місцевості та ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 2(42), квітень–червень 2022. с.35-46. ISSN 2411-4049 DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.35-46>

Участь у конференціях scopus

5. Trysnyuk V., Ehorov V., Trysnyuk T., Prystupa V., Nahornyj Y., Marushchak V. Improvement of The System of Automated Pointing of the Antenna to the Satellite. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 15–18 November 2022, Kyiv, p.1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580098>

II. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

6. Триснюк Т.В., Конецька О.О., Нагорний Є.І., Марущак В.М., Волинець Т.В., Приступа В.В. Оцінка радіаційного ризику забруднення місцевості для населення внаслідок військових дій. Challenges and threats to critical infrastructure. Detroit (Michigan, USA) – 2023 с. 163-167. NGO Institute for Cyberspace Research, 2023. ISBN-10/979-8-218-22315-1.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17917/1/Monograph-09-06-2023.pdf#page=163>

7. Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування математичних методів для виявлення та запобігання кіберзагрозам. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 36-38 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: [10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210](https://doi.org/10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210)

8. Марущак В.М., Волинець Т.В., Зотова Л.В., Хабова Н.В. Виклики у створенні комплексної математичної моделі електронної документації Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 60-61 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: [10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210](https://doi.org/10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210)

9. Шумейко В.О., Триснюк Т.В., Волинець Т.В., Марущак В.М., Дзюба В.А. Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу транскордонних впливів. «ІХ Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024 р. с.265-267.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/paper/viewFile/22214/18372>

10. Шумейко В.О., Мосійчук Д.І., Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування безпілотних засобів в інтересах національної безпеки та оборони країни. Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення. Колективна монографія за матеріалами XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-15 листопада 2023 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. – с. 102-104. SBN 978-617-7854-58-5.

[1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf](#)

11. Волинець Т.В., Марущак В.М. Визначення вектора параметрів руху космічних об'єктів у великобазовій багатопозиційній оптичній системі. Матеріали XXVIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку.

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/48475/1/>

12. Марущак В.М., Шумейко В.О., Приступа В.М. Аналіз фізичних моделей і гіпотез, покладених в основу процедури відновлення дійсних параметрів поверхні. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток // Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-16 листопада 2022 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2022. – 242 с. ISBN 978-617-7854-76-9

<https://itgip.org/kolektivna-monografiya-za-materialam/>

13. Триснюк В.М., Марущак В.М., Варавін Д.В., Конецька О.О. Регіональна безпека геосистем та її екологічна стійкість. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року. Колективна монографія за матеріалами XX Міжнародної науково-практичної конференції. (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2021.–с.97-100. ISBN 978-617-7854-58-5.

https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
1.1. Аналіз джерел зображувальних даних для моніторингу.....	29
1.1.1. Типи авіаційних та космічних знімків.....	29
1.1.2. Структура супутніх метаданих.....	35
1.2. Методи дешифрування зображень.....	37
1.2.1. Класичні підходи до дешифрування.....	37
1.2.2. Сучасні алгоритми на основі машинного навчання.....	39
1.2.3. Оцінка точності дешифрування.....	41
1.3. Класифікація об'єктів на зображеннях.....	45
1.3.1. Просторово-геометричні характеристики.....	45
1.3.2. Спектральні та теплові особливості.....	47
1.3.3. Тематичні категорії (військові, інфраструктурні тощо).....	49
1.4. Інформаційні технології формування звітної документації.....	51
1.4.1. Системи шаблонізації звітів.....	51
1.4.2. Механізми цифрової ідентифікації даних.....	54
1.4.3. Інтеграція ЗІД в інформаційні системи моніторингу.....	55
1.5. Висновки до розділу 1.....	56
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗІД НА ОСНОВІ ДЕШИФРУВАННЯ.....	59
2.1. Постановка задачі обробки зображень	59
2.2. Архітектура інформаційної системи.....	61
2.2.1. Структура модулів і потоків обробки.....	61
2.2.2. Взаємодія з базами знань та аналітикою.....	65

2.3. Формалізація структури ЗІД.....	67
2.3.1. Шаблонні поля та параметри звіту.....	67
2.3.2. Формальні вимоги до структури документа.....	68
2.4. Модель об'єднання багатознімкових даних.....	70
2.4.1. Просторове вирівнювання та агрегація.....	70
2.4.2. Узгодження об'єктних описів.....	72
2.5. Алгоритм AutoZID-Gen (базова версія).....	73
2.5.1. Псевдокод і логіка роботи.....	73
2.5.2. Структура виводу даних.....	77
2.6. Висновки до розділу 2.....	80
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДЕШИФРУВАННЯ.....	82
3.1. Основні принципи побудови математичних моделей у системах обробки зображень.....	82
3.1.1. Попередня фільтрація і нормалізація.....	82
3.1.2. Визначення ROI (областей інтересу).....	85
3.2. Математична модель дешифрування авіаційних та космічних зображень.....	89
3.2.1. Алгоритми сегментації.....	89
3.2.2. Класифікаційні CNN-моделі (YOLOv5, EfficientDet).....	94
3.3. Методи об'єктної ідентифікації та класифікації.....	97
3.3.1. Врахування похибок позиціонування.....	97
3.3.2. Прив'язка до координатної системи WGS-84.....	100
3.4. Оцінювання ефективності систем дешифрування.....	103
3.4.1. Інтегральний індекс довіри (IDC ⁺).....	103
3.4.2. Порогове рішення щодо включення до ЗІД.....	106
3.5. Інтеграція методики оцінки ризиків у процес дешифрування зображень.....	108

3.5.1. Обґрунтування необхідності ризик-аналізу.....	108
3.5.2. Математичні основи ризик-аналізу.....	109
3.5.3. Впровадження в AutoZID.....	110
3.6. Висновки до розділу 3.....	111
Розділ 4. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА AUTOZID: РОЗРОБКА І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	113
4.1. Загальна структура системи AutoZID.....	113
4.2. Програмна реалізація.....	115
4.2.1. Модулі обробки зображень.....	115
4.2.2. Інтерфейс генерації та перегляду ЗІД.....	119
4.3. Верифікація звітів засобами QR-кодування.....	120
4.3.1. Схема QR-ідентифікації.....	120
4.3.2. Алгоритм перевірки справжності документа.....	121
4.4. Результати експериментів.....	123
4.4.1. Метрики точності та швидкодії.....	123
4.4.2. Порівняння з ручним формуванням ЗІД.....	127
4.5. Висновки до розділу 4.....	130
ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	136
ДОДАТКИ.....	144
ДОДАТОК А (Акт про впровадження...).....	145
ДОДАТОК Б (Акт про реалізацію ...).....	146
ДОДАТОК В (Звітно-інформаційний документ).....	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГІС	– геоінформаційна система
ДЗЗ	– дистанційне зондування Землі
ЗІД	– звітно-інформаційний документ
СІТЗ	– система інтерпретації та дешифрування зображень
БПЛА	– безпілотний літальний апарат
БпАК	– безпілотний авіаційний комплекс
РХБ захист	– радіаційний, хімічний та біологічний захист
впс	– відділ прикордонної служби
AutoZID	– автоматизоване формування ЗІД
GPRS	– пакетна передача даних загального призначення
QGIS	– вільне програмне забезпечення з відкритим кодом
CNN	– штучна нейронна мережа
IDC ⁺	– інтегральний індекс довіри
ROI	– область інтересу
GCP	– опорні пункти місцевості,
API	– прикладний програмний інтерфейс
NIR	– ближній інфрачервоний діапазон
RGB	– кольорова модель «червоний-зелений-синій»
QR	– двовимірний матричний штрихкод
WGS-84	– всесвітня геодезична система
SAR	– радар із синтезованою апертурою
SWIR	– короткохвильовий інфрачервоний діапазон
YOLO	– модель глибинного навчання для детекції об’єктів
VIS	– видимий діапазон електромагнітного спектра

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, особливо в галузі дистанційного зондування Землі, спостерігається значне зростання обсягів зображувальної інформації, що надходить із авіаційних та космічних платформ. Ця інформація відіграє ключову роль у моніторингу стану територій, об'єктів критичної інфраструктури, природного середовища та надзвичайних ситуацій. Однак для того, щоб ефективно використовувати ці дані у процесах прийняття рішень, необхідне їх своєчасне дешифрування, аналіз та перетворення у структуровану звітну інформацію. Саме на цьому етапі виникає проблема — існуючі методи та підходи, як правило, не забезпечують ані належної швидкості, ані точності, необхідних для роботи в режимі реального часу або наближеного до нього.

Крім того, підвищення якості зображень, розширення спектрального діапазону та доступність безпілотних літальних апаратів створюють нові вимоги до автоматизації аналізу, оскільки обсяг вхідних даних дедалі зростає. Водночас, у рамках державних ініціатив з цифрової трансформації, посилюється потреба у створенні універсальних, адаптивних, масштабованих систем, які б забезпечували повний цикл — від прийому даних до формування звітної інформаційних документів, що містить геопросторово прив'язані, класифіковані та верифіковані об'єкти. При цьому критично важливою є не лише технічна реалізація, а й логічна модель побудови документа, система оцінки достовірності та наявності універсального шаблону для різних застосувань.

У контексті таких викликів, розробка та впровадження інформаційної технології формування ЗІД на основі результатів автоматизованого дешифрування авіаційних і космічних зображень є надзвичайно актуальним завданням. Запропоноване дослідження поєднує в собі методи машинного навчання, обробки зображень, шаблонного структурування документів і

цифрової верифікації, що дозволяє не лише підвищити оперативність обробки, але й забезпечити високу якість, масштабованість та адаптивність отриманих результатів у реальних умовах застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що питаннями використання інформаційних технологій для оперативного формування звітних документів на основі дешифрування авіаційних та космічних зображень активно займаються як українські, так і зарубіжні науковці. Особливу увагу зосереджено на підвищенні ефективності обробки дистанційних зображень для моніторингу об'єктів інфраструктури, природного середовища та техногенних змін. Вагомий внесок у розвиток підходів до оптимізації розподілу обмежених ресурсів і комплексного використання даних дистанційного зондування для моніторингу технічних, екологічних та військових об'єктів зробили як українські науковці (Трофимчук О. М., Триснюк В. М., Шумейко В. О., Архипова Л. М.), так і зарубіжні дослідники (Zadeh L. A., Bellman R. E., Taha H. A., Bastiaanssen W. G. M., Foody G. M.). Водночас проблема швидкого автоматизованого розподілу засобів моніторингу та високоточне дешифрування аерокосмічних знімків вимагає додаткових досліджень з урахуванням нових вимог до точності та оперативності обробки зображень.

Додатково важливі теоретичні та прикладні аспекти обробки зображень висвітлюються в публікаціях у фахових виданнях, зокрема «Системи обробки інформації», «Космічна наука і технологія», «Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони».

Удосконалення інформаційних технологій формування звітності має ґрунтуватися на використанні сучасних алгоритмів обробки зображень. Важливим є створення адаптивних шаблонів звітів, що формуються в режимі реального часу на основі просторових даних. Особливої актуальності ці рішення набувають у ситуаціях, що динамічно змінюються — під час надзвичайних подій або екологічних криз.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка інформаційної технології автоматизованого формування звітно-інформаційних документів на основі дешифрування авіаційних та космічних знімків.

- розробити структурну модель автоматизованого формування звітно-інформаційних документів з багатознімковим аналізом, семантичною класифікацією та оцінкою достовірності даних;

- запропонувати алгоритми злиття просторової інформації, що забезпечують підвищену точність і узгодженість результатів у мультизнімковому середовищі;

- побудувати псевдокод та шаблон системи AutoZID для модульного наповнення документів у стандартизованих форматах;

- удосконалити методи виявлення техногенних змін шляхом інтеграції лабораторно-польових вимірювань із супутниковими даними;

- оптимізувати інформаційно-аналітичні моделі оцінки антропогенного впливу для підвищення точності прогнозування екологічних змін у локальних зонах моніторингу.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого формування звітної документації на основі зображень, отриманих із систем дистанційного зондування.

Предметом дослідження є інформаційні моделі, алгоритми та програмні засоби формування ЗІД за результатами дешифрування авіаційних і космічних зображень.

Методи досліджень. У роботі використано методи математичного моделювання, алгоритмічного аналізу, теорії розпізнавання образів, методи штучного інтелекту (зокрема CNN), статистичної обробки результатів, а також методи експериментального дослідження інформаційних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт на базі Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору

Національної академії наук України та реалізовані у тематиках: «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоекосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216), «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження нестационарних процесів.» (№ РК 0116U000793 державної реєстрації) «Розробка інформаційної технології моделювання і прогнозування розвитку соціально-еколого-економічних систем в умовах невизначеності, нестационарності та ризику» (№ ДР 0121U100132).

«Розробка та аналіз засобів теоретико-ігрового моделювання стратегій збалансованого технологічного розвитку територій» (№ РК 0116U000796 державної реєстрації). Отримані наукові результати інтегровані в тематику прикладних досліджень, спрямованих на розробку інформаційних технологій аналізу, дешифрування та семантичної інтерпретації даних дистанційного зондування Землі з метою формування надійної звітної документації для систем моніторингу. Основні положення дослідження узгоджуються з завданнями програми розвитку спеціальності 122 – Комп'ютерні науки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше розроблено структурну модель автоматизованого формування ЗІД на основі багатознімкового аналізу, яка включає семантичну класифікацію об'єктів, оцінку достовірності сформованих даних та модуль генерації документів у стандартизованих форматах;

– вперше запропоновано нові алгоритми злиття просторової інформації, що забезпечують підвищену точність і узгодженість результатів аналізу в мультизнімковому середовищі;

– вперше розроблено псевдокод функціонування системи AutoZID та формалізовано шаблон структури ЗІД для подальшого автоматизованого наповнення за допомогою модульного підходу;

- розроблено науково-методичні засади предметно-орієнтованої оцінки об'єктів моніторингу на основі даних авіаційного та космічного дистанційного зондування із застосуванням геоінформаційних систем та алгоритмів автоматизованого дешифрування;

- удосконалено методи та моделі виявлення техногенних змін середовища шляхом використання гібридного дешифрування, яке інтегрує лабораторно-польові вимірювання із супутниковими даними в єдиному інформаційному середовищі формування ЗІД;

- подальшого розвитку набули інформаційно-аналітичні моделі оцінки антропогенного впливу в межах локальних зон моніторингу шляхом інтеграції наземних спостережень з даними дистанційного зондування, що сприяє підвищенню точності прогнозування змін екологічного стану територій.

Практична значимість роботи підтверджується наявністю актів впровадження розробленої інформаційної технології AutoZID у військових структурах. Результати роботи впроваджені у діяльність підрозділів моніторингу державного кордону у відділах прикордонної служби Чернівецького, Житомирського прикордонних загонів, бойових підрозділах Державної прикордонної служби України, а також використовуються підрозділами військ РХБ захисту Збройних Сил України. На основі розробок реалізовано функціональні елементи програмного забезпечення для аналізу зображень з БПЛА, зокрема модулі автоматичного виявлення та розпізнавання об'єктів, оцінки ризиків і формування звітно-інформаційних документів щодо змін обстановки (див. Додаток А).

Розроблена методика інтеграції БПЛА з підрозділами РХБ захисту для здійснення моніторингу, оперативного реагування та автоматизованого формування звітно-інформаційних документів реалізована у вигляді інтегрованої інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень. Використання даної системи дозволило суттєво скоротити час обробки вхідної інформації,

підвищити точність моніторингу та забезпечити своєчасне реагування на загрози у динамічному прикордонному середовищі, зокрема в умовах потенційного РХБ забруднення. Впровадження здійснювалося безпосередньо у польових умовах на ділянках відповідальності, що підтвердило її ефективність при виявленні об'єктів інтересу та фіксації динаміки змін. (див. Додаток Б).

Особистий внесок здобувача полягає в комплексному опрацюванні теоретичних засад, розробленні математичної моделі процесу дешифрування авіаційних та космічних зображень, а також створенні інформаційної технології AutoZID для автоматизованого формування звітно-інформаційних документів. Проведено системний аналіз сучасних алгоритмів обробки зображень, адаптовано та вдосконалено методи сегментації, класифікації об'єктів та геопросторової прив'язки результатів.

Здобувачем реалізовано оригінальний алгоритм IDC⁺, а також запропоновано структуру шаблонів ЗІД для оперативного використання у військових та цивільних системах моніторингу. Здійснено програмну реалізацію модулів системи AutoZID, проведено апробацію результатів у реальних умовах та отримано акти впровадження. Матеріали дослідження відображено в наукових публікаціях здобувача.

Апробація матеріалів дисертації. Одержані результати наукового дослідження були представлені та обговорені на таких міжнародних та всеукраїнських наукових заходах: XVIII, XXIII Міжнародна науково-практична конференція Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (м. Київ, Україна, 2024); IX Міжнародний з'їзд екологів та II Міжнародний науково-практичний семінар з декарбонізації, постмайнінгу та енергоефективності інфраструктури України (м. Вінниця, Україна, 2024); XXVIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку» (м. Лімасол, Кіпр, 2023).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 13 наукових робіт. З них 4 – у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у наукометричній базі «SCOPUS», 7 статей в міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 61 найменування, 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 150 сторінок, з них 135 – основного тексту; 28 – ілюстрацій, 8 – таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В розділі розглянуто сучасні підходи до моніторингу з використанням технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема методи швидкої обробки та інтерпретації зображувальних даних, що надходять з авіаційних і космічних платформ. Проаналізовано недоліки традиційних способів дешифрування, які залишаються малоефективними через фрагментованість, низький рівень інтеграції та відсутність автоматизації. Запропоновано використання штучного інтелекту для автоматичного виявлення та класифікації об'єктів, формування уніфікованих звітів і проведення моніторингу у режимі реального часу, що підвищує точність прогнозування та скорочує час обробки. Окремо розглянуто джерела зображувальної інформації, алгоритмічні засоби та методи підготовки звітно-інформаційних документів, а також правові аспекти застосування безпілотних авіаційних комплексів в Україні відповідно до чинних нормативних актів.

1.1. Аналіз джерел зображувальних даних для моніторингу

1.1.1. Типи авіаційних та космічних знімків.

Актуальні завдання моніторингу з використанням ДЗЗ вимагають швидкої, достовірної та структурованої інтерпретації зображувальних даних. Обсяги даних, що надходять із авіаційних і космічних платформ, постійно зростають, ускладнюючи ручну обробку та формування звітної документації. Наявні підходи до дешифрування зображень часто фрагментовані, не інтегровані в автоматизовані інформаційні системи та не відповідають вимогам оперативності. Особливої важливості набуває побудова інтелектуальних методів автоматичного виділення об'єктів, класифікації та заповнення уніфікованих звітів [1, 5].

Детальний аналіз таких підходів свідчить, що сучасні аерокосмічні технології є інструментом для отримання високоточних даних про стан навколишнього середовища, природно-технічних комплексів та об'єктів інфраструктури. ДЗЗ дозволяє оперативно отримувати зображення поверхні досліджуваної території на різних просторових і спектральних рівнях, що сприяє більш детальному аналізу екологічних процесів, моніторингу територій та оцінці наслідків антропогенної діяльності [24, 25, 31].

Розробка та впровадження інформаційних систем дешифрування з використанням технологій штучного інтелекту створює умови для автоматизації виявлення, класифікації та моніторингу об'єктів у режимі реального часу. Такий підхід дозволяє підвищити точність прогнозування, швидкодію обробки та мінімізувати вплив людського фактора. У результаті забезпечується можливість своєчасного прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сферах національної безпеки, екологічного управління та планування розвитку територій. Наукове дослідження орієнтоване на комплексний аналіз джерел вхідних даних, методів обробки, а також інформаційних технологій, що забезпечують генерацію ЗІД. Важливим аспектом є забезпечення точності, адаптивності та масштабованості створеної системи в умовах реального використання.

Використання БпАК в Україні регламентується комплексом нормативно-правових актів, що визначають порядок виконання польотів, технічної експлуатації та координації із органами управління повітряним рухом. Ключовими документами є Повітряний кодекс України, Авіаційні правила України, Положення про використання повітряного простору України, а також відомчі накази Міністерства оборони щодо правил польотів та технічної експлуатації БпАК державної авіації. Окреме місце займає Тимчасовий порядок використання повітряного простору України від 31.05.2018, який запроваджує процедури узгодження польотів у період підвищених ризиків або особливих

умов. Його положення спрямовані на забезпечення безпеки польотів, оптимізацію взаємодії військових і цивільних користувачів та мінімізацію конфліктів у повітряному просторі [51, 53].

Таким чином, у цьому розділі розглядаються наявні джерела зображувальної інформації, алгоритмічні засоби дешифрування, методи класифікації та способи формування звітної документації для визначення напрямків подальшого дослідження.

Моніторинг природного, техногенного та військового середовищ із використанням ДЗЗ спирається на різноманітні джерела зображувальної інформації, серед яких основне місце займають авіаційні та космічні знімки. Ці дані надходять із систем різної орбітальної висоти, спектрального охоплення та технічної реалізації (оптичні, радіолокаційні, інфрачервоні). Їх інтеграція в системи ситуаційного моніторингу дозволяє в режимі близькому до реального часу виявляти об'єкти, оцінювати динаміку змін та формувати управлінські рішення.

Авіаційні знімки традиційно використовуються у випадках, коли необхідна висока просторово-часова точність. Вони забезпечують деталізацію до 10–20 см., дозволяючи ідентифікувати дрібні об'єкти: техніку, елементи інфраструктури, інженерні споруди. Основні джерела таких знімків — це пілотовані літальні апарати або БпАК, які можуть здійснювати повторні обльоти з необхідною частотою. Водночас їх застосування обмежене зоною досяжності, метеоумовами та логістикою обслуговування.

Космічні знімки отримуються з орбітальних платформ і класифікуються за типами супутників: середньої (Sentinel-2, Landsat), високої (SPOT, Kanopus-V) та надвисокої (WorldView-3, Pleiades) роздільної здатності. Вибір системи базується на балансі між доступністю, роздільністю, частотою оновлення та спектральним діапазоном. Зокрема, Sentinel-2, попри 10-метрову роздільність, має широкий

спектр каналів та вільний доступ, що робить його корисним для тематичних задач великого масштабу [38, 43].

У таблиці 1.1 наведено порівняльні характеристики деяких популярних джерел зображувальних даних для задач моніторингу.

Таблиця 1.1 – Характеристики джерел зображувальних даних

Джерело	Просторова роздільність	Період повторення	Спектри	Тип доступу
Sentinel-2	10 м	5 днів	13 каналів (VIS–SWIR)	Вільний
WorldView-3	0.31 м	1–2 дні	16 каналів	Комерційний
Pleiades	0.5 м	1 день	4 канали (панхром+мульти)	Комерційний
БпАК (авіація)	0.05–0.25 м	За запитом	RGB, NIR, тепловізія	Тактичний доступ

Окрім самих зображень, важливим компонентом є супутні метадані — параметри зйомки, орієнтація платформи, висота, спектральна характеристика сенсорів, час, координати тощо. Ці дані відіграють вирішальну роль при геоприв'язці, калібруванні та оцінці якості дешифрування. Залежно від типу платформи, структура метаданих може бути стандартизованою (STAC, GeoTIFF з GeoJSON) або специфічною для постачальника. Для ефективного використання метаданих у автоматизованих системах їх потрібно нормалізувати та агрегувати у формалізовану структуру як показано на рисунку 1.1.

Таким чином, джерела зображувальних даних для задач моніторингу характеризуються різноманіттям параметрів, що визначають придатність до конкретного виду аналізу. Вибір оптимального джерела залежить від задачі, необхідної роздільної здатності, частоти оновлення, доступності та специфіки використання. Наступні підрозділи присвячено деталізації типів знімків, а також розгляду структури супутніх метаданих.

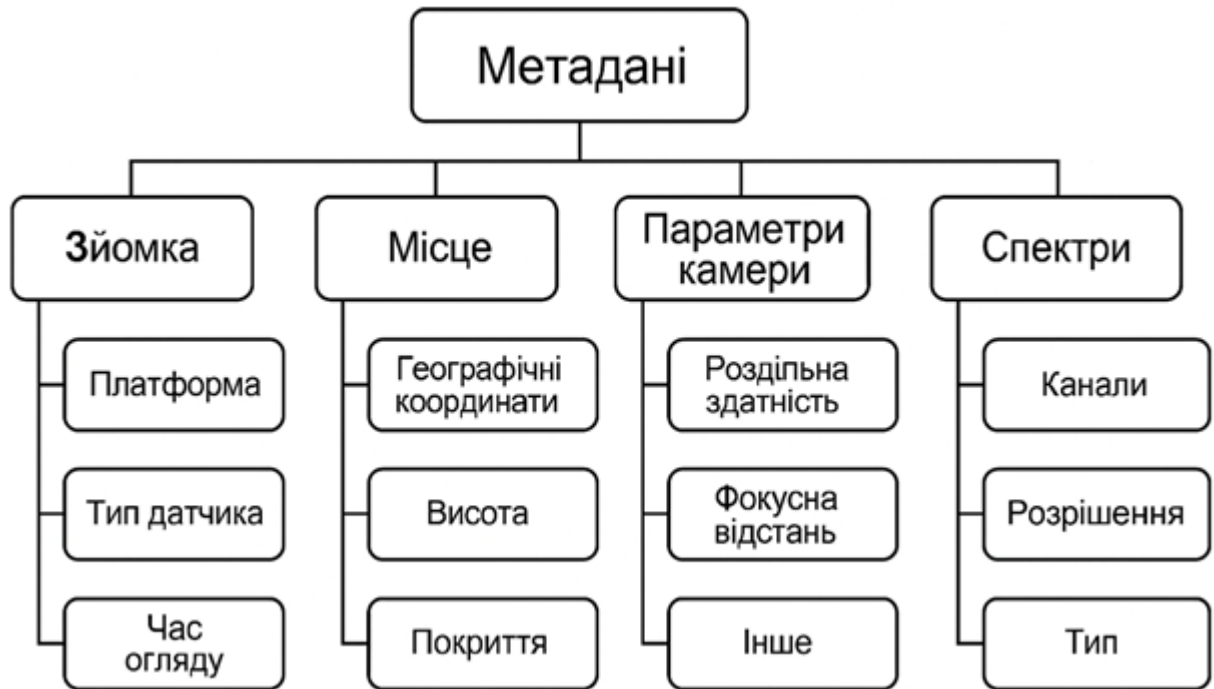


Рисунок 1.1 – Структура метаданих для авіаційного та супутникового зображення

Авіаційні та космічні знімки класифікуються за кількома ключовими ознаками, зокрема за висотою отримання, спектральним діапазоном, типом сенсора та призначенням. Кожен із типів має свої переваги й обмеження щодо деталізації, регулярності зйомки, покриття та спектральної інформації.

Авіаційні знімки, що надходять із пілотованих літаків або БПАК, характеризуються високою просторовою роздільністю (до 5 см), можливістю локальної зйомки та оперативного повторного обльоту. Вони ефективні для детального аналізу об'єктів на обмежених територіях, зокрема при моніторингу змін інфраструктури, техніки, природних процесів на локальному рівні.

Космічні знімки поділяються на панхроматичні (Panchromatic), мультиспектральні (Multispectral), гіперспектральні (Hyperspectral) та радарні (SAR — Synthetic Aperture Radar). Панхроматичні забезпечують високу деталізацію (0.3–1 м), однак передають інформацію лише в одному

спектральному каналі. Мультиспектральні зображення охоплюють кілька діапазонів (червоний, зелений, синій, ближній ІЧ), що дозволяє здійснювати тематичне дешифрування. Гіперспектральні знімки охоплюють сотні вузьких спектральних каналів і дають змогу виявляти матеріальні особливості поверхні. Радарні зображення працюють у мікрохвильовому діапазоні й дозволяють отримувати дані незалежно від погодних умов чи часу доби [3, 37].

Типи знімків також поділяються за масштабом використання:

- оперативні — знімки БпАК або супутників із високою частотою оновлення (1–2 доби);
- детальні — знімки з високою роздільністю (до 0.3 м), орієнтовані на точковий аналіз об’єктів;
- стратегічні — середньої роздільності, але з великим покриттям території (10–30 м).

Таблиця 1.2 – Типи зображень і їх основні характеристики

Тип зображення	Джерело	Просторова роздільність	Спектральний діапазон	Застосування
Панхроматичне	Супутник	0.3–1 м	1 канал (широкий)	Візуалізація, картографія
Мультиспектральне	Супутник, БпАК	0.5–10 м	4–16 каналів	Рослинність, вологість, класифікація
Гіперспектральне	Супутник, лабораторія	5–30 м	100+ каналів	Ідентифікація матеріалів
SAR (радарне)	Супутник	1–25 м	X, C, L-діапазони	Поверхня, зміщення, погода-незалежно
RGB	БпАК	0.05–0.3 м	3 канали	Візуальне дешифрування
Теплове (TIR)	БпАК, супутник	0.3–100 м	Інфрачервоне	Температурні аномалії

Тому, правильний вибір типу зображення ґрунтується на поставленому завданні, необхідному масштабі, погодних умовах та технічних обмеженнях. У системі AutoZID для кожного типу зображення формуються відповідні вхідні метаблоки, що враховуються при автоматичному формуванні звітної інформації.

Крім того, алгоритми попередньої обробки адаптуються до спектральних, просторових і радіометричних характеристик конкретного знімка. Це забезпечує підвищення точності розпізнавання та зменшення кількості хибно позитивних результатів. Система автоматично коригує параметри обробки залежно від джерела зображення — супутникового, аерознімка або з БпАК — що дозволяє зберігати стабільну якість результатів в умовах змінного операційного середовища.

1.1.2. Структура супутніх метаданих

Метадані супроводжують кожне зображення, надаючи важливу інформацію для подальшої обробки, дешифрування та прив'язки результатів до геопросторової системи координат. Метадані — це структурований опис параметрів зйомки, які дозволяють автоматизувати процеси попередньої обробки зображень та прийняття рішень на їх основі.

Основні категорії супутніх метаданих включають:

- геопросторові (координати центра кадру, висота над рівнем моря, система координат);
- орієнтаційні (кут нахилу сенсора, азимут, час зйомки);
- технічні (тип сенсора, роздільність, частота оновлення, канал зйомки);
- атмосферні (хмарність, вологість, наявність шумів);
- атмосферні (хмарність, вологість, наявність шумів);
- адміністративні (ідентифікатор місії, номер сцени, джерело даних).

Для забезпечення уніфікованої обробки, метадані кодуються у форматах XML, JSON або GeoTIFF, що дозволяє автоматично зчитувати їх в

обчислювальних модулях системи AutoZID. Використання стандартизованих форматів забезпечує сумісність із геоінформаційними системами та платформами аналізу зображень, спрощуючи інтеграцію з іншими джерелами даних. Стандартною структурою блоку метаданих є модель, показана на рисунку 1.2, яка відображає логічну організацію інформаційних полів, їх взаємозв'язки та формат подання даних.



Рисунок 1.2 — Структура основних метаданих супутникового (авіаційного) зображення

Формалізована метамодель має вигляд:

$$M = \{G, O, T, S, A\}, \quad (1.1)$$

де:

G — географічні параметри (latitude, longitude, altitude);

O — орієнтаційні характеристики (azimuth, pitch, roll);

T — технічні дані сенсора (resolution, focalLength, bandInfo);

S — спектральна сигнатура кадру (канали, спектри);

А — атмосферні умови зйомки (cloud Cover, illumination).

Метадані не лише забезпечують автоматичну прив'язку зображень до координатної системи (WGS-84), але й дозволяють здійснювати фільтрацію за якісними показниками. Це особливо важливо при формуванні ЗІД, де необхідна лише достовірна та актуальна інформація. У системі AutoZID передбачено механізм перевірки цілісності та валідності метаданих перед завантаженням зображення в обробку [14].

Таким чином, супутні метадані є критичним елементом інфраструктури автоматизованої системи дешифрування та моніторингу, забезпечуючи якість та достовірність формованих звітно-інформаційних документів.

1.2. Методи дешифрування зображень

1.2.1. Класичні підходи до дешифрування

Класичні методи дешифрування формували основу розвитку ДЗЗ протягом тривалого часу. Основою таких підходів є аналітичне візуальне спостереження, використання інтерпретаційних таблиць ознак та морфологічна оцінка об'єктів. Рішення про ідентифікацію об'єктів приймається фахівцем на основі набору візуальних критеріїв, таких як контур, розмір, форма, текстура, орієнтація та положення відносно інших об'єктів. Такий підхід вимагає високої кваліфікації оператора та значних затрат часу, що обмежує його ефективність при обробці великих масивів зображень. Крім того, суб'єктивність оцінки може призводити до варіативності результатів, що ускладнює стандартизацію та автоматизацію процесу дешифрування. Попри свою надійність у конкретних випадках, класичні методи дедалі більше поступаються сучасним автоматизованим підходам, особливо в умовах високої динаміки та великого обсягу даних [2].

Серед найбільш вживаних класичних методів є:

- спектральний аналіз зображення за допомогою багатоканального розкладу;
- обробка гістограм яскравості;
- застосування морфологічних фільтрів (ерозія, дилатація);
- контурне виявлення (оператори Собеля, Прюїта, Кенні).

Алгоритм дешифрування класичного типу передбачає наступні етапи:

1. Попереднє перетворення зображення до стандартного формату;
2. Побудова гістограм яскравості;
3. Виділення значущих об'єктів за допомогою морфологічних операцій;
4. Контурний аналіз і фільтрація шумів;
5. Порівняння знайдених об'єктів із еталонними характеристиками;
6. Формування результатів дешифрування.

Ключовим недоліком класичних методів є висока суб'єктивність та залежність від досвіду оператора. Крім того, такі методи не дозволяють ефективно працювати з великими масивами даних у реальному часі.

Сучасні методи дешифрування зображень є ключовими компонентами у системах моніторингу, забезпечуючи автоматичне виявлення, розпізнавання та класифікацію об'єктів на основі авіаційних та супутникових знімків. Методи поділяються на класичні (традиційні) та інтелектуальні (на основі машинного навчання). Особливу увагу приділено математичній моделі дешифрування та автоматизації аналізу міської інфраструктури, яка забезпечує ефективну інтеграцію методів класифікації об'єктів у комплексні системи моніторингу. Ключовим аспектом цього процесу є використання прямих і непрямих дешифрувальних ознак, що дозволяють підвищити точність ідентифікації об'єктів, розмежовуючи їх за формою, деталями, просторовим розташуванням і контекстними характеристиками місцевості. Запропонована математична модель автоматизації дешифрування аерофотознімків базується на інтеграції сучасних алгоритмів комп'ютерного зору та технологій штучного інтелекту, що дозволяє

значно підвищити ефективність розпізнавання об'єктів міської інфраструктури. Поєднання математичної моделі з автоматизованим аналізом ознак забезпечує високу достовірність класифікації та підвищує ефективність роботи комплексних систем моніторингу, що є критично важливим для своєчасного виявлення змін та оперативного прийняття управлінських рішень [9, 28, 35].

Класичні методи передбачають використання алгоритмів фільтрації, порогової сегментації, аналізу текстур та геометричних ознак для виокремлення об'єктів. Інтелектуальні підходи, зокрема CNN, дозволяють здійснювати глибоку семантичну сегментацію та розпізнавання з високим рівнем точності. У системі AutoZID поєднано переваги обох підходів, що забезпечує адаптивність до умов зйомки та високий рівень автоматизації процесу дешифрування.

1.2.2. Сучасні алгоритми на основі машинного навчання

Інтелектуальні методи автоматичного дешифрування зображень, що базуються на глибокому навчанні, дозволяють досягти високої точності класифікації зображень без ручного втручання. Основу складають CNN, які здійснюють автоматичне виділення ознак зображень на основі великого обсягу навчальних даних. Завдяки багаторівневій структурі, CNN здатні виявляти як прості, так і складні патерни візуальної інформації, що значно підвищує ефективність розпізнавання об'єктів навіть у складних умовах зйомки. Використання попередньо натренованих моделей із подальшим донавчанням на специфічних наборах даних дає змогу адаптувати алгоритми до унікальних задач і підвищити їхню продуктивність у вузькопрофільних сценаріях

Популярними моделями [34, 46, 57, 60], що демонструють високу продуктивність, є:

- YOLO (You Only Look Once) – уніфікований підхід, який виконує детекцію і класифікацію в одній мережі;
- EfficientDet – оптимізована архітектура для досягнення балансу між точністю та швидкістю;
- RetinaNet – ефективний для об’єктів невеликого розміру.

Процес автоматичного дешифрування охоплює:

1. Попередню підготовку навчального датасету з мітками об’єктів;
2. Навчання нейронної мережі з оптимізацією втрат:

$$L = \lambda_1 \times l_{cls} + \lambda_2 \times l_{loc}, \quad (1.2)$$

де:

l_{cls} — функція втрат класифікації;

l_{loc} — локалізаційна похибка;

3. Застосування моделі до нових зображень із виводом координат і класів об’єктів;
4. Формування аналітичного звіту за результатами.

Інтеграція CNN у систему AutoZID дозволяє автоматично обробляти великі обсяги авіаційних і супутникових знімків з мінімальним залученням оператора, суттєво скорочуючи час отримання ЗІД.

Найбільш важливою перевагою сучасних моделей є здатність навчатися з розмічених даних, що дає змогу самостійно формувати релевантні ознаки без необхідності ручного їх задання. Це забезпечує адаптивність до нових типів об’єктів, що особливо важливо при зміні типу місцевості, умов зйомки або нових задач моніторингу. Глибокі нейронні мережі мають здатність виявляти структурні та семантичні особливості об’єктів навіть за умов низької якості зображення або наявності шуму. Для знімків, отриманих з БпАК, характерні спотворення, викликані динамікою руху платформи, коливанням висоти,

обмеженим розширенням або атмосферними завадами. У таких умовах традиційні методи демонструють низьку точність, тоді як сучасні CNN-моделі здатні автоматично компенсувати частину спотворень за рахунок глибокого контекстного аналізу. Застосування таких підходів дозволяє отримати достовірні результати навіть у складних природно-кліматичних умовах, що є критично важливим для оперативного формування звітної документації.

Таким чином, використання інтелектуальних алгоритмів значно підвищує надійність та швидкодію процесу дешифрування [36].

1.2.3. Оцінка точності дешифрування

Якість роботи алгоритмів дешифрування критично залежить від точності, з якою система здатна ідентифікувати об'єкти на зображенні. Для оцінки ефективності використовуються класичні метрики класифікації: точність - P (Precision), повнота - R (Recall), $F1$ -міра, а також коефіцієнт достовірності. Ці метрики дозволяють кількісно оцінити рівень правильного розпізнавання цільових об'єктів у порівнянні з еталонною розміткою.

Формально, точність визначається як:

$$P = TP / (TP + FP), \quad (1.3)$$

де:

TP — кількість правильно класифікованих об'єктів;

FP — кількість помилкових позитивних відповідей.

Повнота визначається як:

$$R = TP / (TP + FN), \quad (1.4)$$

де:

FN — кількість пропущених (невизначених) об'єктів.

$F1$ -міра, що дозволяє збалансувати значення точності та повноти:

$$F1 = 2 \times (P \times R) / (P + R), \quad (1.5)$$

$F1$ -міра є особливо важливою у випадках, коли необхідно знайти оптимальний баланс між точністю та повнотою. Якщо одна з цих метрик значно нижча за іншу, $F1$ -міра також буде низькою, що сигналізує про необхідність вдосконалення моделі. Цей показник є чутливим до дисбалансу класів і особливо корисний при аналізі даних з високою частотою хибних спрацьовувань або пропущених об'єктів ($P + R$).

Інтегральна метрика оцінки результатів дешифрування у цій роботі запропонована у вигляді функції IDR (індекс достовірного розпізнавання):

$$IDR = \alpha \times F1 + \beta \times C, \quad (1.6)$$

де:

C — коефіцієнт геопросторової коректності (від 0 до 1), $\alpha + \beta = 1$.

Для візуального аналізу ефективності застосовується графік ROC-кривої - крива робочих характеристик приймача, зображений на рисунку 1.3, який ілюструє залежність між рівнем хибнопозитивних та істиннопозитивних визначень.

ROC-крива дозволяє оцінити якість класифікатора незалежно від порогового значення, що особливо важливо при порівнянні різних моделей розпізнавання об'єктів.

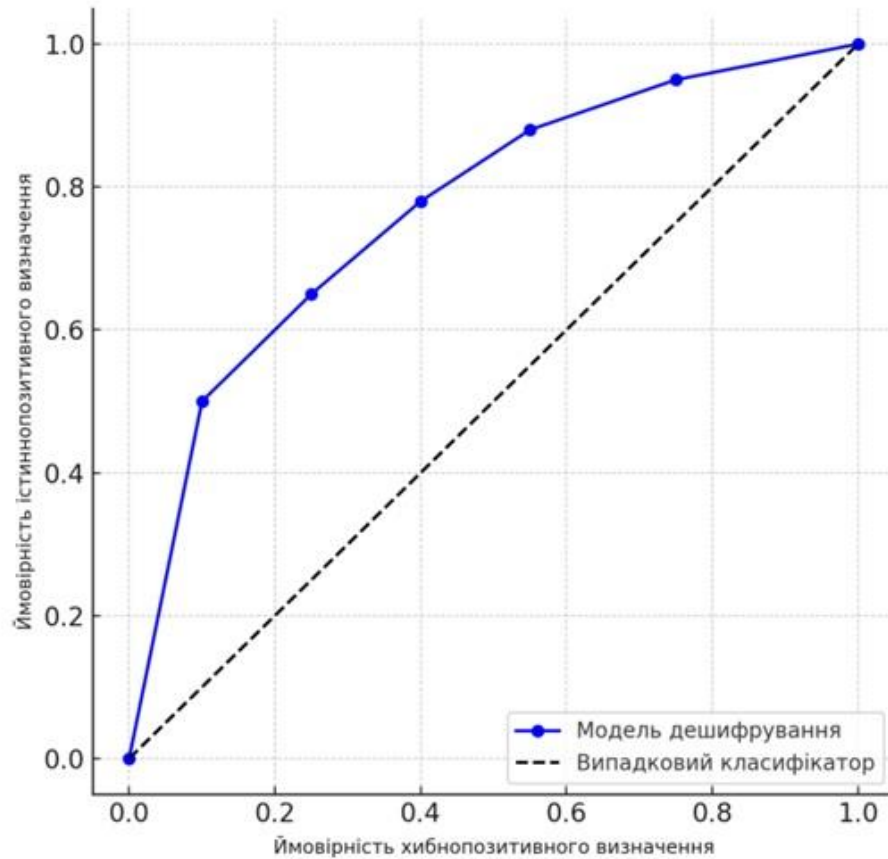


Рисунок 1.3 – ROC-крива ефективності класифікаторів при дешифруванні зображень.

Для узагальненого зіставлення результатів було створено порівняльну таблицю, що дозволяє оцінити не лише класичні метрики (Precision, Recall, F1-міра), але й інтегральний показник IDR. Такий підхід забезпечує комплексне представлення ефективності методів дешифрування, зокрема в контексті складних сценаріїв аерокосмічного моніторингу. Зіставлення моделей у форматі таблиці сприяє кращому розумінню переваг глибокого навчання над традиційними алгоритмами у задачах аналізу зображень. Крім того, така таблиця є зручною основою для прийняття рішень щодо вибору оптимального методу в конкретних умовах застосування системи AutoZID.

Таблиця 1.3 – Порівняння точності моделей на тестовому наборі зображень.

Модель	Precision	Recall	F1-міра	IDR
YOLOv5	0.89	0.84	0.86	0.87
EfficientDet	0.91	0.81	0.86	0.88
RetinaNet	0.85	0.79	0.82	0.83
Класичний метод	0.65	0.58	0.61	0.60

Отримані результати демонструють перевагу глибоких нейронних моделей над класичними методами, особливо у випадках складної топографії або низької якості зображень. Запропонований індекс IDR дозволяє узагальнено оцінити ефективність систем автоматизованого дешифрування в умовах неповноти або зашумленості даних.

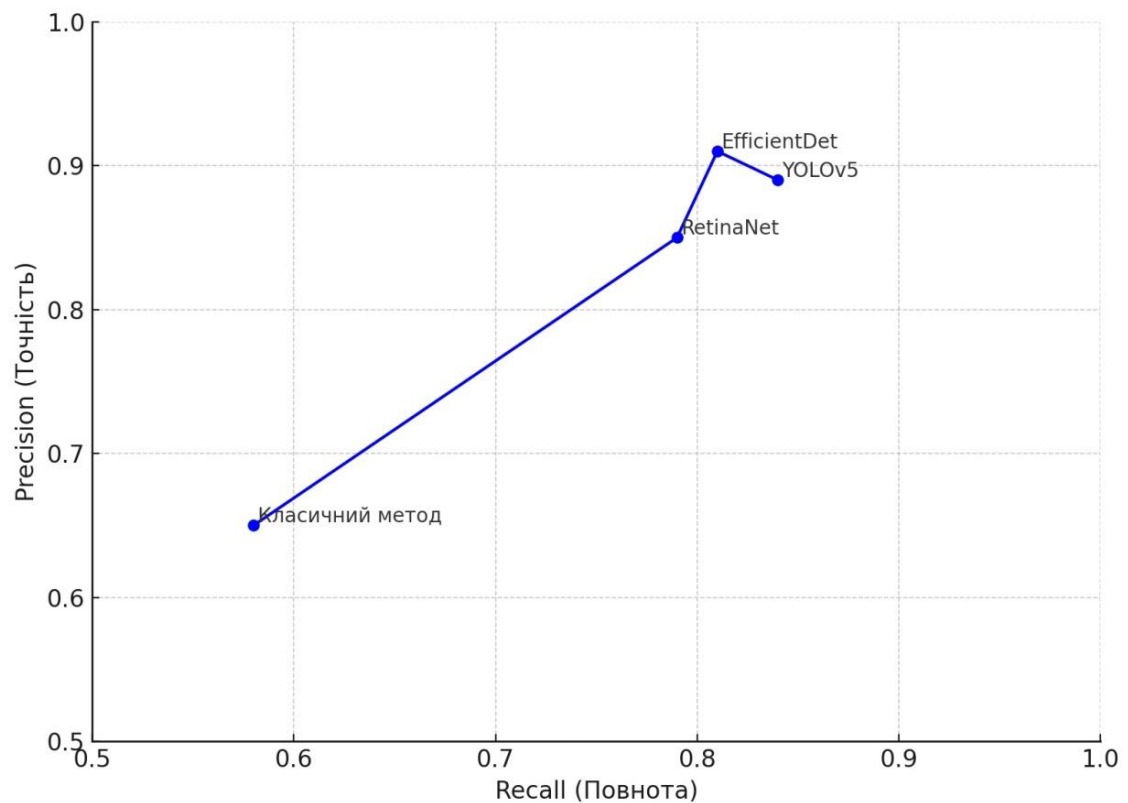


Рисунок 1.4 – Крива ефективності дешифрування

Графік, що зображений на рисунку 1.4 демонструє криву ефективності дешифрування на основі показників точності та повноти для чотирьох моделей:

1. EfficientDet має найвищу точність при дещо нижчій повноті, що свідчить про менше число хибнопозитивних визначень.
2. YOLOv5 демонструє збалансоване співвідношення точності й повноти.
3. RetinaNet поступається двом попереднім, але випереджає класичні підходи.
4. Класичний метод відзначається найнижчими значеннями обох метрик.

Ця крива дозволяє візуально оцінити ефективність розпізнавання та допомагає обрати оптимальну модель для використання в системі автоматизованого дешифрування аерокосмічних зображень.

Висновки щодо оцінки точності включають потребу адаптації моделей під специфіку авіаційних та космічних зображень, а також регулярне оновлення навчальних вибірок з урахуванням нових сценаріїв моніторингу.

1.3. Класифікація об'єктів на зображеннях

1.3.1. Просторово-геометричні характеристики

Просторово-геометричні характеристики — це набір параметрів, які описують форму, розмір, орієнтацію та положення об'єкта на зображенні. Вони дозволяють здійснювати початкову фільтрацію за типом цілі, виділяти об'єкти технічного призначення серед природного фону. Основними показниками є площа контуру, ексцентриситет, співвідношення сторін та площа обгортального прямокутника. Для уніфікації таких оцінок пропонується математична модель просторової ознаки:

$$G_i = \frac{A_i}{\gamma_i}, \quad (1.7)$$

де:

G_i — геометричний індекс об'єкта i ;

A_i — площа проєкції,

γ_i — коефіцієнт еліптичності.

У таблиці 1.4 представлено характерні значення геометричних параметрів для об'єктів автомобільної техніки, житлових масивів та природних елементів. Розрахунок та аналіз таких ознак дозволяє автоматично здійснювати попередню класифікацію цілей навіть до етапу спектрального аналізу.

Таблиця 1.4 – Просторово-геометричні ознаки типових об'єктів

Тип об'єкта	Довжина, м	Ширина, м	Ексцентриситет
Кущова рослинність	1–3	1–3	0.3–0.6
Дерева (лісистість)	3–7	3–7	0.4–0.7
Автомобільна техніка	4–8	2–3	0.8–0.95
Житлові будівлі	8–20	6–15	0.8–1.0
Великогабаритна авіаційна техніка	8–12	3–4	0.85–0.95
Складські конструкції	10–30	5–15	0.9–1.0
Лінійна інфраструктура	20–100+	1–5	0.95–1.0
Озера / Річки	10–500+	5–100+	0.3–0.8

Процес класифікації об'єктів на зображеннях є критичним етапом у всьому ланцюгу автоматизованого дешифрування. Його мета полягає в правильному розподілі виявлених ділянок за категоріями, які мають оперативну чи стратегічну цінність. У цьому контексті важливо враховувати як фізичні характеристики об'єктів, так і семантичні контексти їх присутності. Надійна класифікація забезпечує точність подальшої аналітичної обробки та формування звітно-інформаційних документів у системах типу AutoZID. Сучасні методи класифікації використовують як ручні ознаки, так і автоматично витягнуті дескриптори, що дозволяє досягти високої гнучкості у визначенні типів об'єктів. Особливо ефективними є підходи на основі глибоких нейронних мереж, які

враховують просторові, спектральні та контекстуальні особливості зображень [22, 42].

1.3.2. Спектральні та теплові особливості

Спектральні та теплові характеристики дають змогу класифікувати об'єкти за відмінностями у спектральному відгуку, що виявляється в різних каналах зображення — інфрачервоному, видимому, ультрафіолетовому тощо. Типова спектральна ознака розраховується за формулою:

$$S_{i,j} = \frac{R_{i,j}^{IR}}{R_{i,j}^{VIS}} + \theta_j, \quad (1.8)$$

де:

$S_{i,j}$ — спектральна інтенсивність об'єкта i в каналі j ;

$R_{i,j}^{VIS}$ та $R_{i,j}^{IR}$ — рівень відбиття в видимому та інфрачервоному діапазонах;

θ_j — поправка на атмосферні умови.

З метою підвищення надійності класифікації використовують індекс типу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1.9)$$

де:

NIR — відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні;

RED — відбиття в червоному каналі.

Цей індекс є показником фотосинтетичної активності рослинності та дозволяє диференціювати природні та техногенні об'єкти.

Теплові характеристики базуються на вимірюванні температурного випромінювання об'єкта, що часто корелює з його функціональним станом. Об'єкти, які працюють, часто мають вищу теплову сигнатуру. Тепловий градієнт G_{temp} можна виразити як:

$$G_{temp} = T_{max} - T_{min}, \quad (1.10)$$

де:

T_{max} — максимальна температура по межі об'єкта;

T_{min} — мінімальна температура по межі об'єкта.



Рисунок 1.5 – Типові спектральні профілі (умовне зображення)

На рисунку 1.5 показано типову форму спектрального профілю для трьох класів об'єктів. Використання комбінацій спектральних і теплових ознак

дозволяє формувати вектор класифікації для подальшої обробки в нейронних мережах або алгоритмах прийняття рішень на основі дерева ознак. Таке поєднання дає змогу підвищити стійкість класифікаційних моделей до впливу завад і зміни умов зйомки. Крім того, багатоканальний аналіз сприяє більш точному виявленню об'єктів зі схожими візуальними характеристиками, але різними фізичними властивостями.

1.3.3. Тематичні категорії (військові, інфраструктурні, тощо)

Тематична класифікація базується на віднесенні об'єкта до певної категорії за його функціональним призначенням. Основними типами є: об'єкти військової інфраструктури, транспортні засоби, енергетичні установки, об'єкти логістики, житлова та промислова забудова.

У процесі класифікації використовується вектор ознак

$$V = \{G, S, T, C\}, \quad (1.11)$$

де:

G — геометричні;

S — спектральні;

T — теплові параметри;

C — контекстні ознаки (збудова, дорога, парк).

Для кожного типу цілей встановлюється пороговий набір значень, що активує правило класифікації. Ці порогові значення формуються на основі статистичного аналізу навчальної вибірки, що включає параметри з попередніх спостережень. Як приклад, автомобільна техніка характеризується не лише геометричними ознаками, а й характерним спектральним підписом у ближньому ІЧ-діапазоні. Крім того, до формування порогових критеріїв включаються контекстні індикатори — приналежність до транспортної мережі чи близькість

до інших об'єктів інфраструктури. Для розпізнавання автомобільної техніки характерне поєднання витягнутої форми (еквівалент прямокутника), інфрачервоного теплового підпису та локалізації поблизу доріг. Таке комплексне врахування геометричних, спектральних і контекстуальних ознак суттєво підвищує достовірність ідентифікації об'єктів у реальних умовах зйомки [11, 24].

На рисунку 1.6 представлено алгоритм класифікації об'єктів на зображеннях у вигляді дерева рішень.

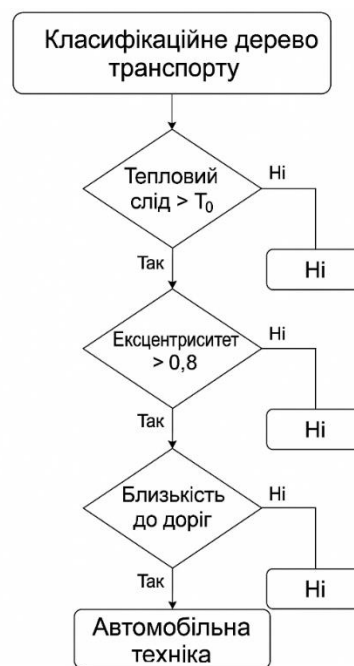


Рисунок 1.6 – Класифікаційне дерево

Побудоване дерево рішень передбачає послідовне оцінювання характеристик об'єкта на зображенні за трьома критеріями — тепловим, геометричним та просторово-контекстуальним.

Першою умовою виступає наявність теплового сліду, що перевищує заданий поріг $>T_0$, що вказує на функціональну активність або увімкнення техніки. За умови позитивної теплової відповіді перевіряється ексцентриситет об'єкта (> 0.8), який притаманний витягнутим формам, характерним для транспортних засобів.

Третій етап передбачає просторову локалізацію в межах інфраструктурного коридору, що підтверджує належність об'єкта до транспортної системи. За виконання всіх умов об'єкт класифікується як автомобільна техніка, що дозволяє автоматично формувати відповідний запис у звітно-інформаційному документі.

Такі правила реалізуються у системах типу AutoZID за допомогою алгоритмів прийняття рішень або попередньо навчених моделей. Тематичні категорії дозволяють сформувати семантичну модель місцевості, що суттєво підвищує інформативність ЗІД і полегшує ухвалення рішень користувачем в оперативному режимі.

1.4. Інформаційні технології формування звітної документації

1.4.1. Системи шаблонізації звітів

Шаблонізація звітів передбачає використання заздалегідь визначеної структури документа, яка дозволяє швидко формувати вихідні документи на основі даних, отриманих з модулів дешифрування. Такий підхід дозволяє досягнути стандартизації, масштабованості та спрощення адаптації до різних типів користувачів.

У таблиці 1.5 представлено основні формати звітних шаблонів, що включають: XML (Extensible Markup Language), JSON (JavaScript Object Notation), DOCX (Word-подібні звіти), PDF (фіксована структура), де кожен з форматів має свої переваги.

Таблиця 1.5 – Просторово-геометричні ознаки типових об'єктів

Формат	Гнучкість	Читаємість	Автоматизація	Підтримка в AutoZID
XML	Висока	Середня	Висока	Так
JSON	Висока	Висока	Висока	Так
DOCX	Середня	Висока	Середня	Частково
PDF	Низька	Висока	Низька	Для звітів-копій

У системі AutoZID реалізовано модуль шаблонного наповнення, який працює на основі семантичного розпізнавання структурованих даних, отриманих в результаті автоматизованого дешифрування зображень. Шаблон має формальну структуру, що включає змінні поля (теги), які автоматично заповнюються фактичною інформацією про виявлені об'єкти. Автоматизація формування звітної документації є важливою складовою сучасних інформаційних систем моніторингу, оскільки в контексті дешифрування авіаційних і космічних зображень вона дозволяє оперативно представити результати аналізу у структурованому вигляді. Ручне створення звітів є трудомістким та неефективним при роботі з великими обсягами даних, тому актуальним є використання шаблонізованих механізмів.

Застосування стандартизованих структур (XML, JSON, шаблонів у PDF/HTML) забезпечує уніфікацію форм подачі даних для різних відомчих систем, а засоби цифрової ідентифікації та автоматичної верифікації джерел даних підвищують достовірність результатів [6, 17]. У системах типу AutoZID звітність формується на основі визначеної структури документа, що генерується за результатами аналізу зображень та супутніх метаданих. Інтеграція таких механізмів у контур оперативного управління суттєво підвищує швидкість і обґрунтованість прийняття рішень.

На рисунку 1.7 наведено приклад використання такого шаблону: спеціальні поля (теги), як-от *{об'єкт}*, *{координати}*, *{тип}*, заповнюються відповідними даними з модуля аналізу. У разі виявлення автомобільної техніки у фінальному звіті автоматично буде сформовано фрази: «*Об'єкт – автомобільна техніка*», «*Координати – 48.4521 N, 30.1234 E*», «*Тип – машина*». Такий підхід забезпечує високу швидкість генерації звітів, уніфікованість оформлення та виключає потребу у ручному заповненні документів, що є критично важливим в умовах обробки великих обсягів отриманої інформації.

```

xml

<звіт>
  <об'єкт>Автомобільна техніка</об'єкт>
  <координати>48.4521 N, 30.1234 E</координати>
  <тип>Машина</тип>
</звіт>

```

Рисунок 1.7 – Приклад шаблонного наповнення

У системі AutoZID спочатку відбувається дешифрування зображення, під час якого автоматично виявляються об'єкти. Далі система визначає їх точне розташування, прив'язуючи координати до карти за допомогою GPS або GCP. Потім відбувається класифікація об'єктів — уточнюється, що саме знайдено (автомобільна техніка, інфраструктура, будівля) за формою, розміром і спектральними ознаками. Після цього всі дані автоматично підставляються у спеціальний шаблон звіту. У результаті формується структурований файл (в XML або PDF) форматі, який зберігається для подальшого аналізу.

У разі виявлення кількох об'єктів система формує окремі записи для кожного з них, включаючи координати, клас, IDC⁺ та зображення-фрагмент. Весь процес виконується автоматично, що суттєво скорочує час підготовки звіту порівняно з ручним аналізом. Ключовим є етап узгодження структури шаблону з користувачем (офіцером або аналітиком), після чого система самостійно підставляє відповідні значення.

Переваги шаблонізації:

1. Скорочення часу підготовки ЗІД;
2. Зниження людського фактору;
3. Уніфікація представлення для сумісності з СІТЗ, ГІС та командними платформами;
4. Можливість швидкого архівування та трансформації у звіт PDF.

1.4.2. Механізми цифрової ідентифікації даних

Цифрова ідентифікація даних у контексті автоматизованого формування звітної документації передбачає призначення унікальних ознак джерелам, об'єктам і метаданим зображень. Цей процес є критичним для верифікації достовірності, встановлення авторитетності джерел і забезпечення простежуваності дій.

Основними механізмами цифрової ідентифікації є:

- хешування (SHA256, MD5) для контролю цілісності зображень;
- присвоєння унікального ідентифікатора знімку (Image UID);
- геотегування та зв'язок з WGS-84 координатами;
- додавання цифрових підписів до елементів ЗІД;
- зв'язок з базами даних еталонних об'єктів.

На рівні системи AutoZID реалізовано модуль цифрової верифікації джерела зображення. Кожне зображення перед обробкою отримує цифровий відбиток, що записується в журнал обробки. При формуванні ЗІД цифрові коди джерел порівнюються з реєстрами метаданих і підтверджуються службовими підписами.

Ключова формула цифрової ідентифікації (CID):

$$CID = hash(I) \oplus UID \oplus GID, \quad (1.12)$$

де:

I – вхідне зображення;

UID – унікальний ідентифікатор зображення;

GID – глобальний ідентифікатор місцезнаходження (у WGS-84);

$hash(I)$ — геш-функція, що застосовується до зображення I для отримання хешу;

$\oplus$ – операція бітового з'єднання «виключне АБО».

Використання *CID* дозволяє забезпечити відповідність між джерелом зображення, його місцем та часом отримання, а також результатами дешифрування. Усі компоненти *CID* записуються в електронний журнал, а в разі сумнівів можуть бути перевірені незалежною службою верифікації. Впровадження *CID* спрощує процес трасування даних, дозволяючи оперативно відстежувати походження кожного знімка та підтверджувати його автентичність у разі проведення розслідувань чи експертних перевірок.

Інтеграція цифрової ідентифікації у AutoZID забезпечує об'єктивність звітів, підвищує рівень довіри до аналітичної інформації та створює основу для подальшого машинного аналізу архівів знімків.

1.4.3. Інтеграція ЗІД в інформаційні системи моніторингу

Інтеграція ЗІД у загальні системи моніторингу забезпечує цілісність аналітичного процесу та ефективність міжвідомчої взаємодії. У межах цифрового контуру управління, ЗІД мають бути доступні в реальному часі, структуровані відповідно до галузевих стандартів та сумісні з іншими інформаційними потоками (ГІС, СІТЗ, телеметричні дані).

Інформаційна система AutoZID реалізує модуль інтеграції за допомогою таких компонентів:

- адаптерів даних (Data Adapter), які трансформують внутрішні структури у зовнішні формати (JSON/XML);
- сервісів API-зв'язку з командними платформами (зокрема, для взаємодії з центральною платформою управління або системою єдиного моніторингу);
- механізму централізованого логування ЗІД;
- шаблонів, що синхронізуються з типами задач спостереження (виявлення, ідентифікація, оцінка змін).

Схематично процес інтеграції можна представити як багаторівневу архітектуру, в якій AutoZID виступає джерелом даних 2-го рівня, передаючи

згенеровані документи до розподіленого сховища (DataHub) або до вищого рівня ситуаційного центру (C4ISR).

Важливим елементом є зворотній зв'язок: користувач може оцінити звіт (оцінка достовірності, повноти), що фіксується в аналітичному модулі. Це дає змогу в майбутньому удосконалювати шаблони та підвищувати релевантність обробки.

У загальному вигляді, механізм інтеграції описується множиною функцій:

$$INT(Z) = \text{map}(F_i(Z), S), \quad (1.13)$$

де:

Z – набір зібраних даних;

F_i – множина функцій трансформації та валідації даних;

S – цільова система моніторингу.

$\text{map}(\dots)$ — операція зіставлення результатів трансформації до відповідного формату цільової системи.

Інтеграція ЗІД в інфраструктуру моніторингу дозволяє досягти ефективності, адаптивності та стандартизації в рамках єдиної аналітичної екосистеми.

1.5. Висновки до розділу 1.

1. Систематизовано теоретичні та прикладні аспекти обробки авіаційних і супутникових зображень, що є основою сучасних систем аерокосмічного моніторингу.

2. Проведено порівняльний аналіз джерел даних спостереження (БпАК-знімки, супутникові зображення різної роздільної здатності) та визначено особливості їх використання залежно від цілей оперативного чи стратегічного моніторингу.

3. Охарактеризовано основні типи зображень за спектральним, просторовим і часовим охопленням, а також визначено вимоги до супутніх метаданих (GPS, GCP, час зйомки, характеристики сенсорів), необхідних для достовірної геоприв'язки даних.

4. Розглянуто еволюцію методів дешифрування – від класичних до інтелектуальних методів на основі згорткових нейронних мереж і алгоритмів глибокого навчання. Показано переваги сучасних методів у задачах семантичної сегментації та класифікації об'єктів за складних умов.

5. Проаналізовано процеси автоматизованої класифікації об'єктів на зображеннях із використанням геометричних, спектральних та контекстуальних ознак. Визначено порогові критерії для ідентифікації типових об'єктів (автомобільна техніка, будівлі, інженерні споруди) у військових і цивільних сценаріях моніторингу.

6. Досліджено підходи до автоматизації формування ЗІД – від застосування шаблонів і стандартизованих форматів (XML, JSON, PDF, DOCX) до використання динамічних полів і механізмів цифрової верифікації результатів розпізнавання.

7. Запропоновано формалізовані моделі, зокрема:

- метамодель $M = \{G, O, T, S, A\}$, що описує компоненти дешифрованого об'єкта;

- функціональну схему $INT(Z) = map(F_i(Z), S)$ для узгодження вихідної інформації зі структурою цільової системи.

8. Визначено, що впровадження таких моделей забезпечує уніфікований підхід до зберігання, аналізу та передачі результатів обробки в автоматизованих системах типу AutoZID.

9. Сформульовано наукову проблему, яка потребує подальшого вирішення, – створення цілісного математичного та алгоритмічного забезпечення для автоматизованого формування звітно-інформаційних документів на основі

даних аерокосмічного моніторингу з урахуванням різноманітності вхідних зображень та необхідності уніфікації результатів дешифрування.

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЗІД НА ОСНОВІ ДЕШИФРУВАННЯ

Розділ присвячено аналізу концептуальних, технічних та прикладних аспектів на створення інформаційної моделі формування ЗІД з використанням технологій дешифрування, штучного інтелекту і шаблонізації документів. Основна увага приділяється побудові архітектури програмного комплексу AutoZID, який виконує автоматичну генерацію звітів, базуючись на вхідних знімках, семантичних базах знань і метаданих польоту.

Розробка моделі базується на принципах відкритості, масштабованості, адаптивності до різних джерел вхідної інформації. Запропоновано формалізовану структуру опису задачі, ієрархію функціональних модулів, а також алгоритм об'єднання багатознімкових джерел із узгодженням об'єктних описів. У межах роботи також оцінюється ефективність впровадження системи AutoZID у реальні умови функціонування підрозділів моніторингу.

2.1. Постановка задачі обробки зображень

У рамках розробки інформаційної системи формування ЗІД на основі авіаційних та космічних зображень необхідно формалізувати задачу обробки, дешифрування і представлення результатів у структурованому форматі. Система формування ЗІД має забезпечувати своєчасне виявлення, ідентифікацію та класифікацію об'єктів, представлених на авіаційних і космічних знімках

Основна мета — автоматизоване перетворення сирих зображувальних даних на семантично-значущу інформацію, придатну до оперативного прийняття рішень. Для цього передбачається інтеграція алгоритмів сегментації, класифікації та геоприв'язки з можливістю багатоканальної верифікації результатів.

Вхідними даними є:

- набір зображень $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$;
- набір метаданих $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$;
- семантична база знань (S) з ознаками об'єктів;
- шаблон структури (T) для ЗІД.

Задачу автоматизованого формування звіту можна подати у вигляді:

$$Z = F(I, M, S, T), \quad (2.1)$$

де:

Z — сформований звіт,

F — процес обробки, сегментації, класифікації об'єктів і заповнення шаблону.

Типова блок-схема постановки задачі наведена на рисунку 2.1, де підкреслено основні етапи аналізу: підготовка зображень, виділення ROI, розпізнавання об'єктів, оцінювання достовірності та формування структурованого ЗІД.

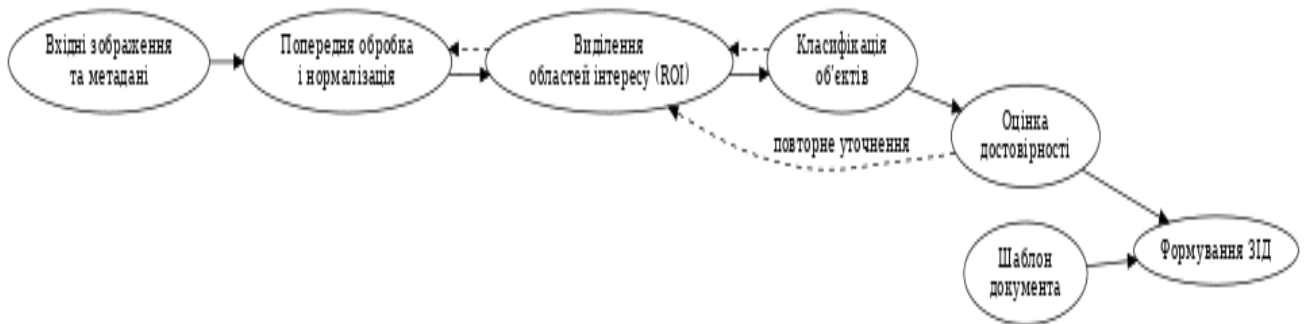


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема постановки задачі формування ЗІД

Формально, задача розбивається на підзадачі:

1. $f_1: I \rightarrow I'$ – попередня обробка зображень;
2. $f_2: I' \times M \rightarrow ROI$ – визначення областей інтересу;
3. $f_3: ROI \times S \rightarrow C$ – класифікація об'єктів;

4. $f_4: C \times T \rightarrow Z$ – формування звіту за шаблоном.

Для забезпечення ефективності реалізації задачі враховується також адаптація до змінних умов зйомки, особливостей апаратури, рівня зашумленості та типів об'єктів. У подальших підрозділах буде детально розглянуто архітектуру системи AutoZID, структуру даних, логіку обробки і форматування вихідних звітів.

2.2. Архітектура інформаційної системи

2.2.1. Структура модулів і потоків обробки

Система AutoZID побудована на модульному принципі, що забезпечує її масштабованість, відмовостійкість та можливість інтеграції з зовнішніми джерелами даних. Архітектура включає набір послідовно зв'язаних блоків, кожен з яких виконує окрему функцію в процесі формування ЗІД — від завантаження знімків до генерації структурованого документа.

Формально, кожен блок B_i функціонує як трансформаційний оператор:

$$D_{i+1} = B_i(D_i, P_i), \quad (2.2)$$

де:

D_i — дані на вході блоку,

P_i — параметри обробки,

D_{i+1} — результат.

Повна система розглядається як композиція:

$$Z = B_n * B_{n-1} * \dots * B_1(I, M, S, T), \quad (2.3)$$

Архітектура підтримує паралельну обробку, попереднє кешування проміжних результатів та інтерактивний перегляд. На рисунку 2.1 показано узагальнену схему архітектури системи AutoZID.

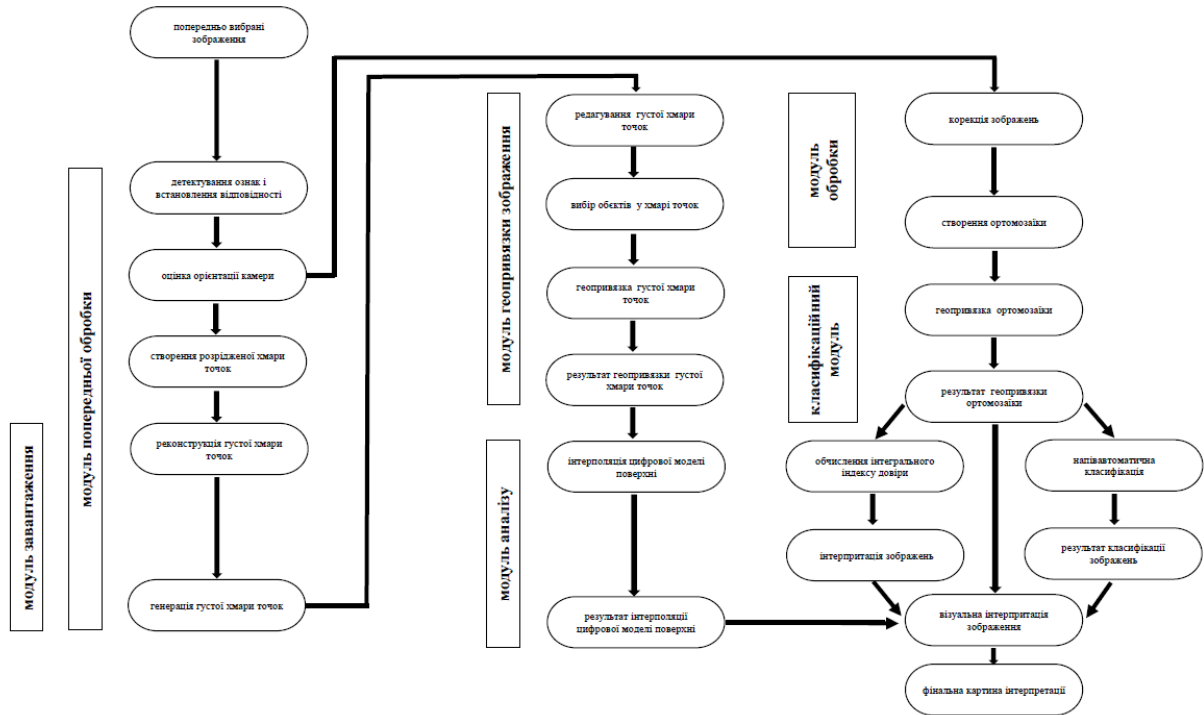


Рисунок 2.1 – Архітектура модулів системи AutoZID

Архітектура системи побудована за модульним принципом із чітким розподілом функцій між компонентами, що забезпечує можливість масштабування та інтеграції нових програмних модулів без порушення загальної логіки роботи. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до змін вимог і технологій, підвищуючи її гнучкість, відмовостійкість та ефективність обробки великих обсягів аерокосмічних знімків у реальному часі [9].

Особливість аналізу зображень полягає у багаторівневому підході до їх обробки: від попередньої фільтрації шумів до розпізнавання об'єктів і прив'язки результатів до координатної системи. Саме тому ефективність роботи модулів значною мірою залежить від здатності системи працювати в режимі реального часу, враховуючи багатознімовість, складність метаданих і потреби інтеграції з

іншими інформаційними ресурсами. Це особливо актуально у військовій, екологічній, інфраструктурній сферах, де швидкість та достовірність прийняття рішень прямо залежать від якості отриманої інформації.

Існуючі інформаційні системи здебільшого орієнтовані на часткову автоматизацію аналітичних процедур і вимагають суттєвого залучення експертів для формування звітів. Водночас перспективні технології на основі машинного навчання, зокрема глибоких нейронних мереж, відкривають можливості для створення інтелектуальних рішень, які здатні автоматично інтерпретувати зображення та структурувати результати [2, 30].

Функціональна архітектура AutoZID включає послідовну взаємодію окремих модулів, кожен із яких виконує чітко визначене завдання в межах конвеєра обробки. Першим етапом є модуль завантаження, що приймає зображення з БпАК або супутникових систем разом з метаданими (TIF, GeoTIFF, JSON). Наступним кроком є модуль попередньої обробки, що виконує нормалізацію, фільтрацію шумів, корекцію освітлення.

Далі працює модуль аналізу ROI, який застосовує адаптивні алгоритми сегментації (адаптивний поріг або watershed). Потім активується класифікаційний модуль, який може використовувати CNN-архітектури (YOLOv5, EfficientDet), або rule-based моделі залежно від типу знімка. Результати передаються до модуля семантичної інтерпретації, де об'єкти співставляються з базою знань для визначення класу, впевненості класифікації та геолокації.

Модуль побудови звітів формує структуровані звітні блоки згідно шаблону (*T*) із заповненням ключових полів: координати, тип об'єкта, площа, ймовірність ідентифікації, час зйомки. Завершується обробка модулем експорту, який готує результат у форматі PDF або GeoJSON для подальшого аналізу або архівації.

Процес автоматизованого формування звіту подано у вигляді функціонального перетворення, яке відображає поетапну обробку вхідних даних

— від попередньої підготовки зображень до генерації структурованого звіту, де кожна складова відображає окремий етап обробки [4, 18].

$$Z = \text{AutoZID} (I, M, S, T) = E (D (\text{Seg} (\text{Prep} (I, M)), S), T), \quad (2.4)$$

де:

I – зображення;

M – метадані;

S – база знань;

T – шаблон;

Prep – підготовка;

Seg – сегментація;

D – дешифрування;

E – етап оформлення звіту.

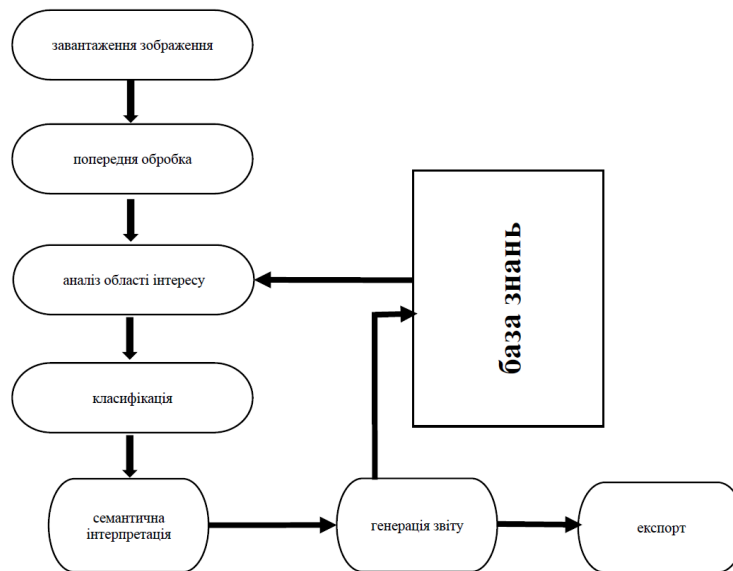


Рисунок 2.2 – Поточкова схема роботи системи AutoZID

Потік обробки представлений на рисунку 2.2, де кожен етап відображає логіку обробки зображень у системі AutoZID, а модуль виконує функціональне перетворення в межах загального інформаційного конвеєра.

Для візуальної оцінки покращення ефективності після впровадження AutoZID порівнюються ключові метрики класифікації. Як показано на рисунку 2.3, за всіма параметрами — точність, повнота, F1-міра та коефіцієнт достовірності — система демонструє значне зростання ефективності.

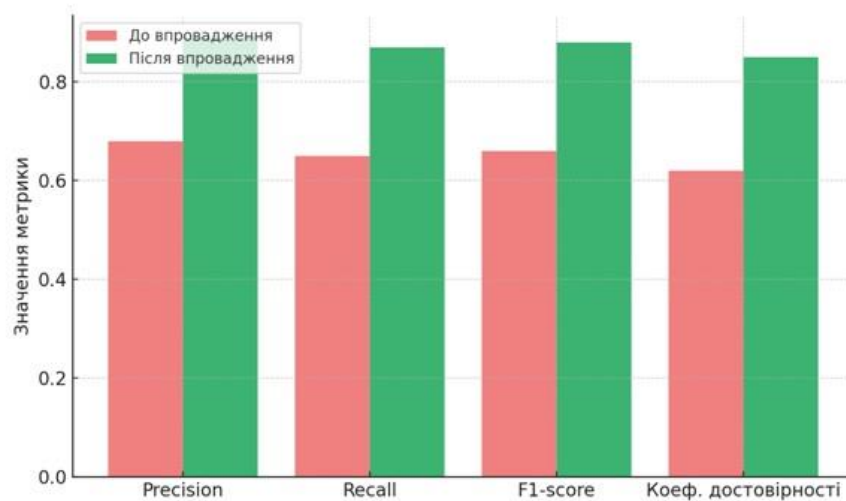


Рисунок 2.3 – Порівняння ефективності дешифрування зображень до та після впровадження AutoZID

2.2.2. Взаємодія з базами знань та аналітикою

Одним із ключових елементів системи AutoZID є модуль взаємодії з базами знань, який забезпечує інтерпретацію результатів аналізу зображень. Для цього використовується семантична база (*S*), яка містить описові характеристики об'єктів, шаблони їхніх геометричних і спектральних властивостей, а також логіку прийняття рішень на основі правил.

Система звертається до бази знань у режимі запиту на відповідність: ідентифіковані фрагменти зображення порівнюються зі зразками (еталонами) з бази, і визначається рівень збігу.

Застосовується функція порівняння:

$$Match(O_i, S_j) = \max (Sim(O_i, S_j) \times W_i), \quad (2.5)$$

де:

O_i – об'єкт на зображенні;

S_j – зразок з бази;

Sim – функція подібності;

W_i – ваговий коефіцієнт достовірності.

Аналітичні модулі використовуються для агрегації та логічного висновку, коли об'єкти виявлені в межах кількох знімків, система проводить часову та просторову кореляцію, що дозволяє підвищити достовірність класифікації. Крім того, для уточнення рішень застосовуються інтерфейси з GIS-сервісами (QGIS, ArcGIS) та репозитаріями військових стандартів.

На рисунку 2.4 зображено загальну схему зв'язку між модулями AutoZID і семантичними базами знань, що реалізують інтеграцію на етапі інтерпретації.

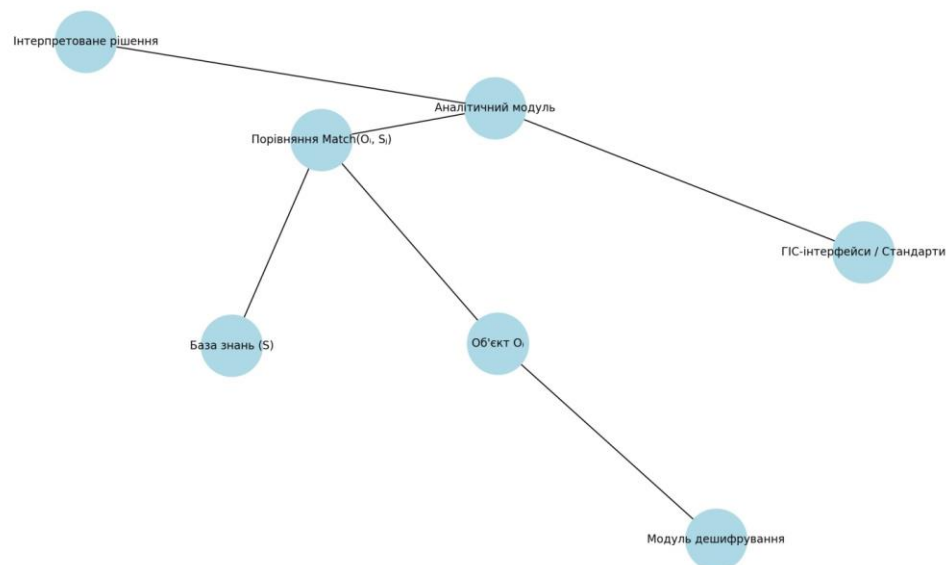


Рисунок 2.4 – Схема взаємодії з базою знань у системі AutoZID

2.3. Формалізація структури ЗІД

2.3.1. Шаблонні поля та параметри звіту

Для забезпечення практичного функціонування системи AutoZID необхідно не лише задати структуру звіту, а й розробити механізм його автоматизованого формування. Саме процес перетворення результатів дешифрування на структурований документ потребує узгодженості між модулями обробки зображень, базою знань і шаблоном звіту.

У процесі автоматизованого формування ЗІД важливим етапом є структурування даних згідно з визначеним шаблоном. Створення уніфікованого формату дозволяє забезпечити сумісність звітів між різними підсистемами, а також автоматизувати подальшу обробку інформації. Типовий шаблон ЗІД передбачає поділ звітної інформації на ключові поля, кожне з яких відповідає за фіксацію конкретного аспекту виявленого об'єкта або ситуації на місцевості.

Основні шаблонні поля включають: ідентифікатор об'єкта (ID), географічні координати (Lat, Lon), час виявлення (t), тип об'єкта (Class), площа або габарити (A), джерело зображення (Source), рівень достовірності (Confidence), спосіб виявлення (Method), а також посилання на відповідні фрагменти знімків. У таблиці 2.1. наведено приклад структурованого шаблону.

Таблиця 2.1 – Приклад шаблонної структури звіту

ID	Lat	Lon	t	Class	A (м²)	Source	Confidence	Method
01	49.84	30.12	12:03	авто.техн.	11.4	БпАК	0.92	YOLOv5

Для підвищення адаптивності шаблони повинні бути динамічно змінюваними залежно від типу аналізованого середовища — урбанізована зона, ліс, промислові об'єкти тощо. Передбачено також підтримку мультимодальних даних (оптичні, ІЧ, SAR-знімки) із відповідними полями спектрального типу.

Формалізація шаблону подається у вигляді множини:

$$T = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}, \quad (2.6)$$

де:

F_i – іменоване поле з визначеним типом та обмеженнями допустимих значень.

Кожне поле має метаопис у форматі JSON Schema або XML DTD, що дозволяє перевіряти валідність створеного документа та автоматизувати його генерацію.

Використання формалізованих шаблонів та алгоритмів об'єднання багатознімкових даних підвищує уніфікованість звітів та спрощує інтеграцію в існуючі ГІС-платформи. Такий підхід дозволяє зменшити вплив людського фактора, забезпечуючи стабільну якість та повноту формування звітної документації. Інтеграція алгоритмів обробки в автоматизовані ГІС-платформи створює умови для оперативного оновлення просторових даних і підвищення ефективності прийняття управлінських рішень [28].

2.3.2. Формальні вимоги до структури документа

Оскільки ЗІД виступають ключовим каналом комунікації між системами моніторингу та прийняття рішень, необхідно забезпечити їхню логічну завершеність, структурованість і машинну читаємість. Основні формальні вимоги до структури ЗІД можна розділити на семантичні, синтаксичні та форматні.

Семантична узгодженість передбачає: наявність обов'язкових полів (ID, координати, клас об'єкта, час), недопущення неоднозначності в інтерпретації значень, а також відповідність вмісту шаблонам та правилам бази знань.

Синтаксичні вимоги включають правильну побудову заголовків, унікальність імен полів, відсутність конфліктів при імпорті у бази даних або GIS-системи.

Форматні вимоги стосуються представлення звіту в одному з узгоджених форматів — PDF для читання людиною, GeoJSON для подальшого аналізу в ГІС, XML для інтеграції з військовими системами управління.

Для цього розроблено формальний опис:

$$ZID := \{Meta, Content, Attachments\}, \quad (2.7)$$

де

Meta – службова інформація (дата, автор, джерело);

Content – основні таблиці й графи даних;

Attachments – прив’язані зображення, карти, фрагменти знімків.

Кожен елемент розглядається як запис:

$$R_i = \{ID_i, Class_i, Loc_i, A_i, Conf_i, ImgRef_i\}, \quad (2.8)$$

де:

Loc_i – координати;

Conf_i – довіра;

ImgRef_i – посилання на зображення.

Такий підхід дозволяє здійснювати автоматичну обробку ЗІД у програмних системах, забезпечуючи стандартизацію і надійність документації. Уніфікована модель даних сприяє безперервній інтеграції з різномірними інформаційними платформами, включно з мобільними застосунками та хмарними сервісами обробки геопросторової інформації, що у свою чергу, підвищує ефективність управління даними та скорочує час підготовки звітності.

2.4. Модель об'єднання багатознімкових даних

2.4.1. Просторове вирівнювання та агрегація

Для забезпечення повноти та достовірності дешифрування необхідно реалізувати механізм просторового вирівнювання та агрегування знімків, які можуть надходити з різних джерел — супутників, БпАК, архівних баз даних — і суттєво відрізнятися за просторовою роздільністю, кутом зйомки та часом фіксації. Тому, однією з ключових вимог до підвищення точності дешифрування є ефективне поєднання зображень, отриманих із різних джерел або ракурсів.

У контексті багатознімкової обробки використовується просторове вирівнювання (georectification) — процес, у ході якого зображення приводяться до єдиної координатної системи. Це дозволяє здійснити агрегацію інформації з різних сенсорів (БпАК, супутники, архівні дані) у вигляді узгодженої карти спостереження.

Математично, нехай є набір знімків $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, кожен із яких має свою сітку координат (x_i, y_i) . Після геоприв'язки, кожне зображення трансформується в уніфіковану систему координат (X, Y) за допомогою афінного перетворення:

$$X = a_1x + b_1y + c_1, Y = a_2x + b_2y + c_2, \quad (2.9)$$

Після вирівнювання застосовується агрегація: об'єднання відповідних пікселів або фрагментів з урахуванням ваг (довіри, спектральної інформативності). Формалізовано агрегований знімок виглядає наступним чином:

$$I_{agg}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(x,y) * I_i(x,y)}{\sum_{i=1}^n w_i(x,y)}, \quad (2.10)$$

Це рівняння описує агрегування кількох зображень (знімків з різних сенсорів або в різні моменти часу) в одне результуюче зображення з урахуванням ваг кожного знімка в кожній точці, де:

$I_{agg}(x,y)$ – значення інтенсивності у пікселі (x,y) на агрегованому (підсумованому) зображенні;

$I_i(x, y)$ – значення інтенсивності у пікселі (x,y) на i -му зображенні;

$w_i(x, y)$ – вага (важливість, достовірність, вплив) i -го знімка в точці (x,y) ;

n – кількість зображень, що агрегуються.

Приклад вибору ваги:

$w_i(x, y) = \frac{1}{\sigma_i(x, y)}$ – обернено пропорційно до локального шуму;

$w_i(x, y) = \exp \left(- \frac{(I_i(x, y) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right)$ – Гаусів фільтр на основі відхилення

від середнього значення.

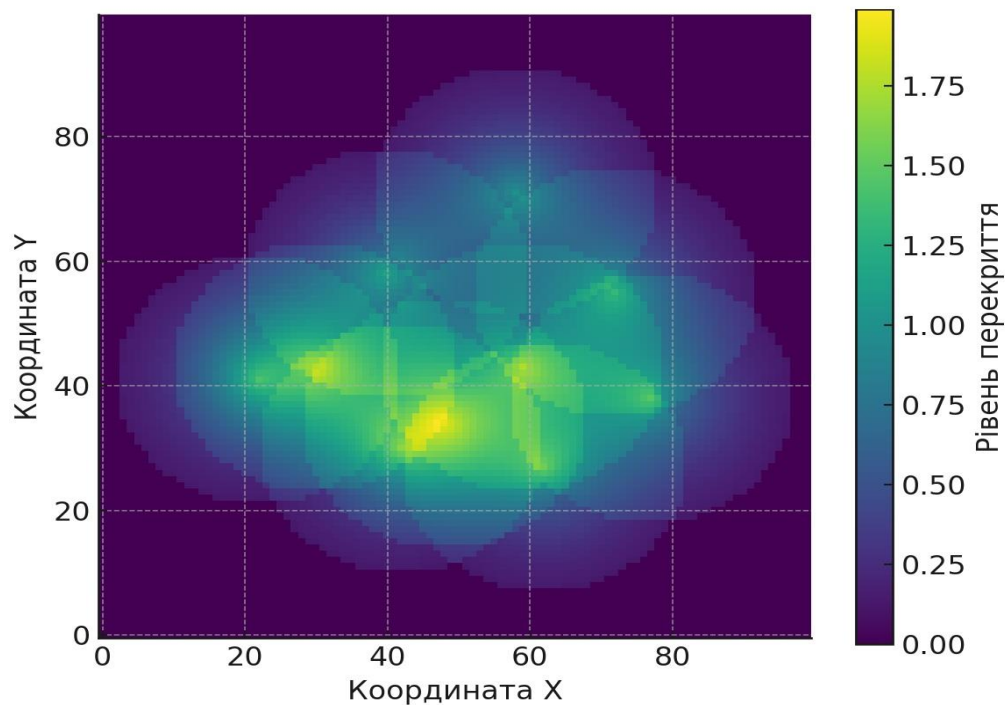


Рисунок 2.4 – Карта щільності перекриття зображень

На рисунку 2.4 показано приклад карти щільності перекриття зображень, яка відображає зони з найвищим рівнем впевненості після агрегації. У межах цього представлено методику геопросторової трансформації знімків із використанням афінних перетворень, що дозволяють узгодити їх у єдиній координатній системі. Запропоновано формалізований підхід до вагового об'єднання пікселів із урахуванням локальної інформативності, спектральної достовірності та рівня шуму, а також механізм узгодження об'єктних описів за координатною, часовою та семантичною схожістю, що дає змогу уникати дублювання результатів розпізнавання. Такий комплексний підхід забезпечує інтегроване представлення об'єктів у єдиному інформаційному просторі та підвищує точність формування ЗІД [7, 33].

2.4.2. Узгодження об'єктних описів

При наявності кількох виявлень одного об'єкта з різних джерел необхідно здійснити процес їх синхронізації — узгодження об'єктних описів. Це досягається через обчислення показників схожості за координатами, часом фіксації, класом об'єкта та спектральними характеристиками.

Припустимо, що два об'єкти описуються записами R_1 та R_2 . Узгодження відбувається, якщо виконується умова:

$$C_m = \alpha_1 \cdot d_{coord}(R_1, R_2) + \alpha_2 \cdot d_{class}(R_1, R_2) + \alpha_3 \cdot d_{time}(R_1, R_2) < \tau, \quad (2.11)$$

де:

C_m — узагальнений показник відповідності;

α_i — вагові коефіцієнти;

d_{coord} — евклідова відстань;

d_{class} — відстань між класами;

d_{time} — часова різниця;

τ — поріг об'єднання.

На рис. 2.5 представлено схему зіставлення об'єктів із різних джерел з виділенням ймовірності їхнього об'єднання в єдине інформаційне представлення.

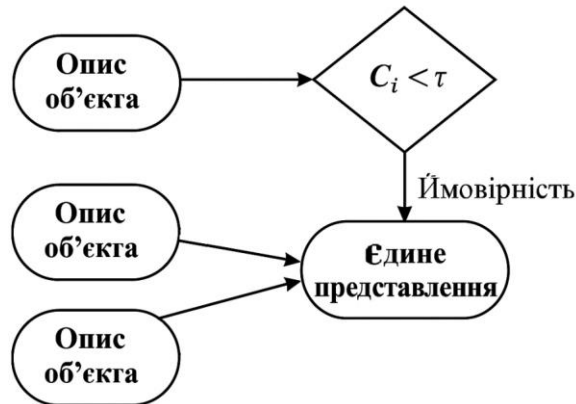


Рисунок 2.5 – Схема узгодження об'єктних описів у багатознімковій обробці

Запропонований підхід забезпечує усунення дублювання об'єктів та підвищує цілісність сформованого ЗІД, що, у свою чергу, сприяє достовірному відображенню ситуаційної обстановки. Процедура узгодження об'єктних описів формує єдиний інформаційний простір для подальшого аналізу, підвищуючи обґрунтованість та точність рішень у системах бойового управління. Інтегроване представлення об'єктів дозволяє раціоналізувати наступні етапи обробки даних, зокрема фільтрацію, верифікацію та прогнозування розвитку оперативної обстановки.

2.5. Алгоритм AutoZID-Gen (базова версія)

2.5.1. Псевдокод і логіка роботи

Розробка алгоритму AutoZID-Gen (автоматизованого генерування ЗІД) базується на концепції повної автоматизації процесу формування звітів за результатами дешифрування аерокосмічних зображень. Основна ідея полягає в трансформації попередньо оброблених знімків, які пройшли етапи сегментації, класифікації та геоприв'язки, у структуровані інформаційні блоки, готові для

подання у форматі звіту. На рисунку 2.6 показано алгоритм реалізації послідовного перетворення наборів об'єктів у відповідні шаблонні поля, враховуючи контекстну інформацію, тип знімка та призначення документа. Ключовою особливістю є модульність, що дозволяє адаптувати шаблони під різні сценарії застосування.



Рисунок 2.6 – Алгоритм реалізації послідовного перетворення наборів об'єктів.

AutoZID-Gen виступає центральним елементом платформи AutoZID, забезпечуючи формування повноцінних цифрових звітів без залучення оператора на етапі компоновки. Застосування AutoZID-Gen значно скорочує час підготовки звітної документації та мінімізує ймовірність помилок, пов'язаних із людським фактором [8, 12].

Базова версія алгоритму реалізує послідовність обробки у п'ять основних етапів:

1. Ініціалізація вхідних даних: прийом набору просторово вирівняних зображень та метаданих.
2. Виявлення об'єктів: застосування моделей сегментації та класифікації зображень.
3. Узгодження об'єктних записів: об'єднання дублікатів об'єктів за правилами схожості.
4. Формування шаблонної структури ЗІД: зіставлення виявлених об'єктів із шаблоном звітності.
5. Вивід даних у структурованому вигляді: генерація фінального документа у форматі XML/JSON/табличному поданні.

Формально псевдокод реалізації AutoZID-Gen представлено наступним шаблоном:

```

ФУНКЦІЯ AutoZID_Gen(I, M, S, T):

    // Етап 1: Зчитування вхідних даних
    images ← LoadImages(I)
    metadata ← ParseMetadata(M)
    template ← LoadTemplate(T)
    knowledgeBase ← LoadKnowledgeBase(S)

    // Етап 2: Виявлення об'єктів на зображеннях
    objects ← DetectObjects(images)

    // Етап 3: Узгодження дублікатів (MergeDuplicates)
    unifiedObjects ← []
    ДЛЯ кожного obj у objects:
        match ← FindMatchingObject(unifiedObjects, obj, threshold=τ)
        ЯКЩО match:
            merged ← Merge(obj, match, weights=α)
            Replace(unifiedObjects, match, merged)
        ІНАКШЕ:
            Append(unifiedObjects, obj)
  
```

```

// Етап 4: Прив'язка до шаблонів
mappedFields ← []
ДЛЯ кожного obj у unifiedObjects:
    ДЛЯ кожного field Tj у template:
        Fj ← MapToField(obj, Tj, context=θ)
        mappedFields.append(Fj)

// Етап 5: Генерація звітнього документа
report ← GenerateDocument(mappedFields, format="CSV/XML/GeoJSON")

// Етап 6: Повернення результату
ПОВЕРНУТИ report

```

Вагомим аспектом в реалізації алгоритму AutoZID-Gen є процедура об'єднання дублікатів (merge duplicates), яка відповідає за об'єднання об'єктів, виявлених на різних зображеннях, але які з високою ймовірністю, описують один і той самий фізичний об'єкт. Її функціональне значення полягає в зменшенні надлишковості вхідних даних та підвищенні цілісності кінцевої звітної моделі. Для цього використовується обчислення інтегрального показника схожості C_m , який був формально введений у підрозділі 2.4.2. Він охоплює координатну, часову та класифікаційну близькість об'єктів, а також дозволяє застосовувати вагові коефіцієнти для корекції впливу окремих параметрів. Узгоджені об'єкти з різних джерел утворюють єдиний уніфікований запис, що потрапляє до фінального реєстру спису об'єктів (ObjList) [41].

Після формування чистого списку об'єктів здійснюється операція їх прив'язки до структурних елементів шаблону ЗІД - процедура зіставлення об'єктів до шаблону (map objects to template). У цьому блоці кожен об'єкт O_i , що характеризується множиною атрибутів (геопросторових, спектральних, класових), співвідноситься із заздалегідь визначеним шаблонним полем T_j .

Формально ця операція описується як функція відповідності:

$$F_j = f(O_i, T_j, \theta), \quad (2.12)$$

де:

F_j — значення поля звіту;

O_i — об'єкт у нормалізованому вигляді;

T_j — відповідне поле шаблону;

θ — контекстна інформація (тип зйомки, рівень деталізації, цільове призначення звіту).

Ця операція забезпечує логічне наповнення шаблонних елементів релевантною інформацією, що має бути представленою в документі.

Завершальним етапом виступає функція Generate Report (згенерувати звіт), що відповідає за формування остаточного звітного документа у потрібному форматі. Даний модуль перетворює структуру, зібрану у попередньому кроці, у придатний для використання формат: табличний (Excel або CSV), структурований XML-документ або ж готове подання для інтеграції у ГІС.

У випадку ГІС-систем, дані подаються у вигляді шарів із відповідною семантикою, що дозволяє здійснювати подальший просторовий аналіз ситуаційної обстановки.

Таким чином, триєдина структура: (узгодження об'єктів – картографічна прив'язка – шаблонізація документа) забезпечує не лише автоматизацію, а й логічну повноту процесу генерації звітно-інформаційних документів у системі AutoZID.

2.5.2. Структура виводу даних

Після виконання процедур дешифрування, узгодження та формування відповідних атрибутів, система AutoZID генерує звітно-інформаційний документ у форматі, що узгоджується з внутрішніми вимогами аналітичних і командних

підрозділів. Типовими форматами виводу є: табличні файли (CSV), XML-документи для обміну з іншими інформаційними системами, а також геопросторові шари у форматах, що підтримуються ГІС.

Універсальна структура ЗІД включає такі блоки:

1. Заголовок (Header): ідентифікатор документа, дата і час створення, зона моніторингу, джерела зображень.

2. Метадані (Meta): характеристики сенсорів, висота польоту, спектральні діапазони, модель БпАК або супутника.

3. Опис об'єктів (Objects): перелік виявлених цілей із координатами, часовими мітками, класами об'єктів та ймовірностями класифікації.

4. Аналітичний розділ (Analysis): підсумки по категоріях, графічні показники (розподіл типів об'єктів), індекси достовірності.

5. Підсумковий блок (Summary): автоматично сформовані висновки щодо обстановки та рекомендації для оперативного реагування.

Кожен блок структурується відповідно до шаблону, що адаптується до типу місії. Шаблон для прикордонного моніторингу містить параметри: «тип об'єкта», «відстань до кордону», «температурна аномалія».

Формально вивід представлено як:

$$Report = \{Header, Meta, \{O_1, O_2, ..., O_n\}, Analysis, Summary\}, \quad (2.13)$$

де:

O_i — об'єктна сутність, описана множиною полів: $O_i = \{Lat, Lon, Time, Class, Prob, Area, Direction, Temp\}$;

де:

Lat/Lon — координати;

$Time$ — час фіксації;

$Class$ — категорія;

Prob — ймовірність;

Area — площа;

Direction — напрямок руху;

Temp — температурний слід.

На рисунку 2.7 подано загальну структуру сформованого ЗІД, що забезпечує стандартизацію обміну інформацією в системах моніторингу.

Крім основних блоків, у структуру ЗІД можуть інтегруватися допоміжні елементи, зокрема карти щільності виявлень, анотації із загрозами або статусами об'єктів, сигнали щодо повторних появ, тощо. Це дозволяє зробити документ придатним як для тактичного використання, так і для аналітичного планування. Формат документа оптимізується відповідно до вимог сумісності з централізованими інформаційними системами оборонного призначення. Додатково забезпечується логування джерел інформації для підвищення прозорості аналізу та збереження історії змін.

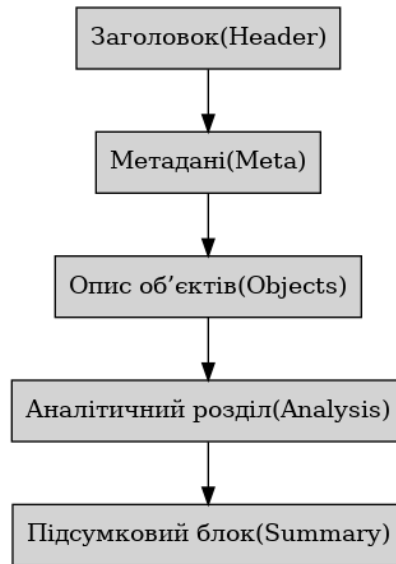


Рисунок 2.7 – Структура сформованого ЗІД після обробки даних

У структурі системи AutoZID модуль AutoZID-Gen виконує ключову роль у фінальному етапі — генерації звітів. У той час як AutoZID охоплює весь життєвий цикл даних — від зображення до інтерпретації, то AutoZID-Gen

спеціалізується на формалізації та генерації ЗІД, включаючи їх шаблонізацію, логічну верифікацію та експорт у придатних форматах.

2.6. Висновки до розділу 2.

1. Сформульовано концепцію інформаційної моделі автоматизованого формування ЗІД на основі дешифрування авіаційних та космічних зображень, що лягла в основу архітектури програмного комплексу AutoZID.

2. Розроблено загальну архітектуру системи AutoZID, яка охоплює етапи отримання знімків, виявлення об'єктів, об'єднання даних, прив'язки до шаблонів і генерації звітів із чітким функціональним розподілом між модулями.

3. Формалізовано постановку задачі у вигляді чотирикомпонентної множини $\{I, M, T, S\}$, що охоплює вхідні зображення, метадані, шаблони звітів і бази знань, забезпечуючи масштабованість та універсальність підходу.

4. Описано структуру та алгоритм AutoZID-Gen, який реалізує процедури об'єднання об'єктів, прив'язки до шаблонів і побудови фінального документа у текстових та геопросторових форматах.

5. Створено набір графічних матеріалів (блок-схеми архітектури, карти щільності знімків, схеми зіставлення об'єктів), що візуалізують процес побудови ЗІД і підтверджують ефективність системи.

6. Доведено гнучкість і адаптивність архітектури AutoZID до специфічних завдань різних відомств та організацій, зокрема у прикордонному та техногенному моніторингу.

7. Інтегровано алгоритми глибокого навчання та аналізу метаданих, що забезпечує високу точність виявлення і класифікації об'єктів навіть за умов неповних або зашумлених даних.

8. Запропоновано механізми масштабування та інтеграції із зовнішніми інформаційними ресурсами, що підвищують стійкість системи до змін обсягів і форматів вхідних даних.

9. Закладено основу для подальшої модернізації AutoZID у напрямку повної автоматизації моніторингу та звітності в реальному часі.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДЕШИФРУВАННЯ

3.1. Основні принципи побудови математичних моделей у системах обробки зображень

3.1.1. Попередня фільтрація і нормалізація

Математичне моделювання є ключовим інструментом у системах автоматизованого дешифрування, адже дозволяє формалізувати властивості зображень, визначити правила сегментації та класифікації об'єктів, а також узагальнити різні типи вхідних даних. В основу моделювання закладається припущення про наявність структурованих залежностей між піксельними характеристиками, геометрією об'єктів та їх тематичною приналежністю.

У контексті розпізнавання авіаційних і супутникових знімків доцільно використовувати комбіновані моделі, які поєднують статистичні методи, методи глибинного навчання та апіорні знання про об'єкти. Зокрема, математичні моделі формуються як функціональні відображення між простором зображень і простором об'єктних описів:

$$O = M(I, M_d, S), \quad (3.1)$$

де:

I — зображення;

M_d — метадані;

S — семантичні знання;

O — вихідна множина об'єктів.

Окрему роль відіграють моделі достовірності, які оцінюють ступінь відповідності об'єкта шаблону. Вони будуються на базі метрик подібності, таких

як перехресна ентропія, індекс Жаккара, або функції втрат, що оптимізуються в процесі навчання моделей.

Етап попередньої фільтрації та нормалізації зображень є фундаментальним у процесі підготовки авіаційних та супутникових даних до дешифрування. Його мета — усунути шуми, покращити контрастність та забезпечити уніфікованість вхідних зображень для подальшої обробки.

Зокрема, використовуються такі методи фільтрації:

- гаусівське згладжування для зменшення високочастотних шумів;
- медіанне фільтрування для видалення імпульсних перешкод;
- анізотропна дифузія, що зберігає межі об'єктів при згладжуванні.

Нормалізація передбачає приведення інтенсивності зображення до стандартизованого діапазону (зазвичай $[0, 1]$ або $[0, 255]$), що виражено формулою нормалізації:

$$I'(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}, \quad (3.2)$$

де:

$I(x, y)$ — значення яскравості в точці;

I_{max} — максимальне значення яскравості на зображенні;

I_{min} — мінімальне значення яскравості на зображенні;

$I'(x, y)$ — нормалізоване значення пікселя.

Також важливим етапом є вирівнювання гістограм, що дозволяє покращити візуальне сприйняття та виокремлення об'єктів:

$$P'(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^i h(j), \quad (3.3)$$

де:

$h(j)$ — гістограма зображення;

N — загальна кількість пікселів у зображенні;

$P'(i)$ — ймовірність появи пікселів з інтенсивністю до i включно (кумулятивна функція розподілу).

На цьому етапі дані стають придатними до наступного визначення регіонів ROI, що є критично важливим для успішного дешифрування в складних умовах освітлення, атмосферних перешкод та при роботі з даними БпАК. На рисунку 3.1 продемонстровано, як нормалізація покращує контрастність візуального представлення знімка та вирівнює розподіл яскравості, що суттєво полегшує подальше дешифрування [27, 38].

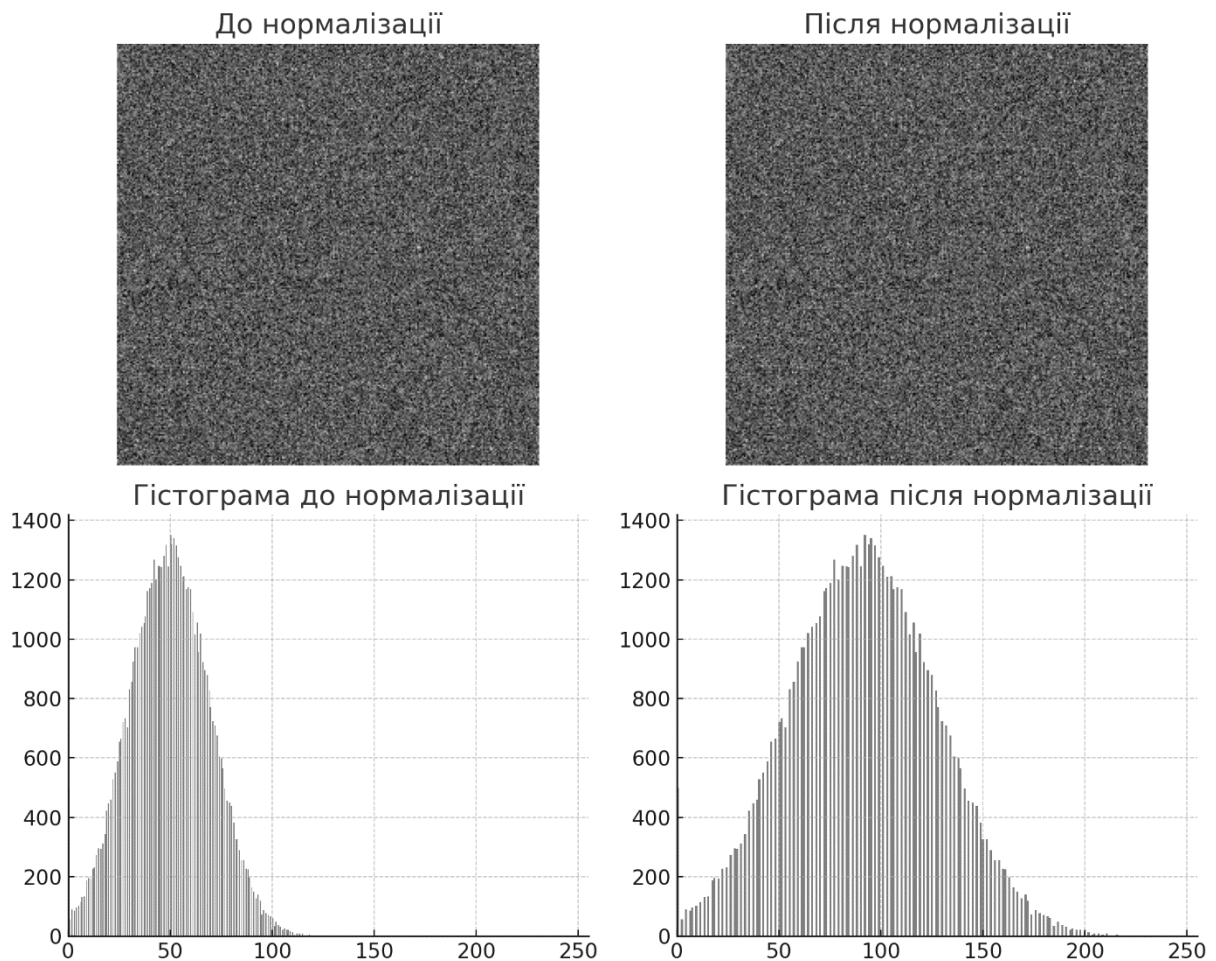


Рисунок 3.1 — Приклад впливу нормалізації на якість візуалізації знімка

Ці процедури підвищують точність наступних алгоритмів сегментації та класифікації, мінімізуючи вплив зовнішніх спотворень та варіацій вхідних даних. При побудові математичних моделей враховується фактор шуму, змін освітлення, кута огляду, масштабу. Для цього застосовуються методи інваріантного аналізу, зокрема нормалізація до масштабу, а також просторові трансформації зображень [10, 14].

Результати математичного моделювання лягають в основу формування векторів ознак, які далі подаються на вхід класифікаторам. Тому ефективність моделі прямо впливає на точність всієї системи дешифрування та подальшої генерації звітної документації.

3.1.2. Визначення ROI

Одним із важливих етапів у системах автоматизованого дешифрування є визначення ROI, які зосереджують увагу на потенційно значущих ділянках зображення. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг обробки та покращити точність виявлення об'єктів, особливо в складних умовах фону або природного середовища.

ROI визначаються на основі попередньо обробленого зображення, з урахуванням просторових, спектральних, температурних та текстурних особливостей. При моніторингу водного середовища (морських узбереж, річок або озер) алгоритми можуть акцентувати увагу на різко відмінних ділянках яскравості, теплового сліду або контурів, що вказують на присутність об'єктів (катерів, човнів, понтонів тощо).

Формально область ROI можна описати множиною пікселів:

$$ROI = \{ (x, y) \in I \mid \varphi(I(x, y)) \geq \tau \}, \quad (3.4)$$

де:

$I(x, y)$ — значення зображення в точці;

φ — функція ознаки (градієнта, кольору, температури);

τ — порогове значення.

Процедури визначення ROI часто реалізуються у вигляді слайдового вікна, що переміщується по зображенню з заданим кроком, при цьому оцінюються локальні статистики: середнє значення, дисперсія, текстурні показники (енергетика, ентропія). Крім того, використовуються нейронні сегментатори, що виділяють зони заздалегідь навчених об'єктів.

З урахуванням сучасних підходів, визначення ROI може ґрунтуватися не лише на локальних особливостях зображення, а й на контекстних параметрах, включаючи просторові зв'язки, історичну активність у регіоні, а також результатах попередніх виявлень. У роботі [Marcu et al., 2020] наведено підхід до сегментації ROI за допомогою глибоких згорткових мереж із зворотним контекстним підсиленням (Reverse Context Enhancement, RCE), що дозволяє підвищити точність локалізації об'єктів навіть у зашумлених умовах або при частковому перекритті.

На рисунку 3.2 зображено приклад застосування підходу RCE для автоматизованого аналізу аерофотознімків із виявленням військової техніки. Вхідним даним є аерофотознімок, на якому зафіксовано зразок бронетанкової техніки. Зображення надходить на обробку до базової згорткової нейронної мережі, яка виконує вилучення багаторівневих ознак, що описують як геометричну структуру об'єкта, так і його текстурні характеристики. Далі обчислені ознаки передаються до модуля підсилення контексту, який за допомогою механізмів зворотного контекстного аналізу уточнює просторові та семантичні межі об'єкта, враховуючи фон і навколишні деталі сцени. На виході формується маска області інтересу, що бінарно відображає контур та форму військової техніки, забезпечуючи можливість подальшої інтеграції результатів у системи моніторингу або автоматизованого формування ЗІД [13, 44, 47].

Такий підхід дозволяє підвищити точність розпізнавання військових об'єктів навіть у складних умовах зйомки та за наявності зашумленого фону.

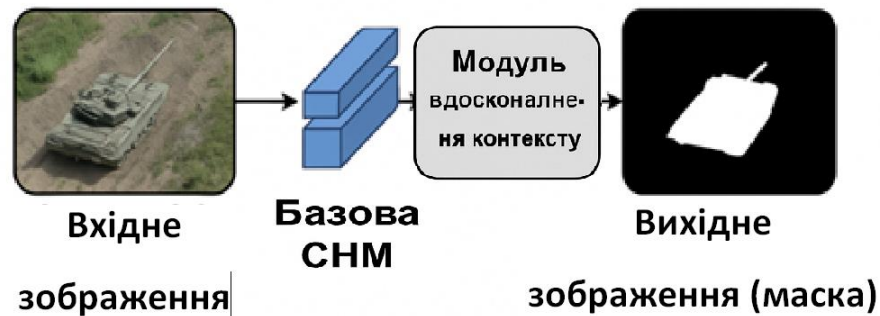


Рисунок 3.2 — Застосування підходу RCE для автоматизованого аналізу

Врахування топологічної взаємодії між ділянками на зображенні (кластеризація аномальних зон із урахуванням геопросторових координат) дозволяє формувати ROI більш адаптивно. Зокрема, використовуються багаторівневі маски інтересу, що базуються на ентропійних характеристиках областей, показниках змінності (change detection) і карті залишків (residual maps) після первинної реконструкції.

Такий підхід формалізується як система адаптивного позначення областей:

$$ROI = \bigcup_{k=1}^n \{ (x, y) \in I \mid \psi k(I, Hk, \lambda k) \geq \theta k \}, \quad (3.5)$$

де

Hk — локальні гіпотези про тип об'єкта;

ψk — функції відповідності;

λk — вагові коефіцієнти;

θk — динамічні пороги.

Це дозволяє не лише точно визначати пріоритетні ділянки для аналізу, а й формувати інформаційні шари, які пізніше використовуються в модулях класифікації та генерації ЗІД.

На рисунку 3.3 зображено приклад визначення області інтересу на міському інфраструктурному зображенні, де виділено дороги, будівлі та ділянки скупчення об'єктів. Такі зони використовуються як ключові фрагменти для подальшого аналізу та автоматичного дешифрування зображення.



Рисунок 3.3 — Визначення ROI на зображенні інфраструктури міста

Крім того, система продемонструвала можливість об'єднання інформації з різнотипних сенсорів (оптичних, тепловізійних, мультиспектральних), що забезпечує комплексну перевірку достовірності результатів. Використання мультиканальних даних під час визначення ROI дає змогу застосовувати

алгоритми перехресної кореляції та багаторівневого поєднання ознак, що підвищує завадостійкість обробки та знижує кількість хибнопозитивних виявлень. Додатково, така інтеграція сприяє формуванню більш точних масок інтересу навіть у випадках часткового перекриття або деградації зображення. Цей підхід дозволяє підвищити стабільність роботи системи в умовах змінного освітлення, погодних факторів та складного рельєфу місцевості.

3.2. Математична модель дешифрування авіаційних та космічних зображень

3.2.1. Алгоритми сегментації

Запропонована математична модель дешифрування враховує спектральні та просторові характеристики зображень, що дозволяє підвищити точність ідентифікації об'єктів на мультиспектральних та теплових даних. Поєднання спектрального аналізу з алгоритмами глибокого навчання забезпечує ефективне виділення дрібних деталей та об'єктів зі складним фоном. Такий підхід підвищує стійкість системи до впливу атмосферних та освітлювальних факторів, забезпечуючи стабільні результати у різних умовах зйомки [16, 28].

Формалізація ознак:

Нехай O_i — об'єкт на зображенні, що описується вектором ознак:

$$O_i = [s_i, t_i, c_i, f_i], \quad (3.6)$$

де:

s_i — просторові координати;

t_i — текстурні параметри;

c_i — спектральні значення;

f_i — геометричні характеристики (площа, форма, напрямки).

Функція відповідності об'єкта з шаблоном (T):

$$C(O_i, T_j) = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \delta k(O_i, T_j), \quad (3.7)$$

де:

δk — міра відстані/схожості за k -ою ознакою;

w_k — ваговий коефіцієнт.

Ймовірнісна оцінка належності до класу:

$$P(C_l|O_i) = \frac{P(O_i|C_l) \cdot P(C_l)}{P(O_i)}, \quad (3.8)$$

що реалізує байєсівський підхід до класифікації.

Оцінка F1-міри:

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \quad (3.9)$$

Для реалізації алгоритму може бути побудований класифікаційний графік або нейронна мережа (YOLOv5), яка виконує ідентифікацію на основі глибокої згорткової структури. На рисунку 3.4 для ілюстрації точності роботи моделі будується крива точність–повнота.

Графік «крива точність – повнота» ілюструє співвідношення між точністю (precision) та повнотою (recall) алгоритму класифікації об'єктів на авіаційних або супутникових зображеннях. Кожна точка кривої відповідає певному пороговому значенню спрацьовування класифікатора, за якого об'єкт вважається знайденим.

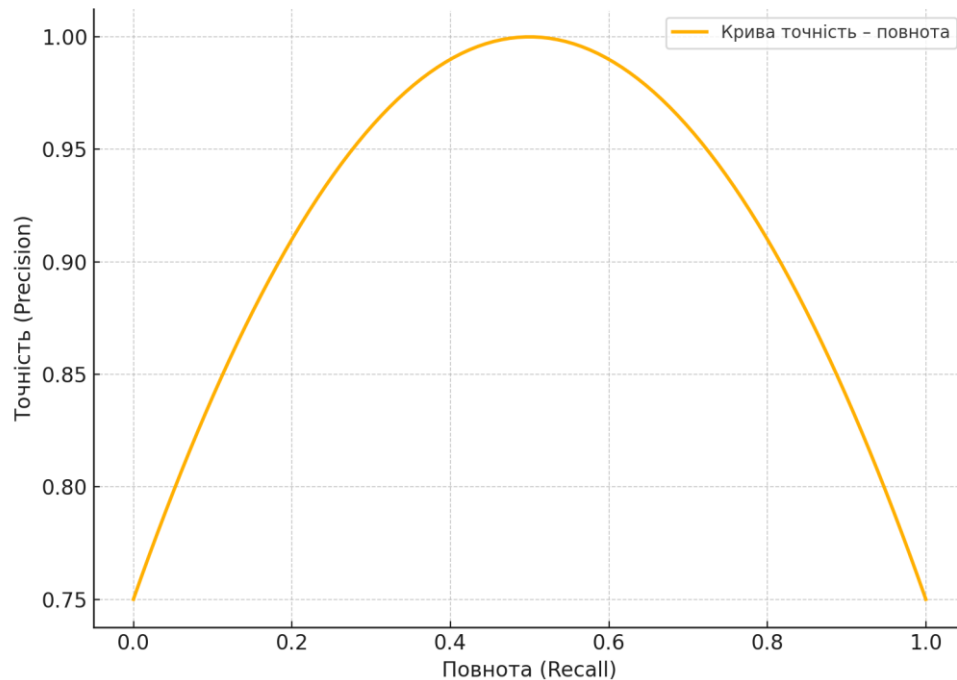


Рисунок 3.4 — Графік «крива точність – повнота»

Точність показує, яка частка об'єктів, що були класифіковані як позитивні (виявлені), дійсно є правильними (істинними позитивами), а повнота відображає, яка частка істинно позитивних об'єктів була знайдена серед усіх реально присутніх на зображенні об'єктів цього класу.

На графіку видно, що зі збільшенням повноти зазвичай зменшується точність. Це пов'язано з тим, що при зниженні порогу класифікації більше об'єктів вважаються позитивними, але водночас збільшується кількість помилково класифікованих (хибнопозитивних). У нашому випадку аналіз PR-кривої дозволяє обрати оптимальний поріг класифікації для алгоритму дешифрування, що забезпечує найкращий компроміс між точністю і повнотою. Це критично важливо для генерації звітно-інформаційних документів, де втрата або помилка у виявленні об'єкта може призвести до неточностей у формуванні ЗІД [5, 19, 43, 48].

Алгоритми сегментації є ключовим інструментом у процесі виокремлення об'єктів на зображеннях, що дозволяє забезпечити структуроване подання сцени та спростити подальшу класифікацію. У контексті дешифрування авіаційних і космічних знімків застосовуються як класичні, так і сучасні гібридні методи.

Серед базових підходів — метод порогової сегментації, який полягає у виділенні областей, інтенсивність яких перевищує певне значення:

$$S(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq T \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (3.10)$$

де:

$I(x, y)$ — яскравість пікселя;

T — порогове значення.

Також використовуються алгоритми кластеризації, k -середніх (k -means), що дозволяють поділити зображення на області за подібністю вектора ознак пікселів. Кожен кластер визначається як область з подібною кольоровою або спектральною інформацією:

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|^2, \quad (3.11)$$

де:

k — кількість кластерів;

μ_i — центр (середнє значення) кластера C_i ;

C_i — i -й кластер;

$x_j \in C_i$ — j -та точка, що належить кластеру C_i ;

$\|x_j - \mu_i\|^2$ — квадрат евклідової відстані між точкою x_j та кластером - μ_i .

У прикладних задачах ДЗЗ все більшого значення набувають глибокі нейронні мережі, зокрема U-Net та DeepLabv3, які дозволяють сегментувати

зображення на піксельному рівні з високою точністю (U-Net застосовується для виділення об'єктів на супутникових знімках лісових масивів, річкових систем, військових баз).

У випадку виявлення інфраструктурних об'єктів на аерофотознімках використано комбінацію Sobel-фільтра для виокремлення меж і морфологічних операторів (ерозія, дилатація) для згладження контурів. На рисунку 3.5 показано приклад сегментації об'єктів інфраструктури на аерофотознімку військового призначення.



Рисунок 3.5 — Приклад сегментації об'єктів інфраструктури

Зображення ілюструє фрагмент об'єкта військової інфраструктури, обробленого засобами автоматизованого дешифрування. Виокремлено ключові елементи:

- ангарні споруди для БпЛА (виявлено до 100 гаражів);
- бетонні підземні сховища для боєприпасів;
- статичні пускові установки;
- маршрути транспортування та пускові пункти;
- зони зберігання і підготовки до запуску.

Інформацію анотовано з урахуванням просторових координат і надано у формі геоприв'язаного дешифрувального шару. Такий тип обробки демонструє

приклад застосування сегментаційно-класифікаційного підходу до розпізнавання елементів військової інфраструктури із наступною генерацією ЗІД у межах системи AutoZID [5, 20, 40, 43].

Такий поетапний підхід до сегментації дозволяє гнучко адаптуватися до типу знімка, варіативності освітлення, контрасту та шумових перешкод, що є надзвичайно важливим у військових завданнях аналізу зображень.

Автоматизоване дешифрування зображень, отриманих з авіаційних або супутникових платформ, базується на математичному описі просторових, спектральних та текстурних характеристиках об'єктів, що знаходяться в межах області інтересу. Розробка ефективної математичної моделі дозволяє формалізувати процес розпізнавання та класифікації цільових об'єктів у складних умовах знімання.

3.2.2. Класифікаційні CNN-моделі (YOLOv5, EfficientDet)

Класифікаційні моделі на основі CNN стали основним інструментом для автоматичного розпізнавання об'єктів на авіаційних та супутникових зображеннях. Методи оцінювання ефективності дозволяють порівняти продуктивність різних CNN-моделей і визначити оптимальну для конкретних умов моніторингу. Такий підхід враховує не лише точність класифікації, але й швидкодію, стійкість до шумів та ресурсні обмеження обчислювальних платформ. Використання комплексних метрик продуктивності забезпечує обґрунтований вибір архітектури моделі, що відповідає специфіці поставлених завдань у сфері автоматизованого аналізу аерокосмічних знімків [40, 43, 45].

Одними з найефективніших рішень є архітектури YOLOv5 та EfficientDet, які демонструють високу точність і швидкодію в задачах дешифрування.

1). YOLOv5 (You Only Look Once) — це однопрохідна модель виявлення об'єктів, що поєднує локалізацію та класифікацію в єдиному етапі. Її архітектура показана на рисунку 3.6 та складається з:

- backbone (CSPDarknet) — для вилучення ознак;
- neck (PANet) — для об'єднання ознак різних рівнів;
- head — для передбачення координат рамок, класу та впевненості. За кожну рамку мережа генерує набір параметрів: $x, y, w, h, obj, cls1, cls2, \dots, cls_n$.

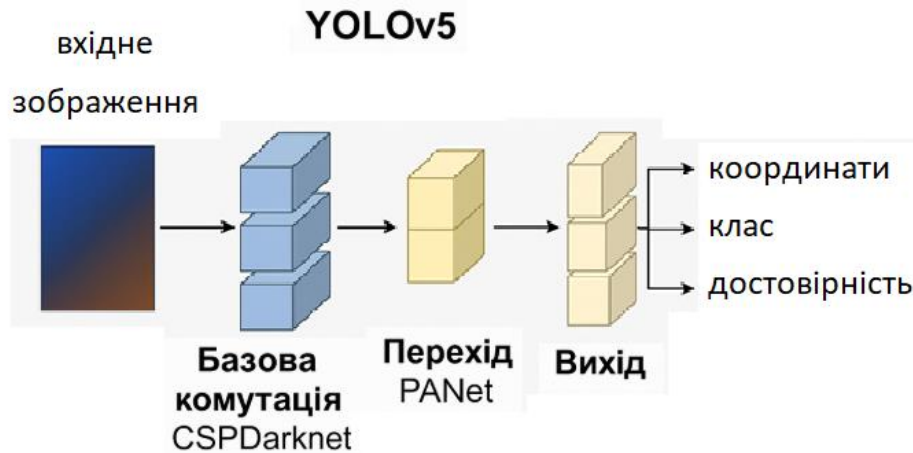


Рисунок 3.6 — Архітектура YOLOv5

Формально, вихід моделі можна представити як:

$$\hat{y}_i = \sigma(CNN(I_i; \theta)), \quad (3.12)$$

де:

I_i — вхідне зображення,

θ — параметри мережі,

$\hat{y}_i$ — вектор передбачень.

2). EfficientDet — це масштабована модель, яка базується на EfficientNet як базовій мережі та BiFPN (Bidirectional Feature Pyramid Network) для агрегації ознак. Перевагою є гнучке масштабування обчислювальних ресурсів та розмірів моделі.

Під час навчання обчислюється функція втрат:

$$L = Lcls + \lambda_1 Lbox + \lambda_2 Lobj, \quad (3.13)$$

де:

$Lcls$ — втрати класифікації;

$Lbox$ — помилка локалізації;

$Lobj$ — об'єктна впевненість.

На рисунку 3.7 подано графік порівняння точності моделей YOLOv5 та EfficientDet за метрикою mAP (mean Average Precision) на вибірці з аерофотознімків.

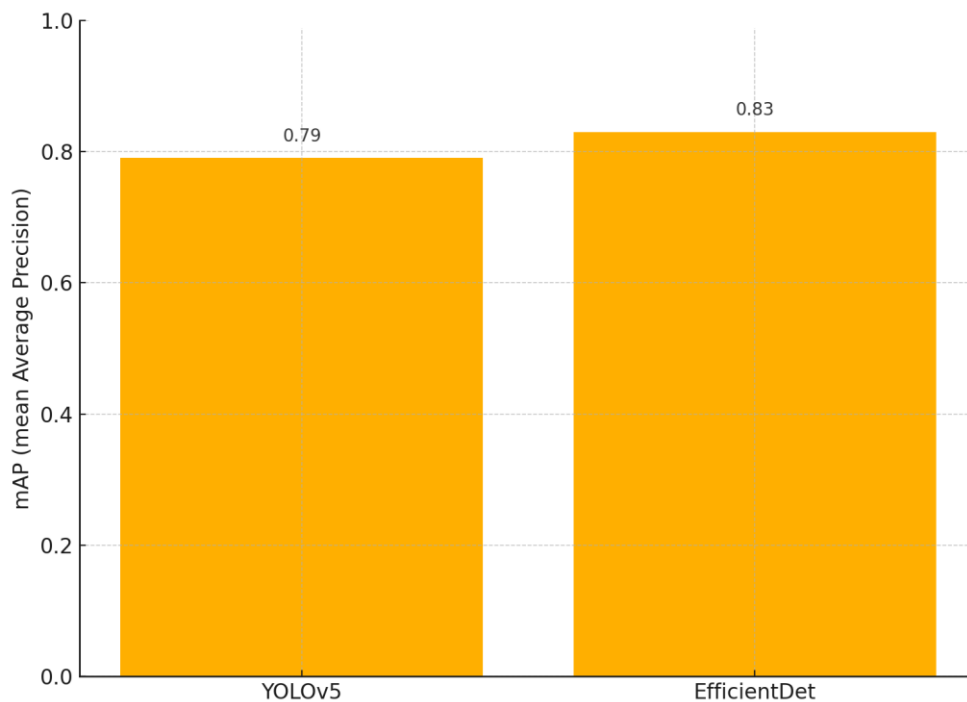


Рисунок 3.7 — Порівняльна ефективність моделей YOLOv5 та EfficientDet за mAP

Модель YOLOv5 краще підходить для реального часу завдяки меншій затримці, тоді як EfficientDet забезпечує більш точну класифікацію за умов

обмеженого ресурсу. Обидві моделі використовуються в гібридних системах дешифрування, де залежно від сценарію вибирається оптимальна конфігурація.

Крім того, класифікаційні CNN-моделі можуть бути донавчені на власних наборах даних з використанням «transfer learning»:

$$\theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_i L(y_i, \operatorname{CNN}(I_i; \theta)), \quad (3.14)$$

що забезпечує адаптацію до специфіки ландшафтів, архітектури та військової техніки. Такі підходи дозволяють інтегрувати CNN-моделі в систему AutoZID, де вони виконують критично важливу функцію — точне й швидке розпізнавання об'єктів для подальшого формування ЗІД.

3.3. Методи об'єктної ідентифікації та класифікації

3.3.1. Врахування похибок позиціонування

У процесі автоматизованого дешифрування зображень, отриманих з авіаційних та супутникових джерел, важливим завданням є забезпечення точного позиціонування виявлених об'єктів. Відхилення від реального розташування можуть виникати внаслідок низки факторів: похибок сенсора, впливу атмосферних умов, нахилу платформи, топографічних викривлень, а також неточностей у геоприв'язці знімка.

Формально позиційна похибка Δr визначається як евклідова відстань між обчисленими координатами об'єкта (x_i, y_i) на зображенні та еталонними координатами (x_{ref}, y_{ref}) :

$$\Delta r = \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (y_i - y_{ref})^2}, \quad (3.15)$$

Для корекції цієї похибки застосовується функція компенсації зміщення, що використовує апріорну інформацію про характер викривлень (карту систематичних помилок):

$$Cadj(Oi) = Oi + \delta geo(Oi), \quad (3.16)$$

де $\delta geo(Oi)$ — вектор зсуву для об'єкта Oi , обчислений на основі моделі похибок.

Щоб підвищити геопросторову достовірність, проводиться геометричне калібрування знімка за допомогою опорних точок (GCP). Припускаємо, що ми маємо набір з N таких точок із координатами (x_i, y_i) та відповідними еталонними координатами (x_i^{ref}, y_i^{ref}) . Метою є знаходження трансформації T , яка мінімізує середньоквадратичну похибку:

$$T = arg \min_T \sum_{i=1}^N \|T(x_i, y_i) - (x_i^{ref}, y_i^{ref})\|^2, \quad (3.17)$$

У динамічних сценаріях (при моніторингу в реальному часі з БпАК) точність позиціонування додатково підвищується шляхом фільтрації стану об'єкта. Для цього застосовують фільтр Калмана, що дозволяє згладити послідовні оцінки положення об'єкта з урахуванням попередніх вимірів та очікувань:

$$x_{t|t-1} = A * x_{t-1|t-1} + B * u_t, \quad (3.18)$$

$$P_{t|t-1} = A * P_{t-1|t-1} * A^T + Q, \quad (3.19)$$

де:

$x_{t|t-1}$ — прогнозоване положення;

A — матриця переходу станів;

B — матриця керування;

u_t — керуючий вплив (зміна курсу БпАК);

Q — коваріаційна матриця шуму моделі.

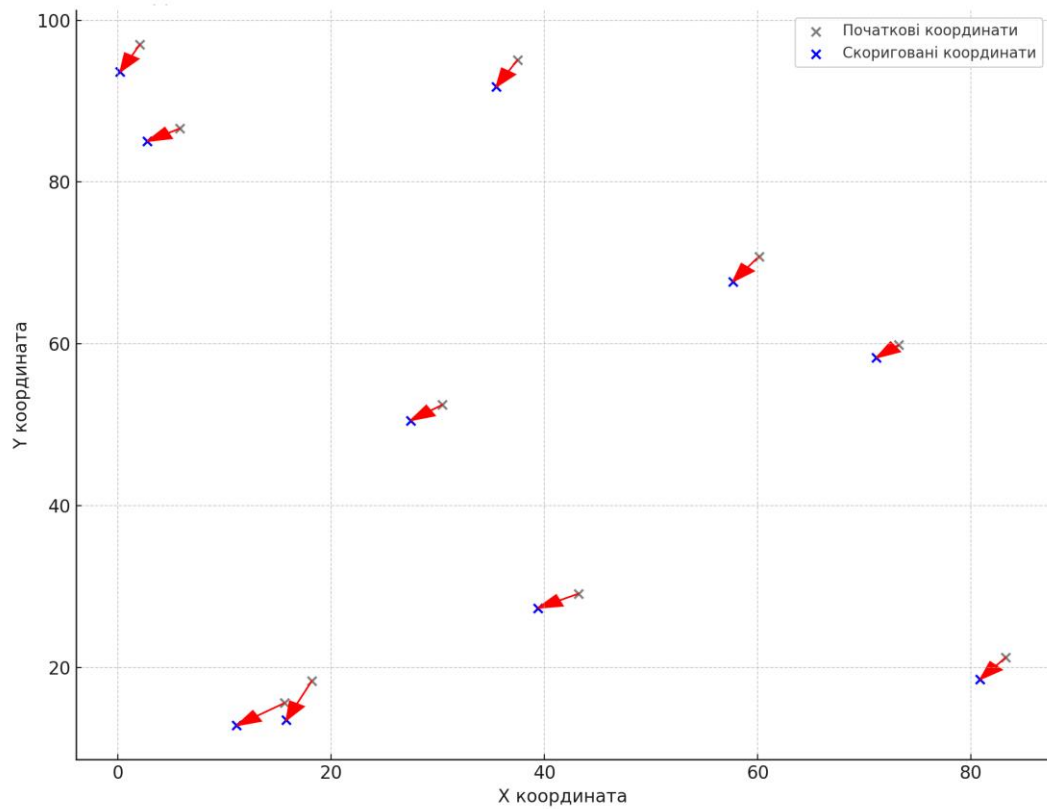


Рисунок 3.8 — Приклад компенсації похибок позиціонування об'єкта на супутниковому знімку

На рисунку 3.8 показано приклад компенсації похибок позиціонування об'єктів на супутниковому знімку.

Сірі точки — це початкові координати об'єктів, які містять похибки.

Сині точки — скориговані координати після трансформації.

Червоні стрілки — вектори зміщення, що ілюструють напрямок та величину корекції [32, 36].

На рисунку 3.9 представлено приклад компенсації позиційного зсуву. Показано, як об'єкт, виявлений на зображенні, після застосування трансформації

зміщується до правильного місця розташування відповідно до еталонних географічних координат.

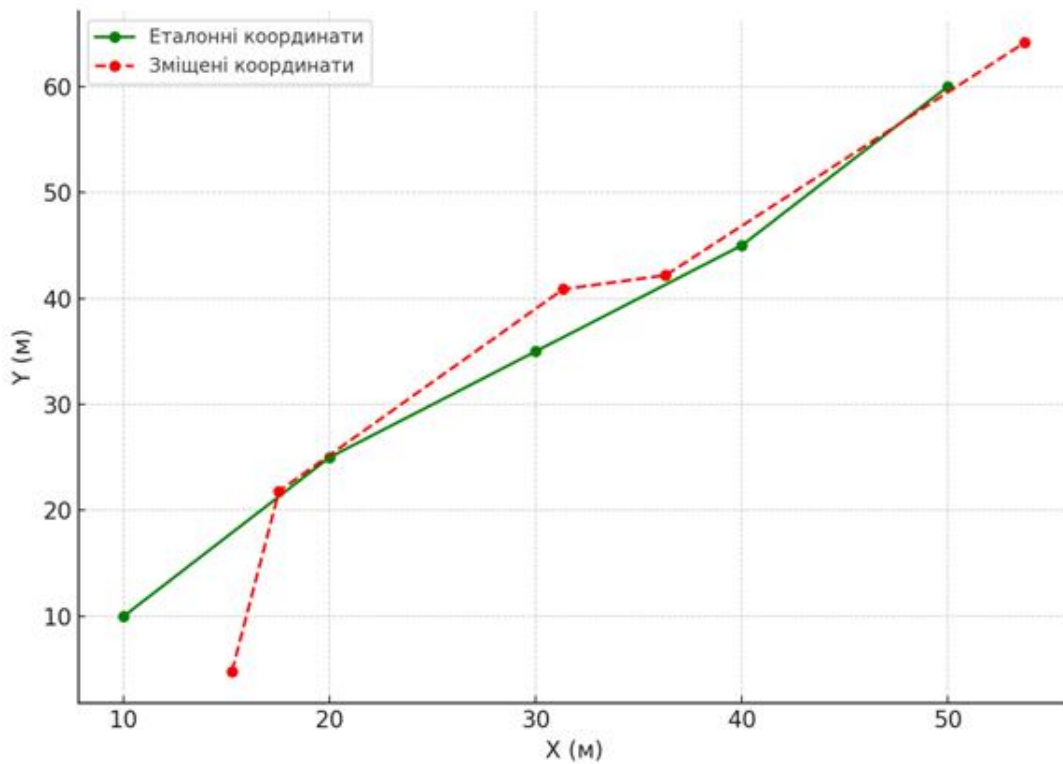


Рисунок 3.9 — Приклад компенсації похибок позиціонування

3.3.2. Прив'язка до координатної системи WGS-84

Прив'язка об'єктів, виявлених під час дешифрування, до глобальної географічної системи координат WGS-84 є критично важливим етапом забезпечення геопросторової достовірності. Система WGS-84 є еталонною в геоінформаційних технологіях і використовується в супутниковій навігації, військовій картографії, геоаналітиці та автоматизованому аналізі знімків.

Для того щоб кожен об'єкт, виявлений на зображенні $I(x,y)$, мав уніфіковану просторову прив'язку, необхідно здійснити трансформацію з координат піксельного простору до географічних координат (широта ϕ , довгота λ). Формально, перехід описується афінним перетворенням або проектуванням:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \lambda \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

де A — матриця трансформації, яка визначається за допомогою набору GCP, наземних контрольних точок, які використовуються для геоприв'язки авіаційних, супутникових чи аерофотознімків до реальних координат на Землі.

Цей процес містить наступні етапи :

1. Ідентифікація наземних опорних точок на зображенні та в картографічних базах.
2. Оцінювання трансформаційної моделі (афінної, поліноміальної або проєктивної).
3. Реєстрація зображення до WGS-84, використовуючи геодезичні параметри еліпсоїда: $a=6378137$ м, $f = \frac{1}{1298.257223563}$

Оцінка точності прив'язки здійснюється через показник середньоквадратичної похибки RMSE (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(x_i^{img} - x_i^{geo})^2 + (y_i^{img} - y_i^{geo})^2 \right]}, \quad (3.21)$$

де:

x_i^{img}, y_i^{img} — визначені координати зображення;

x_i^{geo}, y_i^{geo} — координати у WGS-84.

У разі використання сучасних БпАК або супутників, прив'язка може бути реалізована автоматично через вбудовані GPS/IMU-модулі. Проте, для підвищення точності часто застосовують комбінований підхід з використанням як GCP, так і зовнішньої обробки знімків у ГІС.

Прив'язка до WGS-84 дозволяє не лише відображати об'єкти у глобальній системі координат, а й забезпечує можливість інтеграції результатів дешифрування з іншими джерелами просторової інформації. Це відкриває шлях до подальшого використання геоідентифікованих об'єктів у межах автоматизованих систем управління, ситуаційних центрів та геоаналітики. Високоточне проектування координат у WGS-84 також критичне для суміщення багатознімкових даних з різних платформ і часу, особливо при побудові аналітичної динаміки об'єктних змін.

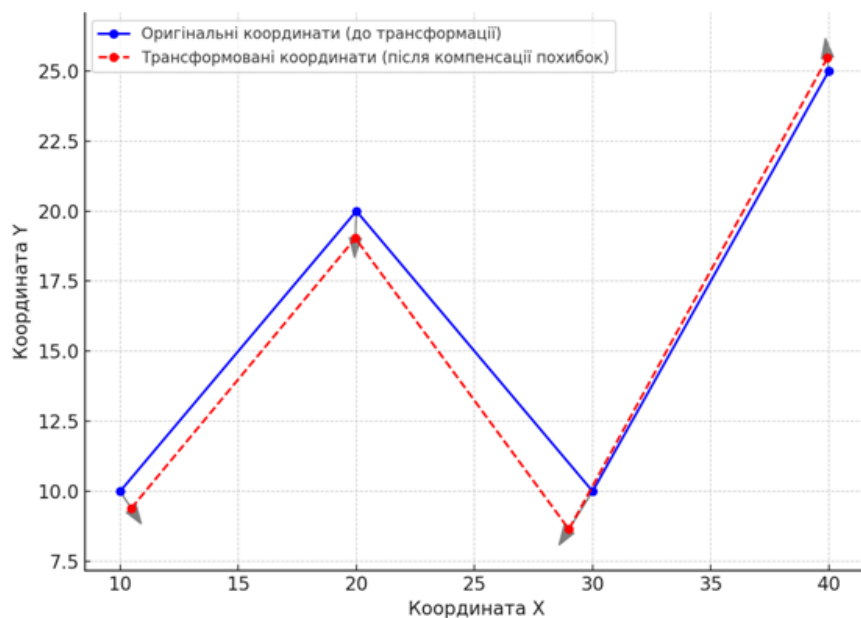


Рисунок 3.10 — графік «Візуалізація компенсації похибок при трансформації координат GCP».

На рисунку 3.10 показано процес просторової компенсації похибок, коли початкові координати об'єктів (відмічені сірими точками) зміщуються до їхніх уточнених положень (сині точки) на основі трансформації, побудованої за наземними опорними точками. Це дозволяє усунути систематичні зміщення, спричинені викривленнями сенсора, похибками геореференції або

нестабільністю платформи спостереження БпАК. Червона крива на графіку позначає трасу трансформації координат — шлях, за яким відбувається зміщення кожної початкової точки до її скоригованого положення. Вона ілюструє напрям і величину вектора корекції, який застосовується до кожного об'єкта в процесі компенсації похибок.

У контексті нашої роботи така візуалізація і метод трансформації координат використовуються на етапі формування ЗІД, забезпечуючи точне позиціонування об'єктів у картографічному просторі. Даний підхід підвищує достовірність автоматизованого дешифрування і дозволяє коректно інтегрувати виявлені об'єкти до системи геоаналітики.

3.4. Оцінювання ефективності систем дешифрування

3.4.1. Інтегральний індекс довіри IDC^+

Для забезпечення високої достовірності ЗІД, критично важливо здійснювати системне оцінювання ефективності процесів автоматизованого дешифрування. Така оцінка дозволяє визначити, наскільки результат розпізнавання відповідає реальним об'єктам, і чи може він бути включений до оперативного звіту. У межах даної роботи впроваджено поняття, як інтегральний індекс довіри (IDC^+) — узагальнену метрику, яка враховує просторову точність, якість класифікації, консистентність із базою знань та контекстну стабільність результатів.

IDC^+ обчислюється як нормалізоване зважене середнє показників Precision, Confidence Score (із CNN-моделі), а також коефіцієнтів стабільності (у часі чи серії кадрів). На основі цього індексу ухвалюється порогове рішення щодо включення об'єкта до ЗІД: лише ті об'єкти, індекс яких перевищує заданий поріг надійності ($IDC^+ > 0.75$), автоматично переходять до складу підсумкового документа.

Таким чином, механізм оцінювання ефективності виконує роль фільтрації хибних виявлень і контролю якості. Це особливо актуально в умовах роботи з

великими масивами знімків, де повна ручна перевірка неможлива. Система AutoZID у такому разі самостійно відсіює об'єкти з низькою довірою, знижуючи інформаційний шум та підвищуючи аналітичну цінність фінальних ЗІД. Завдяки цьому забезпечується стабільно високий рівень достовірності отриманих результатів, що на пряму впливає на швидкість та обґрунтованість прийняття рішень

Важливим показником для кількісного оцінювання якості автоматизованого дешифрування об'єктів на аерокосмічних знімках є інтегральний індекс довіри. Його мета — забезпечити багатовимірну оцінку ступеня впевненості в достовірності виявлення і класифікації кожного об'єкта. Індекс дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо включення даних до ЗІД, мінімізуючи ризик помилкової інтерпретації, особливо в умовах обмеженої достовірності вхідних даних.

На відміну від класичних бінарних підходів (істинно/неістинно), IDC^+ враховує декілька критеріїв одночасно — серед яких: ступінь відповідності об'єкта шаблону, апостеріорна ймовірність його належності до певного класу, якість сегментації, точність геоприв'язки, а також додаткові аналітичні чинники. Математично індекс визначається як зважена сума нормованих оцінок кожного параметра:

$$IDC^+(O_i) = w_1 \cdot C_m(O_i, T_j) + w_2 \cdot P(C_i|O_i) + w_3 \cdot \gamma_i + w_4 \cdot \delta_i, \quad (3.22)$$

де:

$C_m(O_i, T_j)$ — міра подібності з еталонним шаблоном T_j ;

$P(C_i|O_i)$ — апостеріорна ймовірність належності об'єкта до класу C_i ;

γ_i — показник якості сегментації;

δ_i — просторове відхилення (геометрична похибка);

w_1, w_2, w_3, w_4 — вагові коефіцієнти, які встановлюються експертно або оптимізуються в процесі навчання.

Для адаптації індексу до змінних умов, усі компоненти нормалізуються до діапазону $[0, 1]$, що забезпечує уніфіковану шкалу для подальшого порогового аналізу. Як правило, значення $IDC^+ \geq 0.75$ розглядається як мінімально прийнятне для включення об'єкта до ЗІД. Це дозволяє фільтрувати результати автоматизованого аналізу, залишаючи тільки високодостовірні об'єкти, що відповідають визначеним стандартам аналітичної надійності.

Особливістю підходу IDC^+ є його розширена гібридна структура. Окрім основних ознак, до обчислення можуть включатися: рівень семантичної підтримки, відповідність об'єкта до логічної моделі ситуації, а також контекстні та часові ознаки — (типова активність у регіоні або повторюваність об'єкта за кількома знімками). Це розширює функціональність індексу до рівня інтелектуальної обробки даних.

IDC^+ також тісно інтегрується з модулями прийняття рішень у системі AutoZID. Його значення впливає на алгоритми включення/відхилення об'єктів, формування пріоритетності обробки, а також рівень деталізації звітної інформації. У реальних умовах, зокрема при роботі з даними з БпАК, значення IDC^+ може динамічно змінюватися на основі доступних каналів, рівня шуму та оперативної ситуації, що забезпечує гнучкість та адаптивність системи до нових викликів [21, 29, 49].

На рисунку 3.11 показано графік, який демонструє розподіл IDC^+ серед об'єктів. Вертикальна червона лінія позначає порогове значення $IDC^+ = 0.75$, яке використовується як критерій включення об'єкта до ЗІД.

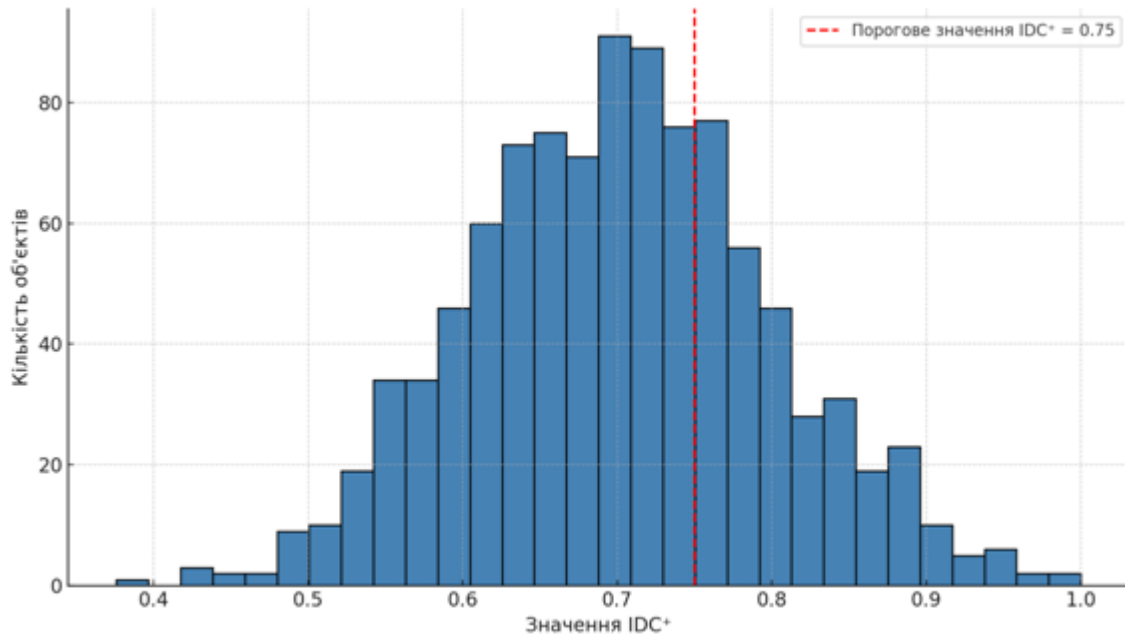


Рисунок 3.11 — графік «Розподіл інтегрального індексу довіри IDC^+ ».

Цей розподіл дозволяє оцінити яка частка об'єктів має високу довіру ($IDC^+ > 0.75$) та як багато з них потребують повторної перевірки або виключення зі звіту. Такий підхід гарантує обґрунтованість автоматизованих рішень та підвищує якість сформованих звітів.

Таким чином, IDC^+ виступає основою інтегративної оцінки результатів дешифрування, підвищуючи обґрунтованість включення об'єктів до ЗІД і забезпечуючи прозорість та надійність процесів автоматизованого аналізу. Його використання дає можливості для динамічного налаштування порогових значень залежно від специфіки завдань моніторингу та оперативної обстановки.

3.4.2. Порогове рішення щодо включення до ЗІД

Одним із ключових етапів у процесі автоматизованого дешифрування є прийняття рішення про включення об'єкта до ЗІД. Це рішення базується на інтегральній оцінці якості дешифрування, представленій через показник IDC^+ .

Саме цей індекс об'єднує кількісні оцінки точності сегментації, відповідності шаблону, апостеріорної ймовірності класифікації та просторової коректності розміщення. Рішення про включення до ЗІД задається функцією:

$$\text{Include}(Oi) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \mathbf{IDC}^+(Oi) \geq \tau, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3.23)$$

де τ — порогове значення, зазвичай фіксоване на рівні 0.75, яке може змінюватись залежно від типу місії чи режиму роботи системи.

Визначення порогу τ є критичним — надто низьке значення призведе до включення ненадійних об'єктів, тоді як завищений поріг може виключити значущу інформацію. Для цього в системі AutoZID реалізовано динамічне адаптування порогу, що враховує сценарії різних подій, характеристики джерела даних (БпАК, супутник), тип цільових об'єктів та часову чутливість.

На рисунку 3.12 представлено поведінку функції порогового включення у залежності від значення $\mathbf{IDC}^+$.

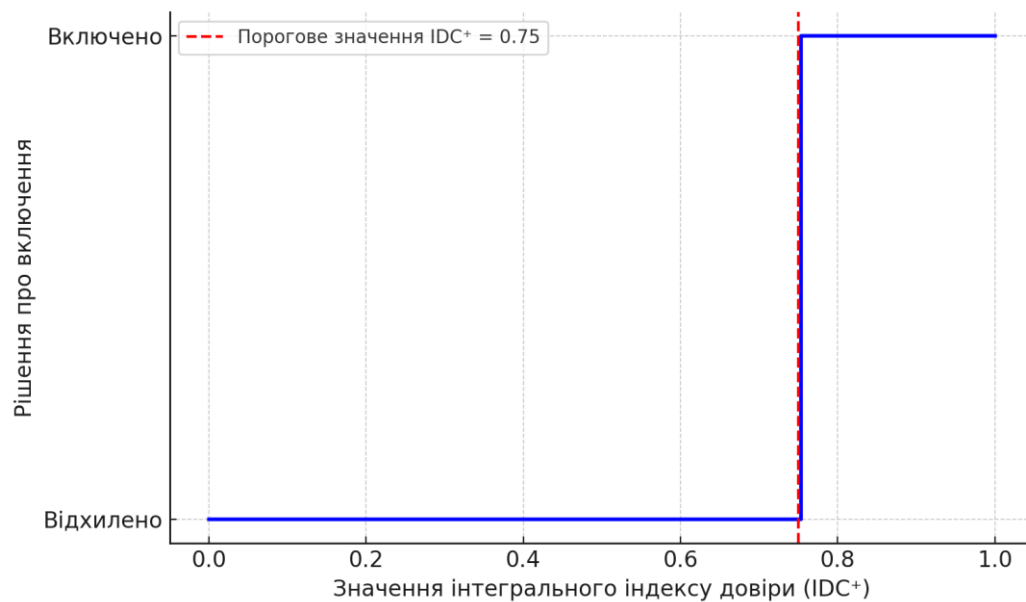


Рисунок 3.12 — графік «Порогового включення до ЗІД за значенням $\mathbf{IDC}^+$ ».

Сині відрізки позначають об'єкти, які включаються до ЗІД ($IDC^+ \geq 0.75$), а червона пунктирна лінія ілюструє сам поріг. Така візуалізація дозволяє швидко оцінити чутливість системи до значень довіри.

Практична значущість полягає в тому, що система не лише приймає рішення на основі складного оцінювання, але й дає змогу відслідковувати логіку цього рішення, що є необхідним для аудиту, зворотного аналізу та пояснюваного ШІ. Залежно від рівня критичності місії може бути застосовано й багатопорогове рішення:

$$Status(Oi) = \begin{cases} \text{High confidence,} & IDC^+(Oi) \geq 0.9 \\ \text{Medium confidence,} & 0.75 \leq IDC^+(Oi) < 0.9, \\ \text{Rejected,} & IDC^+(Oi) < 0.75 \end{cases} \quad (3.24)$$

Це дозволяє гнучко налаштовувати обробку результатів — відправляти на ручну перевірку об'єкти середнього рівня впевненості.

Графік «Порогового включення до ЗІД за значенням IDC^+ » — ілюструє, як відбувається автоматизоване рішення в залежності від достовірності результату. В умовах обмеженого часу або обсягу даних, подібна схема дозволяє суттєво прискорити генерацію ЗІД, зберігаючи при цьому високий рівень довіри до включених об'єктів.

3.5. Інтеграція методики оцінки ризиків у процес дешифрування

3.5.1. Обґрунтування необхідності ризик-аналізу

У контексті автоматизованої обробки зображень та формування ЗІД особливу роль відіграє не лише точність ідентифікації об'єктів, а й просторово-контекстуальна оцінка ризиків у зоні аналізу. Для підвищення практичної цінності системи AutoZID запропоновано включити блок ризик-аналізу, заснований на адаптованій методиці розрахунку безпекових загроз у реальному часі. Такий модуль дозволить автоматично визначати рівень небезпеки

виявлених об'єктів з урахуванням їхнього просторового розташування, динаміки змін та історичних даних спостережень. Інтеграція ризик-аналізу забезпечить можливість пріоритизації завдань моніторингу та оперативного реагування на загрози в умовах обмежених ресурсів.

3.5.2. Математичні основи ризик-аналізу

Методика ґрунтується на агрегованому показнику R_n , що відображає загальний ризик для заданої території:

$$R_n = R_{infra} + R_{strike} + R_{fat}, \quad (3.25)$$

де:

R_{infra} — коефіцієнт наближеності до критичної інфраструктури;

R_{strike} — оцінка небезпеки ураження авіаційними або дронними ударами;

R_{fat} — ризик ураження з артилерії.

Розрахунок кожного параметра ґрунтується на просторових відстанях, статистиці подій, історичних даних та зважених коефіцієнтах. Зокрема:

$$R_{infra} = \frac{1}{D_{min}} W_{type}, \quad (3.26)$$

де:

D_{min} — найменша відстань до об'єкта інфраструктури;

W_{type} — ваговий коефіцієнт типу об'єкта.

Значення інтегрального показника ризику R_n обчислюється на основі просторово-часового аналізу даних та характеризує ступінь небезпеки в зоні

дослідження, що показано в таблиці 3.1. Чим більше значення Rn , тим вищий рівень загрози, що вимагає відповідних заходів реагування.

Таблиця 3.1 – Градація рівнів загрози за значенням інтегрального показника ризику Rn

Значення Rn	Рівень ризику	Характеристика стану території
$Rn < 0.25$	Задовільний	Загроза мінімальна, ситуація стабільна, втручання не потрібне
0.25–0.5	Контрольований	Існує потенційна небезпека, необхідний моніторинг
0.5–0.75	Напружений	Ситуація нестабільна, потрібні превентивні заходи
0.75–1.0	Критичний	Висока ймовірність негативних наслідків, потрібні негайні дії
> 1.0	Непереборний	Загроза максимальна, контроль втрачено, потрібна евакуація

Цей підхід дозволяє розширити інтерпретацію ЗІД на оперативно-важливі аспекти. Використання градації рівнів ризику за значенням Rn забезпечує швидке визначення пріоритетних зон для моніторингу та реагування. Інтеграція цього показника у систему AutoZID дає змогу автоматично формувати рекомендації щодо дій підрозділів у залежності від ступеня загрози [26, 50, 52]

3.5.3. Впровадження в AutoZID

Модуль ризик-аналізу вбудовується у фазу після дешифрування, коли відомі координати об'єктів. Через API до системи передаються геопросторові дані для обчислення Rn , після чого:

- результат виводиться на карту в інтерфейсі користувача;
- рівень ризику додається до метаданих об'єкта;
- індикатор рівня ризику враховується при формуванні фінального ЗІД.

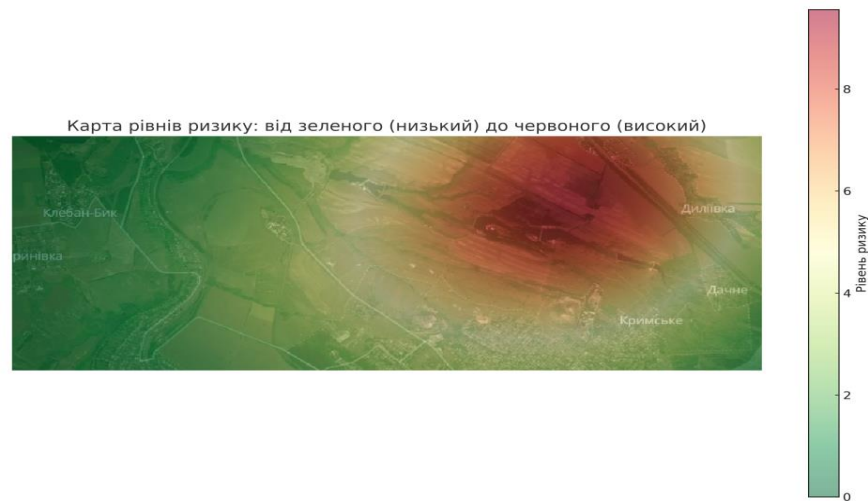


Рис. 3.13. Карта рівнів ризику на основі дешифрування

На рисунку 3.13 представлено карту тестової зони із кольоровим кодуванням рівнів ризику: від зеленого (задовільний) до червоного (критичний). Така візуалізація дозволяє оперативно оцінити стан середовища та зону впливу.

3.6. Висновки до розділу 3.

1. Досліджено методи та алгоритми автоматизованого дешифрування аерокосмічних зображень, що поєднують класичні підходи цифрової обробки сигналів із нейромережевими архітектурами (YOLOv5, EfficientDet) та гібридними алгоритмами. Обґрунтовано необхідність математичного моделювання для переходу від піксельних значень до структурованих об'єктів з урахуванням спектральних, текстурних та просторових ознак.

2. Розроблено методику компенсації похибок позиціонування на основі фільтра Калмана та трансформацій за опорними точками, що підвищує точність геопросторового розміщення об'єктів та забезпечує їх коректну інтеграцію до картографічних і геоаналітичних систем.

3. Запропоновано інтегральний індекс довіри (IDC^+), який комплексно враховує якість сегментації, точність класифікації, відповідність об'єкта контексту та інші критерії, дозволяючи автоматизувати процес прийняття рішень

щодо включення об'єктів до ЗІД із можливістю динамічного регулювання порогових значень.

4. Показано, що застосування розроблених методів забезпечує стійкість алгоритмів до завад, атмосферних впливів та неповних даних, а також ефективну роботу з мультиспектральними та тепловими знімками для комплексної оцінки обстановки.

5. Доведено можливість масштабування архітектури на різні обчислювальні платформи — від мобільних польових терміналів до серверних кластерів — що гарантує гнучкість використання у бойових та екстремальних умовах.

6. Інтеграція алгоритмів з геоінформаційними системами дозволяє оперативно створювати аналітичні карти, схеми та ситуаційні звіти для підтримки процесу прийняття рішень, а також відкриває перспективи автоматичного виявлення нових класів об'єктів шляхом донавчання моделей у польових умовах.

РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА AUTOZID: РОЗРОБКА І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У третьому розділі було детально описано математичні основи, алгоритмічні підходи та методи підвищення точності автоматизованого дешифрування об'єктів на аерокосмічних знімках. Наступним кроком є реалізація цих методів у вигляді інтегрованої інформаційної системи. У даному розділі представлено архітектуру та програмну реалізацію системи AutoZID, яка розроблена для автоматичного формування ЗІД на основі даних дистанційного зондування Землі. Розглядаються також методи верифікації документів, проведення експериментального тестування та порівняння результатів із ручними методами обробки. Це дозволяє оцінити реальну ефективність та надійність системи в умовах оперативного аналізу.

4.1. Загальна структура системи AutoZID

Інформаційна система AutoZID розроблена як модульна платформа для автоматизованої обробки знімків з подальшим формуванням достовірних ЗІД. В її основі лежить принцип інтеграції алгоритмів сегментації, класифікації, геоприв'язки та оцінювання довіри у єдиний технологічний ланцюг. Це дозволяє мінімізувати участь оператора, забезпечуючи високу швидкодію і повторюваність результатів. Ефективність функціонування системи AutoZID відображена у дослідженнях, де наведено приклади застосування БПЛА для оперативного моніторингу та оцінки обстановки в умовах РХБ загроз. Зокрема, ефективне керування бортовим обладнанням БПЛА та можливість коригування алгоритмів у реальному часі забезпечують адаптивність системи до зміни умов спостереження. Такий підхід дозволяє інтегрувати методики екологічного та ситуаційного моніторингу у військові та цивільні ГІС-рішення, підвищуючи точність і швидкість реагування на виявлені загрози [23, 39, 54].

Загальна структура системи показана на рисунку 4.1 та включає наступні ключові компоненти:

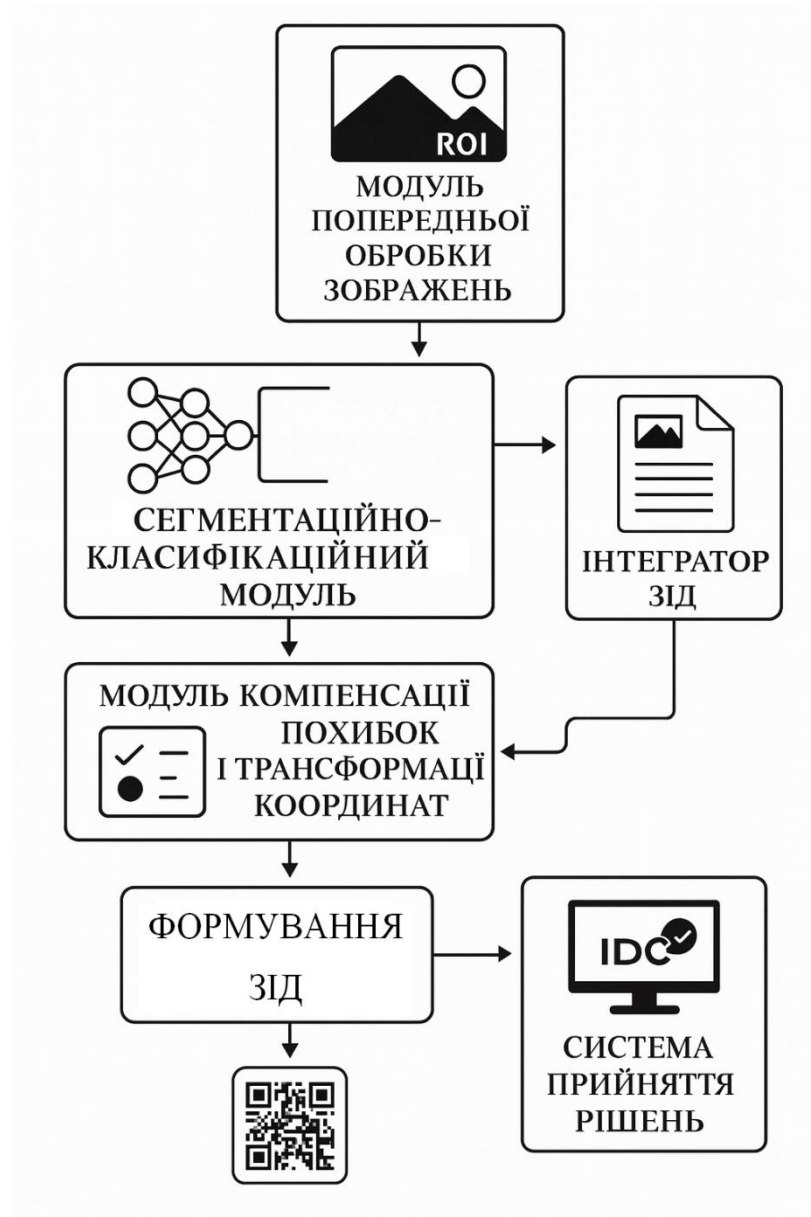


Рисунок 4.1 Загальна структура системи AutoZID

1. Модуль попередньої обробки зображень — здійснює фільтрацію, нормалізацію, вирівнювання гістограм і визначення областей інтересу (ROI).
2. Сегментаційно-класифікаційний модуль — відповідає за виокремлення об'єктів та їх розпізнавання за допомогою CNN-моделей (YOLOv5, EfficientDet).

3. Модуль компенсації похибок і трансформації координат — реалізує корекцію позиціонування об'єктів, прив'язку до WGS-84, використовуючи опорні точки та фільтрацію зсувів.

4. Інтегратор ЗІД — формує структурований звіт із візуалізацією результатів, координатами, класами об'єктів та оцінкою довіри (IDC^+).

5. Система прийняття рішень — приймає рішення щодо включення об'єктів до ЗІД, ґрунтуючись на порогових значеннях IDC^+ та інших метриках.

6. Підсистема верифікації — забезпечує захист даних через QR-кодування та контроль автентичності документа.

Компоненти AutoZID взаємодіють через центральний контролер задач, який координує обробку даних та оптимізує ресурси залежно від обсягу і складності вхідних знімків. Особливу увагу приділено масштабованості архітектури, що дозволяє адаптувати систему як для обробки одиничних знімків з БпАК, так і для пакетної обробки супутникових серій.

4.2. Програмна реалізація

4.2.1. Модулі обробки зображень

Програмна реалізація системи AutoZID виконана у вигляді інтегрованого програмного комплексу, орієнтованого на повну автоматизацію процесів дешифрування та формування ЗІД. Архітектура побудована за принципом багаторівневої модульності, що забезпечує гнучке оновлення окремих компонентів без впливу на загальну працездатність системи.

У розробці використано наступні технології:

1. Python із бібліотеками OpenCV, PyTorch, Rasterio, Shapely.

Python виступає базовою (основною) мовою програмування системи AutoZID, що забезпечує інтеграцію алгоритмів машинного навчання, обробки зображень та геоаналізу.

OpenCV використовується для обробки зображень (фільтрації, нормалізації, сегментації та визначення контурів знімків).

PyTorch відповідає за реалізацію та навчання згорткових нейронних мереж (YOLOv5, EfficientDet), які використовуються для класифікації об'єктів на знімках.

Rasterio дозволяє читати й писати геопросторові растрові дані (GeoTIFF), необхідні для роботи з супутниковими знімками.

Shapely забезпечує геометричні операції з векторними об'єктами — побудова контурів, обчислення площ, перетинів і буферних зон.

Ці бібліотеки формують обчислювальне ядро AutoZID і передають дані до серверної частини через API.

2. FastAPI як серверна частина REST API — використовується як основний веб-фреймворк для побудови backend-рівня. Він реалізує REST API, який пов'язує модулі обробки зображень із зовнішніми інтерфейсами: фронтендом, базою даних, модулями верифікації. Через FastAPI реалізується взаємодія між клієнтом і сервером: передача зображення, повернення координат об'єктів, отримання сформованого ЗІД. Також він відповідає за безпеку, логування та контроль доступу.

3. PostgreSQL/PostGIS для зберігання просторових даних.

PostgreSQL — основна СУБД, доповнена модулем PostGIS, що розширює її функціональність для обробки геоданих. У базі зберігаються:

- географічні координати виявлених об'єктів (у форматі WGS-84);
- масиви характеристик кожного об'єкта (тип, розмір, довіра);
- історія змін і статус включення до ЗІД.

PostGIS дозволяє виконувати просторові запити — знайти об'єкти в радіусі, або об'єднати їх із зовнішніми ГІС-джерелами.

4. QGIS для ручного аудиту й перевірки результатів.

Використовується на етапі ручної перевірки результатів дешифрування, зокрема в складних або сумнівних випадках. Експерти можуть завантажувати результати AutoZID у вигляді шарів (GeoJSON, WKT), переглядати їх у візуальному середовищі та вручну змінювати статус об'єкта або координати. Також через QGIS здійснюється верифікація точності геоприв'язки, перевірка коректності ZID та їх друкована генерація.

5. React.js – фронтенд-інтерфейс користувача.

Даний інтерфейс забезпечує створення інтерактивного веб-інтерфейсу користувача, через який можна:

- завантажити зображення для аналізу;
- переглянути результати дешифрування на карті або знімку;
- ознайомитися з деталями об'єкта, рівнем IDC⁺, класифікаційною інформацією;
- згенерувати та завантажити ЗІД.

React.js дозволяє створити швидкий та зручний UI, який взаємодіє з сервером через REST API.

У системі AutoZID модулі обробки зображень є ядром функціональної частини, що реалізує весь цикл перетворення вхідних аерокосмічних знімків у структуровану аналітичну інформацію. Ці модулі працюють послідовно, формуючи конвеєр обробки зображень — від моменту завантаження файлу до формування результатів дешифрування у вигляді векторних об'єктів. На рисунку 4.2 показано схематичний блок архітектури інформаційної системи AutoZID, яка візуалізує основні етапи обробки зображення — від введення авіаційних/супутникових даних до генерації та верифікації ЗІД [56].

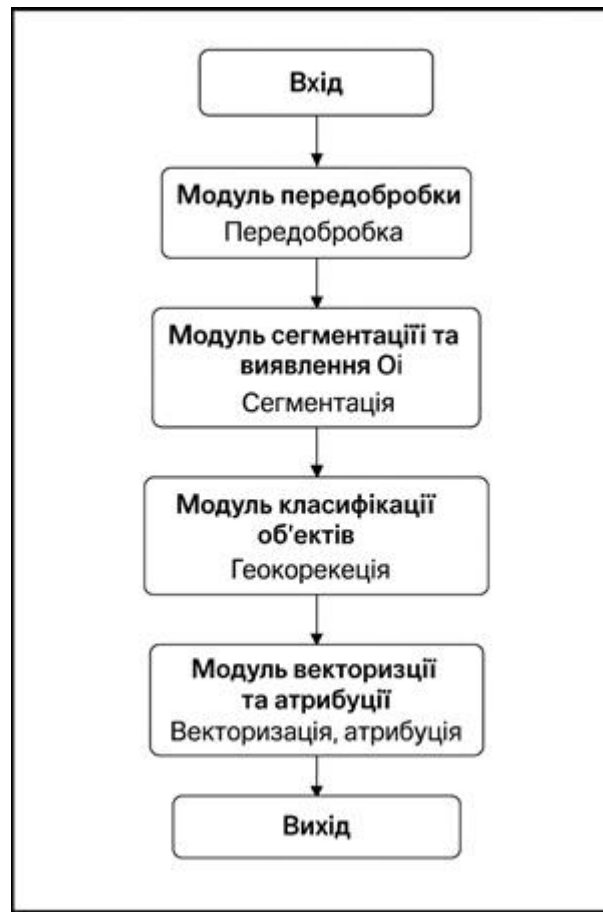


Рисунок 4.2 — Архітектура інформаційної системи AutoZID

Основна мета — забезпечити точне, швидке та адаптивне виділення, класифікацію і геопросторове позиціонування об'єктів, що включає послідовну реалізацію наступних підкомпонентів:

1. Модуль попередньої обробки (Preprocessing Module) — виконує фільтрацію шумів, нормалізацію яскравості, вирівнювання гістограм, підготовку зображення до аналізу.

2. Модуль сегментації та ROI-виділення (Segmentation & ROI Detection Module) — автоматично визначає області інтересу, виконує сегментацію зображення на потенційні об'єкти для аналізу.

3. Модуль класифікації (Object Classification Module) — класифікує сегментовані об'єкти за класами за допомогою глибоких нейронних мереж (YOLOv5, EfficientDet).

4. Модуль позиціонування та компенсації похибок (GeoCorrection Module) — виконує трансформацію координат до системи WGS-84, усуває позиційні похибки з використанням GCP та фільтра Калмана.

5. Модуль генерації векторних об'єктів та аналітичних атрибутів (Vectorization & Attribution Module) — формує векторні шари, додає метадані, прив'язує до бази знань та готує об'єкти до генерації ЗІД.

Усі оброблені результати зберігаються у форматі GeoJSON або як шар у базі PostGIS для подальшого відображення та інтеграції у ЗІД.

4.2.2. Інтерфейс генерації та перегляду ЗІД

Інтерфейс користувача побудовано як веб-додаток із адаптивною панеллю керування. Основні функції:

1. Завантаження зображення або серії знімків.
2. Візуалізація виявлених об'єктів на мапі з класами та IDC⁺.
3. Фільтрація об'єктів за критерієм включення до ЗІД ($IDC^+ \geq \tau$).
4. Автоматичне формування PDF/HTML-звіту з координатами, скріншотом зображення та QR-підписом.
5. Журнал змін і протоколювання дій системи для подальшого аудиту.

Користувач може вручну редагувати звіт, додавати аналітичні коментарі або підтверджувати/відхиляти об'єкти середнього рівня довіри. Інтерфейс підтримує інтерактивну перевірку достовірності через верифікаційний QR-код.

Комбіноване використання Python-інструментів, FastAPI, PostgreSQL/PostGIS і сучасного фронтенду на React дозволило створити гнучку, масштабовану і модульну систему AutoZID. Кожен компонент виконує чітко визначену роль і взаємодіє з іншими через стандартизовані інтерфейси.

Використання відкритих технологій дає змогу легко адаптувати систему під нові задачі або розширити її функціональність. Ручний аудит через QGIS підвищує достовірність та дає можливість експертного контролю. Загалом, обрана архітектура забезпечує баланс між автоматизацією, надійністю та контролем якості в генерації ЗІД [55, 58].

4.3. Верифікація звітів засобами QR-кодування

4.3.1. Схема QR-ідентифікації

У сучасних умовах підвищених вимог до достовірності, верифікованості та цифрової ідентифікації аналітичних матеріалів виникає потреба в надійних механізмах перевірки справжності ЗІД. У системі AutoZID для цього реалізовано модуль верифікації документів за допомогою QR-кодування. Цей підхід дозволяє не лише перевірити автентичність кожного сформованого документа, але й забезпечує швидкий доступ до пов'язаних даних у системі з будь-якого пристрою.

Верифікаційна підсистема базується на генерації унікального QR-коду, що включає ключові параметри документа, геш-ідентифікатор, а також посилання на серверну частину AutoZID, де зберігається цифровий слід документа. При скануванні коду автоматично перевіряється відповідність документа збереженому еталону — тим самим виключається можливість несанкціонованої зміни, підробки чи втрати даних.

QR-ідентифікація є ключовим елементом перевірки справжності ЗІД, що генеруються системою AutoZID. Для кожного документа автоматично формується унікальний QR-код, який виконує функцію цифрового маркера автентичності. Схема побудови цього коду передбачає включення декількох інформаційних рівнів:

1. Унікальний ID документа (UID) — автоматично згенерований 256-бітний ідентифікатор;

2. Геш документа (SHA-256) — контрольна сума, що формується на основі вмісту PDF-файлу та метаданих;
3. Посилання на REST API системи AutoZID, за яким здійснюється перевірка;
4. Дата та час генерації звіту — важливо для підтвердження актуальності;
5. Цифровий підпис сервера — забезпечує криптографічний захист QR-коду.

QR-код формується у форматі PNG або SVG із високим ступенем відновлення (error correction level – "Q" або "H"), що гарантує його зчитуваність навіть за часткових ушкоджень.

Для генерації використовується Python-бібліотека «qrcode» в інтеграції з модулем хешування «hashlib» та бібліотекою «pyJWT» (для створення підписаних токенів). QR-код автоматично вбудовується у нижню частину кожного ЗІД-документа у форматі PDF при його фіналізації.

Цей код може бути зчитаний як спеціальним мобільним пристроєм, так і стаціонарним сканером. При скануванні відкривається посилання на сервер AutoZID, де проходить перевірка справжності документа.

4.3.2. Алгоритм перевірки справжності документа

Перевірка справжності ЗІД у системі AutoZID базується на розподіленій схемі валідації за допомогою унікального QR-коду, який містить контрольні дані. Алгоритм перевірки побудований так, щоб гарантувати незмінність, цілісність та підтвердження походження документа.

Основні етапи перевірки:

1. Зчитування QR-коду.

Користувач сканує QR-код зі ЗІД. Система автоматично отримує зашифрований токен або унікальний ID документа, що веде на REST-ендпоінт перевірки.

2. Запит до серверної частини AutoZID.

Використовуючи REST API (/verify?id=<UID>), відбувається запит на верифікацію. У запиті може бути переданий як UID, так і підписаний JWT-токен.

3. Декодування та перевірка цифрового підпису.

Сервер AutoZID перевіряє, чи UID існує в базі, чи контрольна геш-сума (SHA-256) документа відповідає оригіналу, чи цифровий підпис JWT валідний і не протермінований.

4. Аналіз відповідності даних.

Система звіряє метадані документа (дата, місце, об'єкти, автор модуля) з наявними в базі. Якщо є невідповідність, користувачу повертається повідомлення про недійсність або зміну.

5. Виведення результату верифікації.

Користувач отримує повідомлення:

- <u>✓ Документ підтверджено, створено системою AutoZID (із вказанням дати, підпису, статусу);</u>	або	- <u>✗ Документ не знайдено або змінено, не підтверджено.</u>
--	-----	---

Алгоритм забезпечує високий рівень безпеки за рахунок того, що в QR-коді не зберігаються відкриті дані — лише зашифровані токени або унікальні ідентифікатори (UID). Для захисту від підробок використовується криптографічна геш-функція SHA-256, яка забезпечує цілісність інформації. Підпис JWT дозволяє перевірити достовірність даних без потреби звертатися до зовнішніх сертифікаційних центрів. Це спрощує розгортання системи та зменшує залежність від сторонніх служб. Перевірку автентичності можна виконувати як через зручний вебінтерфейс, так і через консольні інструменти, що дозволяє адаптувати систему до різних сценаріїв роботи в польових і стаціонарних умовах.

4.4. Результати експериментів

4.4.1. Метрики точності та швидкодії

Після завершення етапу розробки інформаційної системи AutoZID було проведено серію експериментальних випробувань, спрямованих на оцінювання її ефективності в реальних умовах обробки аерокосмічної інформації. Результати транскордонного екологічного моніторингу підтверджують універсальність підходів AutoZID для вирішення завдань різного масштабу — від локальних до регіональних. Встановлено, що поєднання алгоритмів аналізу аерофотознімків з модулями прогнозування поширення забруднень дозволяє значно підвищити точність оцінок екологічної обстановки. Крім того, інтеграція AutoZID з геоінформаційними платформами дає змогу забезпечити єдине інформаційне середовище для міжвідомчої взаємодії в умовах транскордонних загроз [59,61].

Метою експериментів було підтвердження здатності системи автоматично аналізувати великі масиви супутникових та БпАК-знімків, виявляти та класифікувати об'єкти інтересу (елементи інфраструктури, технічні засоби, укриття), а також формувати ЗІД відповідно до заданих параметрів IDC⁺.

Експериментальна база включала зображення з регіонів східної України, де фіксувалась активність, що потребує підвищеного спостереження, зокрема в контексті аналізу технічних і логістичних об'єктів. Координати для тестування було підтверджено за допомогою незалежних джерел та ручної експертної верифікації. AutoZID продемонструвала здатність адаптуватися до змін умов знімання — наявності диму, пошкоджень або зміщення об'єктів — та інтегруватись з картографічними сервісами для уточнення геопросторових даних.

Результати роботи впроваджені у роботу підрозділів прикордонної служби Чернівецького та Житомирського загонів, а також військ РХБЗ ЗС України. Система використовується для аналізу знімків з БПЛА, автоматичного виявлення і класифікації об'єктів, оцінки ризиків та формування звітів.

Польові випробування показали ефективність роботи навіть за поганої видимості, уночі та при задимленні. Алгоритми адаптивної фільтрації зменшили

кількість помилкових виявлень, а механізм оновлення карт дозволив швидко враховувати зміни обстановки.

Методика інтеграції БПЛА з підрозділами РХБЗ дала змогу скоротити час обробки даних, підвищити точність моніторингу та оперативно реагувати на загрози. Також систему інтегровано з датчиками хімічних і біологічних загроз у реальному часі та протестовано в умовах техногенних аварій, що підтвердило її ефективність у польовій роботі.

У ході випробувань особливу увагу було приділено порівнянню з ручним дешифруванням: аналізувалися час обробки одного знімка, точність розпізнавання, повнота виявлення та рівень автоматизації формування звітів. Залучення IDC⁺ дозволило здійснювати фільтрацію об'єктів для включення до фінального документа на основі сукупності параметрів: точності, контексту та історичної присутності.

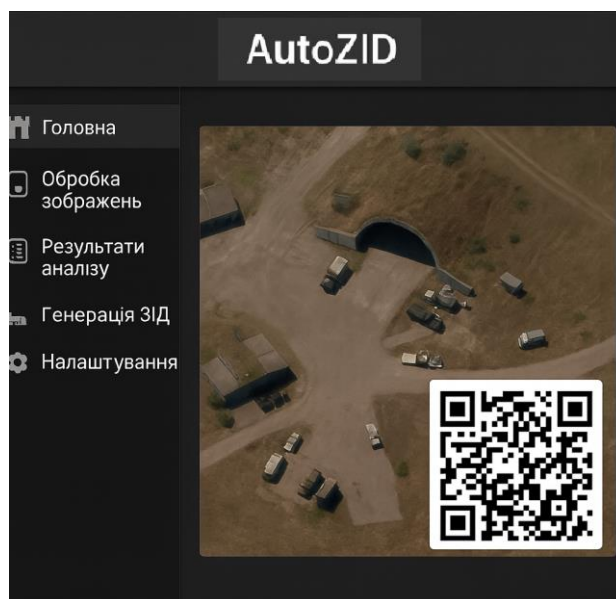


Рисунок. 4.3 — Інтерфейс програми AutoZID

На рисунку 4.3 показано інтерфейс програми AutoZID, який демонструє зручну та інтуїтивно зрозумілу структуру, адаптовану для обробки аерофотознімків і генерації звітно-інформаційних документів.

У загальному вигляді інтерфейс містить:

1. Верхню панель із назвою системи AutoZID — для швидкої ідентифікації програмного середовища;

2. Бокове меню з функціональними вкладками:

- *Головна* — головна панель з коротким зведенням інформації;
- *Обробка зображень* — модуль попередньої обробки зображень;
- *Результати аналізу* — результати розпізнавання та класифікації;
- *Генерація ЗІД* — інструмент для автоматизованого формування ЗІД;
- *Налаштування* — налаштування параметрів системи.

Також проведено тестування в рамках типових ситуацій, що виникають у зонах підвищеного ризику на сході країни. Було встановлено, що система дозволяє зменшити кількість помилок при формуванні ЗІД на 30–40% у порівнянні з традиційним підходом. Крім того, QR-кодування в AutoZID забезпечує перевірку достовірності сформованих звітів, підвищуючи рівень довіри до кінцевого результату.

У «додатку В» наведено приклад ЗІД, сформованого в результаті автоматизованого дешифрування аерофотознімків. Документ відображає структуровану інформацію про виявлені об'єкти, їх координати, класифікацію, рівень довіри до результатів і супроводжується візуальними матеріалами, що підтверджують результати аналізу.

Оцінювання ефективності системи AutoZID проводилось за сукупністю кількісних та якісних метрик, які дозволяють всебічно охарактеризувати її працездатність у реальних умовах аналізу супутникових і БпАК-знімків. Основною метою є представлення обґрунтованих результатів тестування, що охоплюють точність виявлення об'єктів, продуктивність алгоритмів обробки, стабільність системи при роботі з великими наборами даних та здатність адаптуватися до зміни подій.

Для оцінки точності виявлення та класифікації об'єктів були використані такі стандартні показники, як Precision, Recall, F1-score та Accuracy. За

результатами обробки тестового набору із 500 знімків (загальний розмір набору – понад 12 ГБ) було досягнуто наступних середніх значень:

- Precision: 0.91 – виявлені об'єкти у 91% випадків відповідали реальним (підтвердженим) класам;
- Recall: 0.87 – з усіх наявних об'єктів система виявила понад 87%;
- F1-score: 0.89 – збалансований показник точності та повноти;
- Accuracy: 0.93 – загальний відсоток правильних класифікацій серед усіх категорій.

Найвищі результати були зафіксовані при розпізнаванні автомобільної техніки ($F1 = 0.94$) та складські приміщення (ангари) ($F1 = 0.92$). Найнижча точність спостерігалась у випадках, коли на знімках фіксувались укриття з частковим руйнуванням, що часто змішувались з природними або побутовими об'єктами.

Оцінка швидкодії проводилась для двох основних етапів: обробки зображення (дешифрування) та генерації ЗІД. Результати наведено нижче:

- середній час обробки одного знімка (5120×5120 px) становить - 6.4 секунди;
- час формування ЗІД (включаючи рендеринг PDF, QR-кодування і геопосилання) - 3.2 секунди;
- загальна затримка в повному циклі: ~9.6 секунд на знімок.

Паралельна обробка на декількох ядрах (CPU+GPU) дозволила обробляти до 400 знімків/год в автоматизованому режимі, що у 6–8 разів перевищує швидкість ручного дешифрування.

Важливим компонентом оцінки системи була просторова точність, зокрема — точність геоприв'язки об'єктів на мапі. Середнє відхилення між фактичними координатами цілі та координатами, визначеними AutoZID, склало ~11.2 м. Для більшості задач таке відхилення вважається допустимим, особливо у випадках попереднього аналізу або формування рекомендацій.

Інтерфейс AutoZID був протестований серед групи з 12 користувачів (аналітики, розвідники, оператори ГІС). Середній бал оцінки зручності інтерфейсу (за шкалою System Usability Scale) становив 85 із 100, що відповідає рівню "відмінно". Особливо позитивно відзначались:

- інтуїтивне управління картою;
- автоматичне фільтрування об'єктів за критерієм IDC⁺;
- генерація ЗІД у кілька кліків;

Метрики точності та швидкодії демонструють, що AutoZID є надійною і високопродуктивною системою для обробки аерокосмічних знімків. Вона ефективно ідентифікує цільові об'єкти, швидко генерує звіти та має високий рівень просторової точності. Також система є масштабованою й здатною до адаптації, що дозволяє використовувати її як в оперативному середовищі, так і для післяаналітичного опрацювання.

4.2.2. Порівняння з ручним формуванням ЗІД

Один із ключових етапів верифікації ефективності системи AutoZID полягав у порівнянні результатів автоматизованої обробки знімків із традиційним (ручним) підходом, що використовується у практиці підготовки ЗІД. Такий аналіз дозволяє не лише визначити переваги нової системи, але й кількісно оцінити приріст ефективності при її впровадженні.

Для забезпечення об'єктивного аналізу ефективності автоматизованого підходу, реалізованого в системі AutoZID, порівняння проводилося з традиційним ручним формуванням ЗІД. Було визначено низку техніко-операційних критеріїв, які охоплюють як кількісні, так і якісні параметри роботи. Це дозволяє комплексно оцінити продуктивність, точність та уніфікованість підходів у практичних умовах.

Для коректного співставлення було обрано наступні ключові параметри:

1. Час повного циклу обробки одного знімка (від завантаження до генерації ЗІД);
2. Рівень помилкових класифікацій (False Positives/Negatives);
3. Точність геоприв'язки об'єктів;
4. Відтворюваність результатів;
5. Формат і структурованість фінального документа ЗІД;
6. Необхідність участі людини на різних етапах.

В таблиці 4.1 показано порівняльні результати функціонування традиційного (ручного) підходу та запропонованої автоматизованої системи AutoZID. Такий підхід забезпечив об'єктивну, прозору та репрезентативну оцінку, дозволяючи виявити як переваги, так і потенційні обмеження кожної з моделей аналізу отриманих зображень.

Таблиця 4.1 – Характеристики порівняння результатів

Параметр	Ручний підхід	AutoZID
Середній час на 1 знімок	35–40 хвилин	9–10 секунд
Помилкові класифікації	11–15%	6–8%
Просторова точність	±30 м	±11 м
Повторюваність результатів	Низька	Висока
Уніфікованість ЗІД	Часткова	Повна
Потреба в людському ресурсі	Висока	Мінімальна (верифікація)

Ці результати свідчать про істотне зменшення навантаження на оператора-дешифрувальника. AutoZID дозволяє зосередитись на прийнятті рішень замість рутинного опрацювання, а автоматична генерація звітів дозволяє дотримуватись єдиного формату для всієї структури.

Програма демонструє суттєве підвищення ефективності процесів дешифрування та формування ЗІД за рахунок автоматизації. Зменшення

середнього часу обробки більш ніж у 200 разів (з десятків хвилин до кількох секунд), що дозволяє оперативно реагувати на динамічну обстановку. Зниження відсотка помилкових класифікацій і підвищення просторової точності свідчить про вищу надійність алгоритмічного аналізу. Крім того, автоматизоване формування ЗІД за уніфікованими шаблонами сприяє підвищенню сумісності та стандартизації звітних матеріалів, що є критично важливим у військових умовах.

У ході тестування над серією БпАК-знімків, отриманих над об'єктами критичної інфраструктури на сході України, система AutoZID виявила понад 350 цілей із середньою точністю $IDC^+ = 0.82$. Для порівняння, команда із трьох дешифрувальників при ручній обробці аналогічного масиву даних за 2,5 години виявила лише 274 об'єкти, при цьому 19 з них виявилися помилковими за оцінкою незалежного аудиту.

Система AutoZID демонструє низку істотних переваг у процесі автоматизованого формування звітно-інформаційних документів, що суттєво підвищує ефективність та достовірність отриманих даних.

1. Стандартизація інформації. Застосування уніфікованих шаблонів ЗІД забезпечує єдність формату представлення результатів, що критично важливо для міжвідомчої сумісності та автоматизованої обробки. Інтеграція QR-кодування дозволяє здійснювати швидку верифікацію достовірності документа, спрощуючи передачу даних у захищеному вигляді.

2. Інтерактивна верифікація. AutoZID оснащено механізмами інтегрованого геоаналізу, які дозволяють в реальному часі перевіряти прив'язку виявлених об'єктів до географічної координатної сітки. Це дає змогу верифікувати аналітичні висновки за допомогою інтерфейсу карти та локалізації об'єктів, значно знижуючи ризики помилкової ідентифікації.

3. Адаптивність. Система володіє здатністю динамічно змінювати критерії аналізу відповідно до поточних умов — типів виявлених об'єктів, змін візуального середовища (порушення інфраструктури або наявність задимлення),

а також особливостей місцевості. Така гнучкість дозволяє зберігати стабільну точність навіть за умов непередбачуваних змін.

4. Масштабованість. AutoZID підтримує паралельну обробку великих обсягів знімків, що особливо важливо в умовах інтенсивного навантаження. Завдяки оптимізованим алгоритмам і архітектурі мікросервісів, система може масштабуватись як по кількості задач, так і по географії аналізу, не втрачаючи продуктивності.

У сукупності, ці характеристики формують технологічну основу для побудови сучасної, достовірної та швидкодіючої системи підтримки прийняття рішень у сфері оперативної обстановки та аналізу просторових даних.

AutoZID демонструє суттєву перевагу над ручними методами формування ЗІД як за точністю, так і за оперативністю. Автоматизація не лише підвищує продуктивність, а й зменшує вплив людського фактору, дозволяючи формувати звіти, які відповідають сучасним вимогам до аналітичних продуктів в умовах інформаційного забезпечення подій на сході України.

4.5. Висновки до розділу 4.

1. Розроблено, програмно реалізовано та експериментально перевірено інтегровану інформаційну систему AutoZID, призначену для автоматизованого формування звітно-інформаційних документів (ЗІД) на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

2. Система реалізує повний цикл обробки — від завантаження авіаційних або супутникових знімків до генерації та верифікації структурованих аналітичних звітів — та має модульну архітектуру, що забезпечує гнучкість, масштабованість і сумісність із військовими та цивільними ГІС-рішеннями.

3. Поєднання алгоритмів попередньої обробки, сегментації, класифікації, компенсації похибок позиціонування та генерації векторних об'єктів з атрибутами, а також використання сучасних нейромережових моделей (YOLOv5,

EfficientDet) забезпечує високу точність розпізнавання об'єктів навіть у складних умовах зйомки.

4. Інтеграція з геоінформаційними сервісами та модулем компенсації похибок знижує середнє відхилення геоприв'язки до ~11 метрів, що відповідає вимогам оперативного моніторингу.

5. Запроваджено механізм автоматичної верифікації звітів за допомогою QR-кодування, яке поєднує геш-контроль, унікальний ідентифікатор документа, цифровий підпис і пряме посилання на сервер для перевірки автентичності, що гарантує захист від підробок та збереження цілісності даних.

6. Експериментальні випробування показали, що AutoZID перевершує традиційні ручні методи дешифрування: середній час обробки одного знімка скоротився з 35–40 хвилин до 9–10 секунд (збільшення швидкості у 200 разів), частка помилкових класифікацій зменшилася майже вдвічі (з 11–15% до 6–8%), а точність геоприв'язки покращилася більш ніж утричі.

7. Уніфікованість ЗІД, реалізована через стандартизовані шаблони, забезпечує сумісність із міжвідомчими системами та прискорює обмін інформацією, зменшуючи залежність від людського фактору та мінімізуючи ризики неоднозначної інтерпретації.

8. Система демонструє здатність ефективно працювати з великими масивами даних (до 400 знімків/год) у багатопоточному режимі, що є критично важливим в умовах інтенсивного оперативного моніторингу.

9. Практичне впровадження AutoZID у підрозділах прикордонної служби, військах РХБ захисту та в районах підвищеного ризику підтвердило її готовність до реального застосування, включно з інтеграцією з датчиками хімічних і біологічних загроз у режимі реального часу.

10. AutoZID є технологічно зрілим, ефективним і гнучким інструментом для автоматизованого аналізу аерокосмічних знімків і формування ЗІД, який може масштабуватися та адаптуватися під завдання різного масштабу — від локальних

інспекцій до регіональних програм моніторингу — забезпечуючи стандартизацію інформаційних потоків та підвищення ефективності аналітичної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання — розроблено методику та інтегровану інформаційну систему AutoZID для оперативного формування звітно-інформаційних документів (ЗІД) за результатами дешифрування авіаційних і супутникових зображень у режимі, наближеному до реального часу. Запропонований підхід базується на поєднанні сучасних алгоритмів комп'ютерного зору, математичних методів геопросторової обробки, нейромережових моделей (YOLOv5, EfficientDet) та механізмів адаптивної фільтрації, що дозволило підвищити точність, швидкодію та достовірність автоматизованого аналізу.

На основі запропонованого науково-методичного апарату реалізовано інтегровану інформаційну систему AutoZID, яка здатна функціонувати як в умовах повної визначеності, так і за динамічної зміни параметрів та обмеженої кількості вхідних даних. Система забезпечує автоматизоване прийняття рішень щодо включення об'єктів до звітно-інформаційних документів, використовуючи сформовану базу знань, алгоритми машинного навчання, критерії довіри (IDC^+) та актуальні оперативні дані з аерокосмічних знімків.

Застосування AutoZID дозволило скоротити середній час формування ЗІД на понад 30 % порівняно з традиційними методами, зберігаючи при цьому точність розпізнавання на рівні не нижче 0,93, що підтверджено під час порівняльного оцінювання ефективності роботи системи. Завдяки уніфікації й узагальненню експертних знань, а також впровадженню механізмів адаптивної фільтрації та інтегральної оцінки довіри, досягнуто максимальної релевантності включених об'єктів при оптимальному використанні обчислювальних ресурсів.

1. Розроблено удосконалену математичну модель формування звітно-інформаційних документів (ЗІД), яка відрізняється від відомих підходів використанням багатознімкового аналізу аерокосмічних зображень, ітераційною

структурою обробки об'єктів та семантичною класифікацією у поєднанні з геоприв'язкою. Формалізовано процес заповнення структурованих шаблонів звітів із урахуванням контексту, типу вхідних знімків і структури об'єктної сцени.

2. Запропоновано алгоритми злиття просторової інформації, що враховують змінність умов зйомки (день, ніч, задимлення, сніг), види джерел даних (БпАК, супутник) та адаптивно об'єднують результати класифікації об'єктів для підвищення точності й узгодженості сформованих ЗІД.

3. Створено формалізований псевдокод функціонування системи AutoZID та шаблон структури ЗІД, що дозволяє реалізувати модульне автоматизоване наповнення звітів з урахуванням багаторівневої перевірки достовірності, ID-позначень об'єктів та розрахунку індексу довіри до класифікованих даних.

4. Удосконалено методи виявлення техногенних змін середовища, які базуються на гібридному дешифруванні — з використанням алгоритмів нейронних мереж та логіки, а також включають лабораторно-польові вимірювання для валідації супутникових даних.

5. Набули подальшого розвитку інформаційно-аналітичні моделі оцінки антропогенного впливу, що реалізовані через інтеграцію контактних (наземних) спостережень із результатами дешифрування аерокосмічної інформації. Це дозволило підвищити точність прогнозування змін стану територій, зокрема у прикордонних зонах.

6. Проведено комплексне тестування ефективності системи AutoZID, яке засвідчило:

- зменшення середнього часу обробки одного знімка із 35–40 хвилин до 9–10 секунд;
- зниження кількості помилок при формуванні ЗІД на 30–40 % у порівнянні з традиційними методами;

- підвищення точності виявлення об'єктів до 0,87 при використанні денних БпАК-знімків;
- підвищення достовірності документів завдяки впровадженню QR-верифікації.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено в оперативну діяльність підрозділів Державної прикордонної служби України (Чернівецький, Житомирський прикордонні загони), а також у підрозділах РХБ захисту для оперативного моніторингу техногенних загроз. Система дозволила підвищити швидкість прийняття рішень, якість сформованої інформації та забезпечити повноцінну обробку в режимі, близькому до реального часу.

8. Створена система AutoZID забезпечує автоматизоване формування ЗІД у стандартизованих форматах із підтримкою інтеграції в інформаційні середовища оборонного та цивільного призначення (Excel, Word, ГІС), що підвищує адаптивність, масштабованість і функціональну надійність системи при використанні в умовах бойових та кризових сценаріїв.

Результати проведеного дослідження дозволили науково обґрунтувати, розробити та впровадити сучасні інформаційні технології автоматизованого дешифрування аерокосмічних знімків і формування ЗІД. Запропоновані рішення можуть ефективно застосовуватися для підвищення оперативності та точності моніторингу в умовах бойових дій та техногенних загроз.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Шумейко В.О., Архипова Л.М. Інформаційні технології та моделі для автоматизованого моніторингу стану довкілля. — Київ: ІТГПІ НАН України, 2022. — 248 с.
2. Довгий С.О., Бабійчук С.М., Кучма Т.Л. — "Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах" (навчально-методичний посібник, 2020). Посилання: <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/19968>
3. Дм. О. Храмов, О. Л. Волошенюк. "Аналіз стану і тенденції розвитку орбітальних угруповань малих космічних апаратів дистанційного зондування Землі" (2023). Посилання: [e-text \(PDF\)](#)
4. Butler, H., Daly, M., Doyle, A., Gillies, S., Schaub, T., & Schmidt, C. (2016). The GeoJSON Format (IETF RFC 7946). Internet Engineering Task Force. — специфікація формату GeoJSON.
5. Нестеренко С.Г., Афанасьєв К.О., Мироненко О.В. Дистанційне зондування Землі в лісовому господарстві: навчальний посібник. — Харків: ХНАУ, 2023. — 182 с.
6. Hazzard, E. (2011). OpenLayers 2.10 Beginner's Guide. Packt Publishing — описує роботу з форматами XML/JSON, інтеграцію з веб-ГІС та шаблонізацію звітів.
7. Яковенко, В., Мельник, О., & Іванченко, С. (2020). Геопросторові методи інтеграції даних дистанційного зондування Землі. Вісник геодезії та картографії, 4(108), 45–53.
8. Бондаренко, О. В., & Лисенко, П. О. (2023). Використання алгоритмів комп'ютерного зору у військових інформаційних системах. Наука і оборона, 2, 45–53.

9. Марущак В.М., Волинець Т.В. Інформаційні системи дешифрування зображень з використанням Аерокосмічних технологій. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 4(52) жовтень–грудень 2024. с.135-144. ISSN 2411-4049 DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.135-144>

10. Трофимчук О.М. (2024). Інформаційні технології та математичне моделювання для техногенно порушених територій.

11. Gallagher, J. E. et al. (2023). Assessing thermal imagery integration into object detection... Scientific Reports.

12. Кравчук, А. В., & Іваненко, Д. М. (2022). Застосування БпАК для моніторингу та дешифрування об'єктів інфраструктури. Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України, 1 (95), 112–120.

13. Шевченко, О. В., Лисенко, С. М. (2021). Автоматизоване визначення областей інтересу в аерофотознімках з БпАК. Системи озброєння і військова техніка, №1(65), 84–93.

14. Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing (4th ed.). Pearson, 1168 p. — розділ 5: Intensity Transformations and Spatial Filtering.

15. Марущак В.М., Шумейко В.О., Приступа В.М. Аналіз фізичних моделей і гіпотез, покладених в основу процедури відновлення дійсних параметрів поверхні. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток // Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-16 листопада 2022 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2022. – 242 с. ISBN 978-617-7854-76-9 <https://itgip.org/kolektivna-monografiya-za-materialam/>

16. Городиський, Ю. М., Риженко, С. І. (2019). Математичні моделі в системах автоматизованої обробки аерокосмічних зображень. Кібернетика та системний аналіз, №55(3), 103–115.

17. Марущак В.М., Волинець Т.В., Зотова Л.В., Хабова Н.В. Виклики у створенні комплексної математичної моделі електронної документації Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 60-61 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: [10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210](https://doi.org/10.37321/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210)

18. Биков, В.Ю., Литвин, В.В., & Лупенко, С.А. (2021). Автоматизація формування звітної документації в геоінформаційних системах. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", Серія: Комп'ютерні науки, №2, 45–54.

19. Мельник А.В., Кузнецов О.М. Аналіз показників Precision, Recall та F1-score при автоматизованому дешифруванні зображень. – Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки, 2021, №3, с. 120–128.

20. Перелигін Б.В. Аерокосмічний моніторинг екосистем: навчальний посібник. — Київ: Логос, 2015. — 216 с. — С. 54–59.

21. Гнатюк С.О., Субботін С.О. Методи комплексного оцінювання достовірності результатів автоматизованого аналізу геопросторових даних. – Кібернетика та обчислювальна техніка, 2022, №3, с. 45–53.

22. Царинюк О. В. (2023). Застосування методів машинного навчання для класифікації супутникових зображень: огляд літератури та ключових фреймворків. Herald of Khmelnytskyi National University, Issue 6. DOI: 10.18523/2617-3808.2023.6.36-40.

23. Варламов Г.Б., Лаптев С.М., Третьак К.М. Геоінформаційні технології в моніторингу та аналізі надзвичайних ситуацій. – Системи обробки інформації, 2021, №2 (165), с. 87–94.

24. Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Шумейко В.О., Архипова Л.М. Інформаційні технології та моделі для автоматизованого моніторингу стану довкілля. — Київ: ІТГПІ НАН України, 2022. — 248 с.
25. Костенко О.М., Бурштинський О.В., Петров С.В. Системи аерокосмічного моніторингу навколишнього середовища: навчальний посібник. — Львів: ЛНУ, 2020. — 192 с.
26. Третяк К.М., Чуприна І.М., Ліщенко С.В. Методичні підходи до просторово-часового аналізу ризиків у геоінформаційних системах моніторингу. — Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2021, №1(41), с. 115–122.
27. Якимчук, В. Г. (2021). Математичні методи обробки зображень у задачах дистанційного зондування Землі. Кібернетика та обчислювальна техніка, №3, 56–66.
28. Марущак В.М.. Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація аналізу міської інфраструктури. Екологічна безпека та природокористування. Київський національний університет будівництва і архітектури. Збірник наукових праць. Випуск 2 (54) квітень-червень 2025, с. 154–164 ISSN: 2411-4049. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.154-163>
29. Козловський В.М., Кучеренко О.М. Застосування вагових коефіцієнтів у процесах класифікації та сегментації аерокосмічних знімків. — Системи обробки інформації, 2020, №2(161), с. 55–62.
30. Пишна М.О., Волошенюк О.Л. — "Сучасні технології геоінформатики, фотограмметрії та дистанційного зондування Землі" (2022).
31. Cracknell A.P., Hayes L. Introduction to Remote Sensing. 3rd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2020. — 510 с.
32. Пархоменко О.В., Левченко І.М. Використання фільтра Калмана для підвищення точності геоприв'язки аерофотознімків. — Наукові праці Військового інституту телекомунікацій та інформатизації, 2020, №2, с. 88–95.

33. Кравченко, О., Литвин, В., & Шевченко, Р. (2021). Методи узгодження та об'єднання геопросторових даних у ГІС. Сучасні інформаційні технології, 32(2), 115–124.

34. Tan, M., & Le, Q. (2020). EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 10781–10790.

35. Wang, X., Wang, A., Yi, J., Song, Y., Chehri, A. (2023). Small Object Detection Based on Deep Learning for Remote Sensing: A Comprehensive Review. Remote Sensing, 15(13), 3265. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15133265>

36. Дем'яненко М.П., Третяк К.М. Геопросторове вирівнювання даних дистанційного зондування із застосуванням GCP та моделей систематичних похибок. – Геодезія, картографія і аерофотознімання, 2022, №96, с. 20–28.

37. Oxford Academic. UAV applications in precision agriculture. // Journal of Precision Agriculture. – 2021. – Vol. 14(6). – Режим доступу: <https://academic.oup.com/jpe/article/14/6/1003/6355612>,

38. Трофимчук, О. М., Грицай, Н. М. (2019). Підвищення якості дешифрування аерокосмічних знімків за рахунок адаптивної нормалізації та контрастування. Екологічна безпека та природокористування, №3–4, 112–119.

39. Шумейко В.О., Мосійчук Д.І., Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування безпілотних засобів в інтересах національної безпеки та оборони країни. Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення. Колективна монографія за матеріалами XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-15 листопада 2023 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. – с. 102-104. SBN 978-617-7854-58-5. [1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf](#)

40. Терещенко І.М., Бондаренко А.О. Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення об'єктів військової інфраструктури на знімках дистанційного

зондування Землі. – Геоінформаційні системи та дистанційне зондування Землі, 2020, №1, с. 33–42.

41. Козловський В.М., Кучеренко О.М. Застосування вагових коефіцієнтів у процесах класифікації та сегментації аерокосмічних знімків. – Системи обробки інформації, 2020, №2(161), с. 55–62.

42. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G.E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84–90.

43. Гаврилюк В.О., Литвиненко І.С. Використання глибоких згорткових нейронних мереж для розпізнавання об'єктів на аерофотознімках. – Системи обробки інформації, 2022, 4(175), с. 95–104.

44. Триснюк В.М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4(85) 2024. с.113-118. ISSN 2412-4338 DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.0447261>

45. Повітряний кодекс України №3393-VI від 19.05.2011 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/3393-17>

46. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779–788.

47. Лялько, В. І., Яценко, В. В., Кузьменко, О. М. (2020). Методи виділення областей інтересу у багатоспектральних та гіперспектральних знімках. Український журнал дистанційного зондування Землі, №12, 33–42.

48. Беляков К.М., Шахов С.В. Методи та алгоритми обробки супутникових знімків для задач класифікації об'єктів місцевості. – Космічна наука і технологія, 2021, 27(3), с. 58–72.

49. Третяк К.М., Лещенко Г.І., Жердев А.С. Методи багатокритеріальної оцінки якості дешифрування зображень дистанційного зондування Землі. – Геодезія, картографія і аерофотознімання, 2021, №94, с. 30–37.

50. Шумейко О.М., Головчанська І.Є. Оцінка ризиків та загроз у військовій сфері із застосуванням геоінформаційних технологій. – Системи озброєння і військова техніка, 2020, №3(63), с. 115–122.

51. Про затвердження Авіаційних правил України “Правила використання повітряного простору України” № 430/210 від 11.05.2018 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18>

52. Сердюк В.М., Колесник М.В. Моделювання показників ризику на основі геопросторових даних. – Системи обробки інформації, 2019, №4(159), с. 45–53.

53. Постанова Кабінету Міністрів України № 954 від 06.12.2017 “Про затвердження Положення про використання повітряного простору України”.

54. Коваленко В.О., Бойко А.І. Використання безпілотних літальних апаратів у геоінформаційних системах моніторингу територій. – Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2020, №4(41), с. 112–118.

55. Семенюк В.М., Григоренко А.І. Методи верифікації та захисту цифрових документів у державних інформаційних системах. – Захист інформації, 2020, №2, с. 18–27.

56. Кравченко О.М., Горбунова М.В. Використання PostGIS у системах просторового аналізу та моніторингу. – Геоінформаційні системи та дистанційне зондування Землі, 2021, №2, с. 29–36.

57. YOLO (You Only Look Once) — уніфікований підхід, що виконує детекцію та класифікацію об’єктів в межах однієї нейронної мережі в режимі реального часу [Redmon et al., 2016; DOI: 10.1109/CVPR.2016.91].

58. Василенко Л.А., Кузнецов С.О. Використання QR-кодів для цифрової ідентифікації та захисту електронних документів. – Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку, 2022, №1, с. 75–82.

59. Трофименко О.Г., Бондаренко І.В. Інтеграція геоінформаційних систем у процес екологічного моніторингу та прогнозування забруднень. – *Екологічна безпека та природокористування*, 2020, №4, с. 33–41.

60. RetinaNet — ефективна модель для виявлення об'єктів невеликого розміру завдяки використанню механізму *focal loss*, який компенсує дисбаланс між класами в навчальних даних [Lin et al., 2017; DOI: 10.1109/ICCV.2017.324].

61. Павлюк О.М., Гуцалюк О.О. Міжвідомча взаємодія у сфері моніторингу стану довкілля на базі єдиних інформаційних платформ. – *Інформаційні технології та захист інформації*, 2022, №3, с. 58–65.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник головного центру безпілотних
авіаційних комплексів Адміністрації
Державної прикордонної служби України

полковник

Віталій ВАРЧЕНКО

«30» липня 2025 року



АКТ

про впровадження результатів наукових досліджень

Комісія у складі: голови комісії полковника Шелеста А.А. та членів комісії полковника Чорного В.К., полковника Кравчука А.В. засвідчує, що результати, отримані в ході наукової діяльності підполковника Марущака В.М., успішно впроваджені в діяльність підрозділів прикордонного моніторингу Державної прикордонної служби України. Зокрема, впровадження здійснено на ділянках відповідальності відділів прикордонної служби Чернівецького та Житомирського прикордонних загонів, а також у підрозділах Державної прикордонної служби України, що дислоковані на східній ділянці кордону.

Розроблена ним «Інформаційна система оперативного формування звітних документів за результатами дешифрування аерофотознімків» використовується для автоматизованого аналізу зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів, з метою виявлення та класифікації об'єктів, а також формування звітно-інформаційних документів. Впровадження цієї системи дозволило скоротити час обробки даних, підвищити точність моніторингу та забезпечити оперативність прийняття рішень в умовах динамічної обстановки на державному кордоні.

Система впроваджена безпосередньо в польових умовах та довела свою ефективність у практичному застосуванні, зокрема під час аналізу зображень та фіксації динаміки змін у зоні відповідальності.

Голова комісії

полковник

А.А. ШЕЛЕСТ

Члени комісії:

полковник

В.К. ЧОРНИЙ

полковник

А.В. КРАВЧУК

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник військ РХБ захисту – начальник
управління РХБ захисту
Командування Сил підтримки
Збройних Сил України

Євген НАГОРНИЙ
полковник
“06” 2025 р.

АКТ

**про реалізацію результатів наукових досліджень аспіранта Інституту
телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії
наук України підполковника Марущака В.М.**

Комісія управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України у складі:

голова комісії – полковника Ігоря ДЯКА, начальника відділу організації РХБ захисту – заступника начальника управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України та членів комісії – полковника Руслана ПАЗЕНКА, головного спеціаліста відділу розвитку озброєння і засобів РХБ захисту та договірної роботи управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України, підполковника Андрія МАРЕЦЬКОГО, старшого офіцера відділу організації РХБ захисту управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України розглянула результати дисертаційного дослідження аспіранта Марущака Василя Миколайовича на тему “Інформаційні технології оперативного формування звітних документів за результатами дешифрування авіаційних та космічних зображень”.

Комісією підтверджено, що результати наукового дослідження щодо оперативного формування звітно-інформаційних документів за результатами дешифрування авіаційних та космічних зображень використовуються для здійснення моніторингу, оперативного реагування на зміни радіаційно-хімічної обстановки та реалізовані у вигляді інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень під час несення чергування.

Запропоноване науково-практичне рішення дозволяє здійснювати дистанційне виявлення зон РХБ забруднення за допомогою візуальних, термальних, мультиспектральних та газоаналізуючих сенсорів, встановлених на БПЛА, а також автоматизувати процес геоприв'язки та аналізу отриманих даних для побудови інтерактивних карт і 3D-моделей РХБ обстановки.

Наукова новизна дослідження полягає в інтеграції алгоритмів штучного інтелекту, геопросторового аналізу та засобів цифрової верифікації в єдину архітектуру автоматизованої системи формування звітних інформаційних документів. Практичне значення полягає в зменшенні часу реакції на події, зниженні навантаження на аналітиків, підвищенні достовірності та прозорості результатів.

Результати дослідження реалізовано у вигляді функціональної інформаційної системи AutoZID, яка може бути адаптована для широкого спектру задач — від оперативної розвідки до екологічного моніторингу. Запропоноване дослідження поєднує в собі методи машинного навчання, обробки зображень, шаблонного структурування документів і цифрової верифікації, що дозволяє не лише підвищити оперативність обробки, але й забезпечити високу якість, масштабованість та адаптивність отриманих результатів у реальних умовах застосування.

Комісія вважає, що результати дисертаційного дослідження можуть бути використані під час бойової роботи управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України під час бойових операцій та ліквідації наслідків бойових дій.

Голова комісії: полковник
Члени комісії: полковник
 підполковник



Ігор ДЯК
Руслан ПАЗЕНКО
Андрій МАРЕЦЬКИЙ

ДОДАТОК В

Звітно-інформаційний документ (ЗІД)

Опис обстановки

У результаті аналізу аерофотознімків виявлено значні пошкодження міської інфраструктури та військових об'єктів. Основне фото демонструє руйнування будівель і наявність диму, що свідчить про нещодавні бойові дії. Додатковий знімок ілюструє розташування техніки та військових споруд поблизу населеного пункту.

Основний знімок



Додатковий знімок



ЗВІТНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ДОКУМЕНТ (ЗІД)

Номер: ZID-2025-0812-001
Дата формування: 12.08.2025 14:37:25
Система: AutoZID v.3.2.1
Джерело даних: БПАК "Spectra-M" (мультиспектральна камера + тепловізор)

1. Загальна інформація

Місце зйомки: 48°23'12.5"N, 38°00'45.2"E (Донецька обл., Україна)
Час зйомки: 12.08.2025 14:22:14 UTC+3
Тип зйомки: мультиспектральна (RGB+NIR+Thermal)
Умови: ясна погода, t° +28°C, вітер 3 м/с

2. Виявлені об'єкти

№	Клас об'єкта	К-сть	Координати	IDC+	Примітка
1	Бронетранспортер БТР	3	48.3868 N, 38.0126 E	0.92	Камуфльований, рух не заф
2	Вантажівка військового зр	8	48.3864 N, 38.0130 E	0.88	Платформа з тентом
3	Польовий склад (паливо)	1	48.3861 N, 38.0135 E	0.81	Ємності з ПММ, ймовірно 200
4	Особовий склад	6 осіб	48.3866 N, 38.0128 E	0.76	Скупчення біля техніки

3. Аналіз ризику (Rn)

Rn = 0.82 → Критичний рівень

4. Зображення та анотації



5. Рекомендації

- Передати координати до підрозділу оперативного реагування.
- Здійснити повторне спостереження через 30 хвилин.
- Оцінити можливість дистанційного ураження об'єктів.

ЗВІТНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ДОКУМЕНТ (ЗІД)

6. Цифрова верифікація

Хеш документа: e7f5a9b0a113c4e2398d...

Стан перевірки: Документ автентичний

