

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
Міністерство освіти і науки України

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

БЯЛИЙ МИКОЛА ОЛЕГОВИЧ

УДК 004.89:004.942:528.94:355.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ
ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

126 – Інформаційні системи та технології
Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ М.О. Бялий

Науковий керівник – Пампуха Ігор Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Бялий Микола Олегович. Моделі, методи інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для геоінформаційних системах військового призначення – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 – інформаційні системи та технології (галузь знань 12 – інформаційні технології) – Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України. - Київ, 2026.

В умовах повномасштабної збройної агресії Російської Федерації проти України ефективність управління військами значною мірою залежить від своєчасного отримання, обробки та інтерпретації великих обсягів різномірної інформації про оперативну обстановку. Сучасні бойові дії характеризуються високою динамічністю, складністю інформаційного середовища та необхідністю прийняття управлінських рішень у мінімальні терміни. У цих умовах особливого значення набувають геоінформаційні системи військового призначення, які забезпечують інтеграцію та аналіз геопросторових даних, отриманих із різних джерел, зокрема матеріалів дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, сенсорних систем та інших інформаційних ресурсів.

Водночас існує протиріччя між постійним зростанням обсягів геопросторових даних, що надходять до систем управління військами, та обмеженими можливостями існуючих інформаційних систем щодо їх оперативної обробки даних та використання у системах підтримки прийняття рішень. Це зумовлює необхідність розроблення нових науково обґрунтованих моделей і алгоритмів, здатних забезпечити ефективну інтеграцію та моніторинг геопросторової інформації для формування ефективних управлінських рішень в умовах високої динамічності бойових дій. У дисертаційній роботі сформульовано та розв'язано наукову задачу розроблення моделей, методів і алгоритмів інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення, спрямованих на зменшення

невизначеності інформаційного середовища та підвищення ефективності прийняття управлінських рішень у системі управління військами.

Уперше розроблено образно-знакову модель електронної карти як інформаційного каналу, яка забезпечує формалізовану передачу та семантичну інтерпретацію геопросторової інформації у контурі управління військами. На відміну від традиційного підходу, за якого електронні карти використовуються переважно як засіб візуального відображення інформації, запропонована модель розглядає карту як елемент інформаційного каналу, що забезпечує структуровану передачу просторово-часових даних та їх інтеграцію у процес підтримки прийняття рішень.

Запропоновано та математично обґрунтовано метод оцінювання приросту інформації у геоінформаційних системах військового призначення на основі аналізу зменшення ентропії інформаційного середовища. Встановлено, що використання спеціалізованих геоінформаційних систем дозволяє зменшити інформаційну невизначеність на 35–45 %, що забезпечує підвищення інформативності каналу управління в середньому на 40 %.

Отримали подальший розвиток алгоритми оптимізації структури геоінформаційних систем військового призначення, які забезпечують формування динамічно адаптованих архітектур ГІС залежно від інтенсивності інформаційних потоків, оцінки стохастичних параметрів та випадкового характеру бойових дій. На відміну від традиційних статичних архітектур, запропоновані алгоритми дозволяють оптимізувати інфраструктуру геопросторових даних, гарантуючи високу продуктивність системи під час обробки інформації.

Удосконалено модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень, яка забезпечує комплексну геопросторову підтримку військ, реалізує адаптивний цикл «дані – аналіз – прогноз – рекомендація» та відповідає концепції циклу OODA (Observe – Orient – Decide – Act). Запропонована модель базується на представленні території бойових дій у вигляді багатовимірного вектора стану та забезпечує інтеграцію різномірних джерел інформації (даних дистанційного

зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, сенсорних систем) у єдине цифрове середовище оперативної обстановки.

Розроблено інтелектуальні алгоритми обробки відеоінформації з безпілотних літальних апаратів, що забезпечують глибоку автоматизацію виявлення озброєння та військової техніки противника в реальному часі. Алгоритм реалізовано на основі архітектури глибоких нейронних мереж YOLOv8. Встановлено оптимальне значення порогу довіри $\tau = 0,7$, що забезпечує надійну просторову прив'язку об'єктів до векторної геопросторової бази даних у межах єдиного геоінформаційного середовища.

Доведено ефективність застосування технологій Big Data та методів машинного навчання (DBSCAN, Random Forest) для аналізу та прогнозування бойової обстановки. Використання цих методів дозволяє автоматизовано виявляти зони підвищеної інтенсивності бойових дій, формувати прогнозні карти небезпечних територій та визначати оптимальні маршрути евакуації.

Практичну перевірку адекватності та випробування запропонованих моделей виконано на прикладах аналізу руйнувань Антонівського мосту, наслідків підриву Каховської ГЕС, а також формування планів відбудови інфраструктури м. Луч шляхом 3D-моделювання. Результати підтвердили можливість точного визначення просторових параметрів об'єктів та ефективний геопросторовий моніторинг динаміки змін на театрі бойових дій.

Отримані результати можуть бути використані під час розроблення та модернізації геоінформаційних систем військового призначення, а також у системах підтримки прийняття рішень органів військового управління. Реалізація запропонованих моделей, методів і алгоритмів дозволяє зменшити часову складову невизначеності під час оцінювання оперативної обстановки, підвищити рівень ситуаційної обізнаності органів управління та сприяє досягненню інформаційної переваги Збройних Сил України в умовах сучасних високодинамічних бойових дій.

Ключові слова: геоінформаційні системи військового призначення, інформаційні системи, системи підтримки прийняття рішень, геопросторова

підтримка військ, бази геопросторових даних, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), електронна карта, автоматизація обробки даних, штучний інтелект, озброєння та військова техніка, стохастичні параметри, ентропія інформаційного середовища, 3D-моделювання.

ABSTRACT

Bialyi Mykola Olegovych. Models and Methods of Information Support for Decision Support Systems for Military Geographic Information Systems. – Qualification scientific work presented as a manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 – Information Systems and Technologies (Field of Knowledge 12 – Information Technologies). – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2026.

Under conditions of the full-scale armed aggression of the Russian Federation against Ukraine, the effectiveness of military command and control largely depends on the timely acquisition, processing, and interpretation of large volumes of heterogeneous information regarding the operational environment. Modern warfare is characterized by high dynamics, complexity of the information space, and the necessity of making managerial decisions within minimal timeframes. In this context, military geographic information systems (GIS) play a crucial role by enabling the integration and analysis of geospatial data obtained from various sources, including remote sensing data, unmanned aerial vehicles (UAVs), sensor systems, and other information resources.

At the same time, there exists a contradiction between the continuously increasing volume of geospatial data entering command and control systems and the limited capabilities of existing information systems to process and utilize such data efficiently within decision support systems. This necessitates the development of scientifically grounded models and algorithms capable of ensuring effective integration and monitoring of geospatial information for the formation of efficient managerial decisions under highly dynamic combat conditions.

The dissertation formulates and solves the scientific problem of developing models, methods, and algorithms for information support of decision support systems in military GIS, aimed at reducing uncertainty in the information environment and improving the effectiveness of decision-making in military command and control systems.

For the first time, an image-symbolic model of an electronic map as an information channel has been developed. This model ensures formalized transmission and semantic interpretation of geospatial information within the command and control loop. Unlike the traditional approach, where electronic maps are primarily used as visualization tools, the proposed model considers the map as an element of the information channel that provides structured transmission of spatiotemporal data and their integration into the decision support process.

A method for evaluating information gain in military GIS based on the analysis of entropy reduction in the information environment has been proposed and mathematically substantiated. It has been established that the use of specialized GIS reduces informational uncertainty by 35–45%, which increases the informativeness of the control channel by an average of 40%.

Algorithms for optimizing the structure of military GIS have been further developed. These algorithms enable the formation of dynamically adaptive GIS architectures depending on the intensity of information flows, stochastic parameters, and the random nature of combat operations. In contrast to traditional static architectures, the proposed algorithms allow optimization of geospatial data infrastructure while ensuring high system performance during information processing.

The model of geoinformation support for decision-making has been improved. It provides comprehensive geospatial support for military operations, implements an adaptive cycle “data – analysis – forecast – recommendation,” and aligns with the OODA loop concept (Observe – Orient – Decide – Act). The proposed model is based on representing the battlefield as a multidimensional state vector and ensures the integration of heterogeneous data sources (remote sensing, UAVs, sensor systems) into a unified digital operational environment.

Intelligent algorithms for processing video data from UAVs have been developed, providing deep automation of detecting enemy weapons and military equipment in real time. The algorithm is implemented based on the YOLOv8 deep neural network architecture. The optimal confidence threshold $\tau = 0.7$ has been determined, ensuring reliable spatial referencing of detected objects to a vector geospatial database within a unified geoinformation environment.

The effectiveness of Big Data technologies and machine learning methods (DBSCAN, Random Forest) for analyzing and forecasting the operational environment has been proven. These methods enable automated detection of high-intensity combat zones, generation of predictive maps of hazardous areas, and determination of optimal evacuation routes.

Practical validation of the proposed models was carried out through case studies, including the analysis of the destruction of the Antonivskyi Bridge, the consequences of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam destruction, and the development of infrastructure reconstruction plans for the city of Oleshky using 3D modeling. The results confirmed the possibility of accurate determination of spatial parameters of objects and effective geospatial monitoring of dynamic changes in the theater of operations.

The obtained results can be applied in the development and modernization of military GIS, as well as in decision support systems for military command authorities. The implementation of the proposed models, methods, and algorithms reduces temporal uncertainty in assessing the operational environment, enhances situational awareness of command bodies, and contributes to achieving information superiority of the Armed Forces of Ukraine in modern high-dynamic warfare conditions.

Keywords: military geographic information systems, information systems, decision support systems, geospatial support of troops, geospatial databases, remote sensing, electronic map, data processing automation, artificial intelligence, weapons and military equipment, stochastic parameters, information entropy, 3D modeling.

Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових фахових виданнях України:
(які входять до переліку МОН України)*

1. М.О. Бялий. «Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка», Чернігів 2024, випуск №3(37) с. 132-142. DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142

2. М.О. Бялий, І.В. Пампуха. «Аналіз підходів щодо пошуку оптимальної структури геоінформаційної системи військового призначення», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка, Чернігів 2025, випуск №4(42) с. 277-285. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-618-626](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-618-626)

3. М.О. Бялий, П.А. Савков. «Образно-знакова модель карти як «інформаційного каналу»», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка», Чернігів 2025, випуск №3(41) с. 169-175. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-169-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-169-175)

Тези опубліковані за матеріалами конференції:

1. XIX Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», м. Київ, 10 листопада 2023 року (доповідь: «Геоінформаційні системи військового призначення як засіб підвищення бойової ефективності Збройних Сил України»).

2. Всеукраїнська науково-практична конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка», м. Київ, 27 квітня 2023 року (доповідь: «Інформаційна складова ГІС військового призначення»).

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВІЙСЬКАМИ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІС ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В АСУ	23
1.1 Аналіз автоматизованих систем управління військами в США та країнах НАТО	24
1.2 Аналіз автоматизованих систем управління військами Збройних Сил України	30
1.3 Обґрунтування необхідності впровадження геоінформаційних систем військового призначення в автоматизовані системи управління військами	34
Висновки до розділу 1	45
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	46
2.1 Метод оцінювання приросту інформації для геоінформаційних систем військового призначення у систему управління військами	46
2.2 Образно-знакова модель карти як інформаційного каналу геоінформаційних систем військового призначення	53
2.3 Алгоритм пошуку оптимального варіанту геоінформаційних систем військового призначення	58
Висновки до розділу 2	70
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	71
3.1 Модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень	72
3.2 Джерела даних для розпізнавання військових об'єктів за допомогою матеріалів дистанційного зондування землі	82
3.3 Методи штучного інтелекту для розпізнавання військових об'єктів	85

3.4 Алгоритм аналізу відео з безпілотних літальних апаратів для виявлення військової техніки противника в реальному часі	98
3.5 Технології Big Data у підтримці прийняття рішень	109
3.6 Прогнозування можливих атак (небезпечних зон)за допомогою Random Forest	116
Висновки до розділу 3	120
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	122
4.1 Загальні відомості про геоінформаційний аналіз військових дій	123
4.2 Візуалізація зон бойових дій на території України	124
4.3 Застосування геоінформаційних технологій для візуалізації та аналізу пошкоджень об'єктів територій внаслідок військових дій агресора	139
4.4 Застосування геоінформаційних технологій для створення планів на відбудування руйнувань об'єктів населеного пункту	144
Висновки до розділу 4	148
ВИСНОВКИ	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	152
ДОДАТКИ	159

ВСТУП

Актуальність теми дисертаційних досліджень зумовлена сучасними умовами функціонування системи управління військами Збройних Сил України в умовах повномасштабної збройної агресії, що характеризуються високою динамічністю бойових дій, значним інформаційним навантаженням, багатоканальністю джерел розвідувальної інформації та необхідністю прийняття управлінських рішень у мінімальні часові проміжки. Ефективність виконання бойових завдань безпосередньо залежить від якості інформаційного забезпечення органів військового управління, рівня ситуаційної обізнаності командирів і штабів та здатності системи оперативно інтегрувати й аналізувати різномірні геопросторові дані [1,12].

У цих умовах ключову роль відіграють геоінформаційні системи військового призначення, які забезпечують інтеграцію, аналіз та візуалізацію геопросторових даних про оперативну обстановку, сили і засоби, об'єкти противника та характеристики місцевості [3]. Геоінформаційні системи формують основу цифрової моделі обстановки та виступають технологічним середовищем функціонування систем підтримки прийняття рішень у контурі управління військами.

У сучасних наукових дослідженнях у галузі інформаційних систем та технологій значна увага приділяється розвитку геоінформаційних систем, систем підтримки прийняття рішень, технологій Big Data, штучного інтелекту та автоматизованих систем управління [4, 5]. Дослідження спрямовані на підвищення ефективності оброблення великих масивів даних, інтеграцію різномірних інформаційних джерел та формування єдиного інформаційного середовища управління. Окремі наукові праці присвячені питанням геоінформаційного аналізу, ситуаційної обізнаності та використання просторових даних у задачах військового управління [1, 6].

Водночас більшість існуючих досліджень орієнтовані на загальні інформаційно-аналітичні системи або цивільні геоінформаційні технології і лише частково враховують специфіку функціонування систем управління військами в умовах ведення бойових дій. У науковій літературі недостатньо розкрито питання формалізованого зв'язку між структурою геоінформаційної системи,

характеристиками інформаційного середовища та якістю прийняття управлінських рішень.

Аналіз сучасних підходів до побудови геоінформаційних систем показує, що основна увага приділяється питанням збору, зберігання та візуалізації геопросторових даних, тоді як задачі формалізованого інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень залишаються недостатньо дослідженими [2, 3]. Існуючі ГІС здебільшого розглядаються як інструмент відображення інформації на електронній карті, а не як комплексна інформаційно-аналітична система, що забезпечує зменшення невизначеності обстановки та підвищення інформативності даних у системі управління військами. При цьому електронна карта використовується переважно як засіб візуалізації без її формалізації як інформаційного каналу передачі, структуризації та інтерпретації геопросторової інформації. Крім того, сучасні дослідження у сфері систем підтримки прийняття рішень зосереджені на розробленні алгоритмів аналізу даних, прогнозування та інтелектуальної обробки інформації [7, 8]. Проте недостатньо уваги приділяється кількісному оцінюванню інформативності інформаційного середовища та впливу геоінформаційних технологій на ефективність функціонування системи управління військами. Зокрема, у науковій літературі обмежено розглянуто питання оцінювання приросту інформації, що отримується внаслідок впровадження геоінформаційних систем, а також зменшення ентропії інформаційного середовища у процесі оброблення геопросторових даних.

В умовах ведення сучасних бойових дій особливого значення набуває інтеграція даних дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, розвідувальних сенсорів та інформаційно-аналітичних систем у єдине геоінформаційне середовище управління військами [5, 6]. Проте існуючі наукові підходи переважно розглядають ці технології ізольовано, без їх системної інтеграції у контур геоінформаційної підтримки прийняття рішень. Це призводить до фрагментарності інформаційних потоків, дублювання даних, зростання суперечностей між джерелами інформації та підвищення рівня невизначеності обстановки. Також недостатньо дослідженими залишаються питання оптимізації

структури геоінформаційних систем військового призначення з урахуванням інтенсивності інформаційного навантаження, динамічності бойових дій та стохастичного характеру зовнішніх впливів [1, 4]. Більшість існуючих підходів базуються на статичних архітектурах інформаційних систем і не враховують необхідність їх адаптації до змін оперативної обстановки в режимі, наближеному до реального часу.

Таким чином, критичний аналіз сучасних наукових досліджень у галузі геоінформаційних систем, систем підтримки прийняття рішень та автоматизованих систем управління військами свідчить про наявність наукової проблеми, яка полягає у невідповідності між зростаючими обсягами, складністю та динамічністю геопросторової інформації, що використовується в системі управління військами, та недостатнім рівнем розробленості моделей і методів інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення, орієнтованих на зменшення невизначеності інформаційного середовища та підвищення інформативності геопросторових даних [2 – 4].

Вирішення зазначеної наукової проблеми потребує розроблення нових науково обґрунтованих моделей, методів і алгоритмів інформаційного забезпечення, зокрема: формалізації електронної карти як інформаційного каналу передачі та інтерпретації геопросторової інформації; кількісного оцінювання приросту інформації в системі управління військами на основі зменшення ентропії інформаційного середовища; а також розроблення алгоритмів оптимізації структури геоінформаційних систем військового призначення з урахуванням інтенсивності інформаційних потоків та динаміки бойових дій.

Таким чином, постає наукова задача полягає у розробленні моделей, методів і алгоритмів мінімізації невизначеності інформаційного середовища систем підтримки прийняття рішень шляхом формалізації геоінформаційних процесів та інтеграції мультимодальних геопросторових даних у системі управління військами.

Розв'язання зазначеного протиріччя зумовило вибір теми дисертаційного дослідження, спрямованого на розроблення моделей, методів і алгоритмів

інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем військового призначення.

Актуальність теми дослідження в контексті наукових програм і проектів.

Робота безпосередньо пов'язана з актуальними потребами застосування наукових моделей, методів і алгоритмів інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення в умовах сучасних бойових дій. Тематика дисертації відповідає основним напрямам наукових досліджень і науково-технічних розробок відповідно до Постанови від 30.04.2024 № 476 "Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні". Результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідних робіт на тему: Розроблення інформаційної платформи для інтеграції інформаційно-комунікаційних систем Збройних Сил України, інститут прикладних систем управління Національної академії наук України; Розробка проекту опису інформаційно-комунікаційної системи «Геоінформаційна система Міністерства оборони України» (115 картографічний центр (військова частина А3796)).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення шляхом розроблення моделей, методів та алгоритмів оброблення геопросторових даних у системі управління військами.

Для досягнення поставленої мети вирішені такі завдання:

1. Проведено аналіз стану автоматизованого управління військами у ЗСУ та країнах НАТО;
2. Обґрунтовано необхідність застосування ГІС ВП у системі управління військами;

3. Розроблено метод оцінювання приросту інформації у СУВ за рахунок впровадження ГІС ВП;

4. Розроблено образно-знакову модель карти як інформаційного каналу ГІС військового призначення;

5. Удосконалено алгоритми пошуку оптимальної структури ГІС військового призначення;

6. Удосконалено модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень в управлінні військами;

7. Оцінено можливості інтеграції ДЗЗ, БПЛА, штучного інтелекту та технологій Big Data;

8. Розроблено алгоритм аналізу відео з БПЛА в реальному часі для систем підтримки прийняття рішень.

9. Здійснено експериментальну апробацію та оцінку ефективності розроблених моделей, методів і алгоритмів геоінформаційної підтримки прийняття рішень у реальних умовах моніторингу територій бойових дій.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення в системі управління військами.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем військового призначення.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано комплекс теоретичних, математичних, інтелектуальних та геоінформаційних методів, що забезпечують достовірність отриманих результатів у задачах інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення.

Фундаментальні математичні та статистичні методи (ентропійний підхід, методи інтегрування диференціальних рівнянь, Монте-Карло, квазілінійних збурень, гармонійної та статистичної лінеаризації, метод невідповідних впливів) застосовано для математичного моделювання інформаційних процесів,

оцінювання ймовірнісних характеристик параметрів системи та кількісного визначення приросту інформації за рахунок зменшення ентропії інформаційного середовища СУВ.

Методи штучного інтелекту та інтелектуальної обробки даних (глибинні нейронні мережі YOLOv8, Random Forest, data fusion, мультимодальне навчання, GAN, HADAR) використано для автоматизованого виявлення, класифікації та відстеження військових об'єктів за даними БПЛА, ДЗЗ та інших сенсорних джерел, а також інтеграції мультимодальних розвідувальних даних у єдине геоінформаційне середовище.

Методи геоінформаційного та системного аналізу (геопросторове моделювання, SQL-фільтрація, матричний аналіз сприятливості, топологічна перевірка, триангуляція поверхні та згладжування) застосовано для оброблення, інтеграції та аналізу геопросторових даних, формування цифрової моделі обстановки та обґрунтування структури ГІС військового призначення в системі управління військами.

Для оцінювання ефективності запропонованих моделей і алгоритмів використано ентропійну міру Шеннона, а також метрики якості класифікації (Accuracy, Recall, F1-міра) і показники часу оброблення інформації, що дозволило кількісно оцінити рівень зменшення невизначеності та підвищення інформативності геопросторових даних. Обраний комплекс методів забезпечує наукову обґрунтованість, адекватність і практичну достовірність результатів дослідження в умовах функціонування СУВ під час ведення бойових дій.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше розроблено метод оцінювання приросту інформації, що отримується за рахунок впровадження ГІС військового призначення у систему управління військами [56]. Суть методу полягає у кількісному визначенні підвищення інформативності СУВ через аналіз зменшення ентропії (невизначеності) інформаційного середовища після впровадження геоінформаційних технологій. Метод базується на математичних залежностях, що враховують точність, повноту та актуальність даних, а також затримку їх

відтворення. На відміну від існуючих якісних або експертних підходів, запропонований метод використовує строгий математичний інструментарій, що дозволяє обґрунтувати приріст інформативності СУВ в середньому на 40%.

2. Уперше розроблена образно-знакова модель карти як інформаційного каналу для геоінформаційних систем військового призначення [57]. Суть моделі полягає у формалізації електронної карти не лише як засобу візуалізації, а як складної системи реєстрації, семантичного структурування та передачі просторово-часових даних від театру бойових дій до особи, що приймає рішення (ОПР). У моделі карта розглядається як структурований образно-знаковий простір, що інтегрує систему умовних позначень, тематичних шарів та семантичних зв'язків. Модель відрізняється тим, що на відміну від існуючих підходів, де електронна карта розглядається переважно як інтерфейс відображення даних, у роботі вона вперше формалізована як «інформаційний канал» у системі управління військами. Це дозволило вперше застосувати апарат теорії інформації до геоінформаційних процесів, переводячи використання ГІС із рівня візуалізації на рівень формалізованого інформаційного забезпечення прийняття рішень.

3. Отримали подальший розвиток алгоритми пошуку оптимальної структури ГІС військового призначення для систем управління військами [62]. Суть результату полягає у розробці математичних функціонально-статистичних моделей, які дозволяють визначати раціональний склад функціональних компонентів ГІС з урахуванням інформаційного навантаження та динаміки бойових дій. Алгоритми базуються на методах статистичної лінеаризації та ймовірного усереднення для оцінювання стану об'єкта дослідження. Відмінність полягає у переході від статичних структур до динамічно адаптованих конфігурацій, що орієнтовані на конкретний театр воєнних дій та мінімізацію інформаційного перевантаження органів управління.

Результати, що розвивають та забезпечують реалізацію основних наукових:

1. Удосконалено модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень в управлінні військами. Модель реалізує адаптивний замкнений цикл «дані – аналіз

– прогноз – рекомендація – уточнення даних» у межах єдиного інформаційно-аналітичного середовища та забезпечує інтеграцію різнорідних просторових джерел із урахуванням динамічності бойових дій.

2. Науково обґрунтовано та оцінено можливості інтеграції засобів дистанційного зондування Землі, БПЛА, методів штучного інтелекту та технологій Big Data для зменшення невизначеності інформаційного середовища. Встановлено системні взаємозв'язки між характеристиками джерел даних та ефективністю алгоритмів глибокого навчання, доведено синергетичний ефект мультимодальної обробки інформації у задачах розпізнавання військових об'єктів.

3. Запропоновано алгоритм аналізу відео з БПЛА в реальному часі з інтеграцією результатів у геоінформаційне середовище системи управління військами. Алгоритм забезпечує автоматизоване виявлення та просторову прив'язку об'єктів противника на електронній карті, що сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності та зменшенню часової складової невизначеності.

Особистий внесок здобувача

Усі наукові результати, що становлять зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. За результатами виконаних досліджень опубліковано 3 наукові праці.

У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать:

У [62] автору належить аналіз існуючих підходів щодо побудови складних систем та розробка математичної функціонально-статистичної моделі для пошуку оптимальної структури геоінформаційної системи військового призначення.

У [57] автору належить розробка образно-знакової моделі електронної карти, її формалізація як «інформаційного каналу» у контурі управління військами та обґрунтування ентропійного методу оцінювання її інформативних характеристик.

Огляд попередніх робіт. Результати інших авторів.

[3] Бурачек В.Г. Геоінформаційна підтримка прийняття рішень : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2011. Дослідження автора присвячено

теоретичним основам побудови ГІС для підтримки прийняття рішень, зокрема структуруванню просторових даних, побудові тематичних шарів та організації цифрової картографічної основи. Проте в даній роботі електронна карта розглядається переважно як засіб відображення або інтерфейс доступу до даних. На відміну від підходу В. Г. Бурачека, у нашій дисертації карта вперше формалізована як «інформаційний канал» передачі та семантичної інтерпретації геопросторової інформації в контурі управління військами.

[13] Бовда Е. М. Автоматизована система управління військами Збройних сил США // Зб. доповідей та тез VII НТП. Київ, 2014. С. 11–15. Публікації автора присвячені детальному аналізу еволюції систем класу C2–C4ISR на прикладі американської системи FBCB2 та виявленню основних перепон на шляху розвитку тактичних АСУВ. Проте у працях Е. М. Бовди відсутня формалізована модель кількісного оцінювання інформативності геопросторових даних та їх впливу на зменшення невизначеності в СУВ. Нами був запропонований ентропійний метод, який дозволяє математично обґрунтувати приріст інформативності СУВ за рахунок впровадження ГІС ВП.

[22] Морозов А. О., Косс В. А. Управління розробкою Єдиної АСУ Збройних Сил // *Mathematical Machines and Systems*. 2007. № 2. С. 1–11. Роботу присвячено проблемам координації проєктної діяльності щодо створення ЄАСУ ЗСУ та управління життєвим циклом програмних засобів. Проте питання адаптивної оптимізації структури саме геоінформаційних систем військового призначення з урахуванням стохастичного характеру бойових дій та динамічного інформаційного навантаження автором не досліджувалися.

[17] Дружинін С. В., Климович О. К., Саєнко О. Г. Сучасний стан автоматизації управління в Збройних Силах України // *Системи озброєння і військова техніка*. 2010. № 1 (21). С. 60–62. Статтю присвячено аналізу засобів автоматизації та інформатизації в ЗСУ на етапі їх зародження. Авторами висвітлено проблеми фрагментарності вітчизняних АСУ, проте не запропоновано алгоритмів інтеграції різнорідних джерел даних (ДЗЗ, БПЛА, Big Data) у єдине геоінформаційне середовище, що є предметом дослідження в нашій роботі

[46] Стужук П. І. та ін. Світові тенденції створення автоматизованих систем управління військами // Збірник наукових праць ЦВСД. 2012. № 1 (45). С. 68–76. Авторами досліджено глобальні тенденції розвитку АСУВ, де створення єдиного інформаційного середовища та забезпечення функціонування системи у режимі реального часу визначено як ключовий чинник успіху операцій. Проте в роботі основна увага приділена організаційним аспектам побудови середовища. У нашій дисертації цей підхід розвинуто через впровадження математичного апарату оцінки ентропії, що дозволяє кількісно виміряти ефективність такого середовища.

[45] Поліщук Л. І., Багуцький С. М. Значення і вплив системи зв'язку на ефективність управління військами та зброєю // VII НТК. Київ, 2014. С. 42–46. У роботі проаналізовано взаємозв'язок між розвитком зразків озброєння та формами ведення збройної боротьби. Автори обґрунтовують, що автоматизація процесів управління дає змогу випереджати противника у виробленні рішень. Проте питання формалізації карти як каналу передачі цих даних не розглядалося. Нами ж запропонована образно-знакова модель карти, яка дозволяє оптимізувати цей процес на рівні семантичного кодування об'єктів.

[88] Маценко О. В. Використання технологій Big Data у військовій справі // Збірник наукових праць ВІКНУ. 2021. 74(1). С. 112–121. Дослідження присвячено застосуванню великих даних у системах підтримки прийняття рішень (СППР) для моделювання сценаріїв та оцінки ризиків. Автор розглядає Big Data як інструмент стратегічного рівня. На відміну від цього, у нашій роботі технології Big Data інтегровані з алгоритмами машинного навчання (DBSCAN, Random Forest) для оперативного аналізу тактичної обстановки та автоматизованого формування теплових карт бойових дій у реальному часі.

[74] Bao F. et al. Heat-assisted detection and ranging (HADAR) // Nature. 2023. Vol. 619. pp. 743–748. Авторами представлена інноваційна система HADAR, яка використовує теплофізику та машинне навчання для розпізнавання об'єктів за слабких інфрачервоних сигналів, забезпечуючи високу точність у складних погодних умовах. Дана технологія є досконалим сенсорним рішенням. У нашій дисертації подібні мультимодальні підходи інтегруються в загальну ГІС-

платформу, де дані HADAR чи YOLOv8 стають вхідним вектором для розробленого методу оцінювання приросту інформації.

[67] Pugachev V. S. Theory of Random Functions and Its Applications to Control Problems. Oxford: Pergamon Press, 1965. У праці викладено методи імовірнісного усереднення для аналізу систем з детермінованими та випадковими параметрами. Цей метод був використаний нами для оцінки впливу законів розподілу параметрів елементів на статистичні характеристики ГІС ВП. Нами було доведено, що метод імовірнісного усереднення є менш трудомістким для складних ГІС-структур порівняно з методом Монте-Карло, що дозволило оптимізувати пошук структури системи під час моніторингу бойових дій.

[51] Зацерковний В. І. ДЗЗ. Фізичні основи : навч. посіб. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. 380 с. Дослідження автора зосереджені на фізичних принципах отримання даних дистанційного зондування Землі та їх первинній обробці. У нашій роботі ці принципи використані як технологічне підґрунтя для формування інформаційної бази. Проте нами додатково розроблено алгоритм інтеграції відеопотоків з БПЛА безпосередньо в ГІС-середовище з використанням архітектури YOLOv8, що перетворює сирі дані ДЗЗ на структуровані шари оперативної обстановки.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на науково-практичних конференціях:

1. XIX Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», м. Київ, 10 листопада 2023 року (доповідь: «Геоінформаційні системи військового призначення як засіб підвищення бойової ефективності Збройних Сил України»).

2. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка», м. Київ, 27 квітня 2023 року (доповідь: «Інформаційна складова ГІС військового призначення»).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 3 наукових праці та 2 – публікації тез доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій, при цьому 3 фахові статті безпосередньо відображають основні наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація містить 87 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел із 97 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВІЙСЬКАМИ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІС ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В АСУ

У першому розділі виконується комплексний аналіз теоретичних засад та практичного досвіду впровадження систем автоматизованого управління військами і зброєю (АСУВ) у Збройних Силах України та провідних країнах НАТО. Досліджено еволюцію систем класу C4ISR та концептуальні основи мережецентричних операцій, спрямованих на формування єдиного інформаційного середовища управління та скорочення циклу прийняття рішень OODA loop. Окрему увагу приділено критичному аналізу вітчизняних розробок, зокрема систем «Дельта» та «Дзвін-АС», а також виявленню проблем фрагментарності архітектури та недостатнього рівня інтероперабельності існуючих засобів автоматизації.

На основі проведеного дослідження обґрунтовано ключову роль геоінформаційних систем військового призначення як базової технологічної платформи інформаційного забезпечення управління військами. Це зумовлено тим, що сучасні процеси планування та управління бойовими діями значною мірою спираються на аналіз геопросторової інформації, яка відображає особливості місцевості, розташування об'єктів інфраструктури, інженерні та природні перешкоди, а також динаміку розвитку оперативної обстановки. За оцінками фахівців, понад 80 % інформації, що використовується у процесах управління військами, має просторову прив'язку, що визначає необхідність використання геоінформаційних технологій для її інтеграції, аналізу та візуалізації у єдиному інформаційному середовищі.

Отримані результати дозволили сформулювати наукове протиріччя між стрімким зростанням обсягів геопросторових даних, які надходять із різноманітних джерел (дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, сенсорних систем та інших інформаційних ресурсів), та обмеженими

можливостями органів управління щодо їх оперативної обробки, аналізу й використання у процесах прийняття управлінських рішень. Зазначене протиріччя зумовлює необхідність розроблення нових моделей, методів та алгоритмів інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень, здатних забезпечити ефективну інтеграцію, обробку та інтерпретацію геопросторових даних у системах управління військами.

1.1 Аналіз автоматизованих систем управління військами та зброєю в США та країнах НАТО

У сучасних умовах розвитку збройної боротьби автоматизація процесів управління військами та зброєю розглядається як один із ключових чинників забезпечення інформаційної та операційної переваги. Зростання динаміки бойових дій, підвищення насиченості поля бою різномірними засобами ураження, розвідки та спостереження, а також значне збільшення обсягів інформації, що підлягає обробці у стислі часові інтервали, зумовлюють необхідність переходу від традиційних ієрархічних форм управління до інтегрованих автоматизованих систем.

Характерною особливістю сучасних підходів до організації управління військами є орієнтація не лише на автоматизацію передачі команд та донесень, але й на забезпечення ситуаційної обізнаності органів управління, інформаційну підтримку процесів оперативного планування, моделювання варіантів застосування військ та скорочення циклу прийняття управлінських рішень. При цьому особлива увага приділяється стандартизації інформаційної взаємодії, забезпеченню сумісності національних систем управління у складі об'єднаних угруповань військ, а також широкому використанню сучасних інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних, мережових та інтелектуальних.

Аналіз досвіду США та країн НАТО дозволяє визначити основні тенденції розвитку автоматизованих систем управління військами та зброєю, встановити етапи еволюції таких систем, їх функціональні можливості та обмеження, а також сформулювати узагальнені вимоги до перспективних автоматизованих систем

управління. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого порівняльного аналізу стану автоматизації управління у Збройних Силах України та обґрунтування напрямів його розвитку з урахуванням сучасних умов ведення бойових дій.

Система управління військами і зброєю США формувалася відповідно до концепції інтегрованого управління Command, Control, Communications, Computers and Intelligence for the Warrior (C4I for the Warrior), що передбачає об'єднання засобів командування, управління, зв'язку, обчислювальної техніки та розвідки у єдину інформаційну систему управління [9 – 12].

Залежно від ступеня автоматизації функцій управління автоматизовані системи класифікуються відповідно до функціональних складових: Command (командування), Control (управління), Communications (зв'язок), Computers (обчислювальні засоби), Intelligence (розвідка), Surveillance (спостереження), Reconnaissance (розвідка). Наявність певних функцій у складі системи визначає її належність до відповідного класу.

Системи класу C2 (Command and Control) забезпечують автоматизацію базових функцій управління військами. До їх основних можливостей належать:

- передача сформульованих бойових завдань підлеглим органам управління у формалізованому текстовому та графічному вигляді із застосуванням єдиної інформаційної мережі;
- автоматичне визначення місцеположення підрозділів та об'єктів управління із відображенням їх координат на електронних картах;
- відображення на електронних картах інформації про противника, перешкоди та елементи інфраструктури на полі бою;
- автоматизований розрахунок маршрутів переміщення військ на основі даних про дорожню мережу та інші характеристики місцевості;
- відображення переміщення підрозділів у режимі реального часу на основі технології Blue Force Tracking (BFT).

Разом з тим системи класу C2 забезпечують переважно автоматизацію передачі управлінських рішень та відображення поточної обстановки. Функції

оцінювання обстановки, аналізу варіантів дій та прийняття рішення залишаються за командиром і не підтримуються повноцінними засобами інтелектуальної обробки інформації.

Системи управління, у яких автоматизовано також функції спостереження та розвідки, позначаються як C2SR або C2+. Такі системи можуть забезпечувати автоматизовану ідентифікацію цілей, розпізнавання об'єктів за принципом «свій–чужий», а також формування цілевказівок для засобів ураження [1].

На сучасному етапі більшість автоматизованих систем управління тактичного рівня у країнах НАТО належать саме до класу C2 або C2+. При цьому їх функціональні можливості відрізняються лише розширенням спектру завдань, що вирішуються в автоматизованому режимі. Досягнення рівня C3 або C4 на тактичному рівні пов'язане зі значними технологічними труднощами [13].

Система управління, у якій автоматизовано функції командування, управління, зв'язку та комп'ютерної обробки інформації, належить до класу C4. Наявність компонентів Computers та Intelligence забезпечує автоматичну обробку даних, отриманих у процесі функціонування системи, а також формування варіантів управлінських рішень на основі аналізу отриманої інформації.

Системи класу C4 повинні забезпечувати:

- автоматизований збір та обробку інформації про бойову обстановку;
- інформаційну підтримку процесу вироблення варіантів рішення командиром;
- математичне моделювання можливих результатів бойових дій на основі різних варіантів застосування військ;
- інформаційну підтримку розроблення планувальних документів;
- автоматичне оновлення оцінки обстановки на основі нових даних, що надходять у систему.

Системи класу C4I та C4ISR, як правило, використовуються на оперативному або оперативно-стратегічному рівнях управління [13].

Схема передачі інформації між ланками управління в Збройних Силах США наведена на рис. 1.1.

Основними факторами, що ускладнюють розвиток автоматизованих систем управління тактичного рівня від класу C2 до класів C3 і C4, є:

- відсутність формалізованих математичних моделей оцінювання бойових дій на тактичному рівні;
- складність створення автоматизованих систем збору та аналізу даних тактичної обстановки;
- необхідність обробки значних обсягів даних у режимі реального часу;
- обмежені можливості обчислювальних засобів, що використовуються на тактичному рівні;
- складність організації стійких мереж зв'язку між мобільними об'єктами управління.

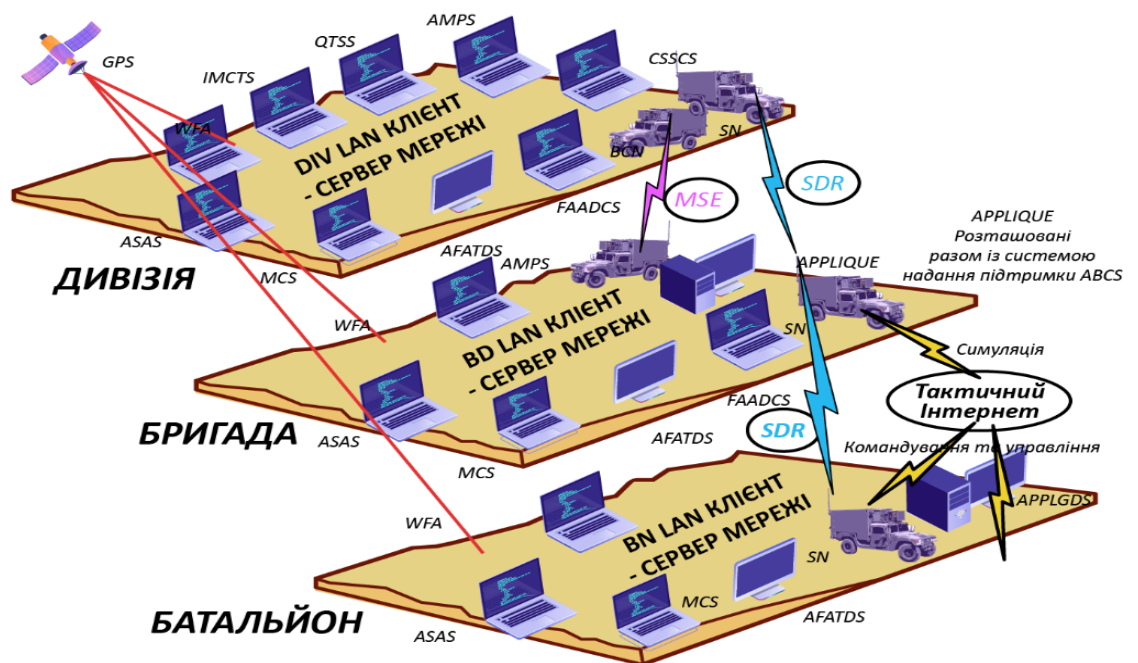


Рисунок 1.1 – Схема передачі інформації між ланками управління армії США [13].

Однією з найбільш відомих автоматизованих систем управління тактичного рівня є американська система Force XXI Battle Command Brigade and Below (FBCB2), серійне виробництво якої розпочалося у 2002 році.

Система FBCB2 забезпечує:

- отримання та відображення інформації про бойову обстановку у реальному масштабі часу;
- визначення географічного положення підрозділів та бойової техніки;
- відображення тактичної обстановки на електронних картах;
- автоматизований обмін повідомленнями, наказами, заявками на вогневу підтримку та іншими оперативними даними;
- інтеграцію геопросторової інформації, даних розвідки та оперативних нормативів у єдиному інформаційному середовищі.

Взаємодія системи FBCB2 з іншими автоматизованими системами управління здійснюється шляхом обміну інформацією з такими системами, як CSSCS (логістичне забезпечення), MCS (управління військами), AFATDS (управління артилерійським вогнем), ASAS (розвідка) та AMDPCS (протиповітряна оборона) [13].

Використання таких систем дозволяє забезпечити як централізоване, так і децентралізоване управління військами, скоротити час підготовки до ведення бойових дій, підвищити оперативність реагування на зміну обстановки та забезпечити перевагу у прийнятті управлінських рішень.

У країнах НАТО сучасний етап розвитку автоматизованих систем управління спрямований не лише на створення нових систем, але й на забезпечення сумісності національних систем відповідно до єдиних стандартів альянсу [2].

Зокрема, система управління армійського корпусу ATCCS (Army Tactical Command and Control System) включає п'ять функціональних підсистем, що забезпечують управління маневром військ, вогневою підтримкою, протиповітряною обороною, розвідкою та всебічним забезпеченням [14].

Передача інформації між компонентами системи здійснюється через мережі зв'язку MSE, SINCGARS та ADDS, що забезпечують взаємодію з іншими видами збройних сил, системами НАТО та цивільними інформаційними мережами.

Подальший розвиток автоматизованих систем управління пов'язаний із реалізацією концепції Network-Centric Warfare, що передбачає створення єдиного інформаційного середовища управління військами.

Важливим елементом такої інфраструктури є система WIN-T (Warfighter Information Network – Tactical), архітектура якої наведена на рис. 1.2.

Система WIN-T забезпечує функціонування мобільної комп'ютерної мережі тактичного рівня, що охоплює ланки управління від бригади до окремого військовослужбовця. Вона забезпечує сумісність з існуючими інформаційними мережами корпусу та дивізії, а також підтримує передачу даних через супутникові канали зв'язку.

Сучасні напрями розвитку автоматизованих систем управління військами пов'язані з використанням новітніх інформаційних технологій, зокрема методів штучного інтелекту, систем розпізнавання образів, технологій обробки великих даних та розподілених інформаційних систем [2].



Рисунок 1.2 – Архітектура тактичної системи WIN-T Warfighter Information Network – Tactical

Досвід провідних країн світу свідчить, що подальший розвиток автоматизованих систем управління військами пов'язаний із створенням

інтегрованих інформаційних систем, здатних забезпечити ефективне управління військами в умовах високої динаміки сучасних бойових дій.

1.2 Аналіз автоматизованих систем управління військами Збройних Сил України

Перші спроби створення автоматизованих систем управління військами у Збройних Силах України були здійснені у межах дослідно-конструкторської роботи «Каліна-1», розпочатої у 2006 році. Метою цієї розробки було створення автоматизованої системи управління для Об'єднаного оперативного командування. Однак проєкт не був доведений до стадії практичного впровадження і у 2011 році був припинений. За відкритими даними, фінансові витрати на виконання цієї дослідно-конструкторської роботи становили 6,589 млн гривень.

Початок бойових дій на сході України у 2014 році суттєво актуалізував потребу у створенні ефективних засобів автоматизації управління військами. У цей період з'явилися перші практичні рішення, створені волонтерськими організаціями, зокрема система «Дельта», розроблена громадською організацією «Аеророзвідка». Основною функціональною можливістю цієї системи було відображення на електронній карті поточного положення власних військ та нанесення виявлених об'єктів противника з подальшою передачею цієї інформації для вогневого ураження.

У 2017 році майнові права на систему «Дельта» були передані Міністерству оборони України, що створило передумови для її подальшого розвитку та інтеграції у систему управління Збройних Сил України.

Паралельно здійснювалася розробка автоматизованої системи управління «Дзвін-АС», яка розглядалася як один із базових елементів перспективної Єдиної автоматизованої системи управління Збройних Сил України. Проте результати аудиту цієї розробки виявили низку суттєвих проблем, пов'язаних з архітектурою системи та організацією її програмного забезпечення.

Зокрема, було встановлено, що система не забезпечує повної сумісності із стандартами інформаційної взаємодії НАТО, що є важливою вимогою для інтеграції українських систем управління у спільний інформаційний простір країн-партнерів. Крім того, у процесі розробки використовувалося стороннє програмне забезпечення з комерційними ліцензіями, що ускладнює подальшу модернізацію та масштабування системи.

Однією з ключових технічних проблем «Дзвін-АС» стала відсутність відкритих стандартизованих програмних інтерфейсів (API), які забезпечують інтеграцію різноманітних інформаційних систем, сенсорів, засобів розвідки та озброєння у єдиному інформаційному середовищі. За відсутності таких інтерфейсів створення комплексної системи управління військами значно ускладнюється.

Незважаючи на тривалий період інформатизації Збройних Сил України [17], у Стратегічному оборонному бюлетені України 2016 року ефективність системи оперативного управління, зв'язку, розвідки та спостереження у силах оборони України була оцінена як недостатня.

Разом із тим у стратегічних документах держави визначено необхідність створення сучасної системи управління військами, побудованої за принципами архітектури C4ISR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), що відповідає стандартам та рекомендаціям США і НАТО [18].

Практичний досвід ведення бойових дій свідчить, що процес планування бойових дій на тактичному рівні у ряді випадків займає від двох до чотирьох годин. Однією з причин цього є відсутність єдиної інтегрованої системи управління військами, а також фрагментарний характер існуючих автоматизованих систем та інформаційних ресурсів.

Сучасний стан забезпечення Збройних Сил України даними про місцевість та об'єкти на ній характеризується обмеженим використанням можливостей комп'ютерної техніки та засобів цифрової картографії у процесах створення та обробки просторових даних. Це суттєво ускладнює впровадження сучасних

інформаційних технологій для забезпечення автоматизованих систем управління військами та систем навігації.

Незважаючи на зазначені проблеми, у Збройних Силах України здійснюється поступове впровадження окремих автоматизованих систем управління. Проте їх застосування має переважно фрагментарний характер, а інтеграція у єдину інформаційну систему управління поки що не досягнута.

У державних програмах розвитку Збройних Сил України передбачено створення Єдиної автоматизованої системи управління (ЄАСУ), яка має забезпечити інтеграцію інформаційних ресурсів, систем управління військами та систем управління оборонними ресурсами.

Разом із тим реалізація цієї концепції пов'язана з рядом організаційних та технологічних проблем. Аналіз існуючих розробок показує, що створені компоненти інформаційної інфраструктури відрізняються за часом створення, масштабом впровадження, використаними технологіями та ступенем завершеності [21].

У разі механічного об'єднання таких систем вони не формують єдину автоматизовану систему управління, оскільки не забезпечують синхронізацію процесів управління військами, озброєнням та оборонними ресурсами у реальному масштабі часу [22].

Вирішення зазначених проблем потребує комплексного підходу до організації розробки та впровадження автоматизованих систем управління військами. Одним із ключових напрямів є впровадження систем управління життєвим циклом автоматизованих систем відповідно до стандарту ISO/IEC/IEEE 29148:2018, який визначає вимоги до формування функціональних вимог до систем та їх компонентів.

Дослідники проблем інформатизації Збройних Сил України відзначають, що фрагментарність існуючих автоматизованих систем управління, неузгодженість проектної діяльності та відсутність єдиної архітектури інформаційної інфраструктури є одними з основних перешкод на шляху створення повноцінної ЄАСУ Збройних Сил України [24].

Ефективним напрямом вирішення цієї проблеми є впровадження автоматизованих систем управління життєвим циклом автоматизованих систем управління військами, що дозволить перейти від ручного управління проектами до автоматизованого управління програмами та портфелями проектів створення інформаційних систем.

При цьому формування функціональних вимог до таких систем повинно здійснюватися з урахуванням:

- загальносистемних принципів побудови інформаційних систем;
- існуючих автоматизованих систем управління;
- обмежень фінансових та кадрових ресурсів;
- вимог державних та відомчих нормативних документів.

Крім того, необхідно враховувати перспективні доктринальні документи НАТО, зокрема доктрину AJP-06(A) щодо вимог до комунікаційно-інформаційних систем, а також стандарти життєвого циклу систем та програмного забезпечення [29 – 31].

Важливе значення мають також стандарти НАТО у сфері забезпечення якості програмного забезпечення та управління життєвим циклом систем, зокрема STANAG 4107 [33], AQAP-160 [43] та інші нормативні документи, що регламентують створення та експлуатацію інформаційних систем військового призначення.

Таким чином, проведений аналіз сучасного стану автоматизованих систем управління військами у Збройних Силах України свідчить про необхідність подальшого розвитку інформаційної інфраструктури управління, забезпечення інтеграції існуючих інформаційних систем та впровадження сучасних інформаційних технологій відповідно до стандартів C4ISR. Важливим напрямом такого розвитку є створення єдиного геоінформаційного середовища, яке забезпечує своєчасне отримання, обробку та передачу даних про оперативну обстановку між різними рівнями управління. Це, у свою чергу, потребує активного впровадження геоінформаційних технологій, засобів просторового аналізу та систем підтримки прийняття рішень, що дозволяють підвищити рівень

ситуаційної обізнаності органів управління та скоротити час прийняття управлінських рішень у динамічних умовах ведення бойових дій.

1.3 Обґрунтування необхідності впровадження геоінформаційних систем військового призначення в автоматизовані системи управління військами

Ефективність сучасних систем управління військами безпосередньо залежить від швидкості отримання, оброблення та використання інформації про оперативну обстановку. У сучасних умовах ведення збройної боротьби вирішальне значення має не лише рівень технічного оснащення військ, а й ефективність інформаційного забезпечення процесів управління, що забезпечує формування ситуаційної обізнаності (situational awareness) та підтримку прийняття управлінських рішень.

Сучасні підходи до побудови систем управління військами базуються на інтеграції інформаційних, комунікаційних та обчислювальних технологій у межах архітектури C2 та C4ISR, що передбачає створення єдиного інформаційного середовища управління. У межах таких систем автоматизовані системи управління військами (АСУВ) виконують функції збору, оброблення, аналізу та відображення інформації, необхідної для планування операцій, оцінювання обстановки та управління силами і засобами.

Основними функціональними вимогами до сучасних АСУВ є:

- автоматизований збір інформації з різномірних джерел розвідки та спостереження;
- інтеграція даних у єдиному інформаційному середовищі;
- підтримка ситуаційної обізнаності органів управління у режимі реального часу;
- інформаційна підтримка процесів планування та прийняття управлінських рішень.

Взаємозв'язок тенденцій розвитку озброєння та військової техніки з формами і способами ведення збройної боротьби наведено на рис. 1.3.

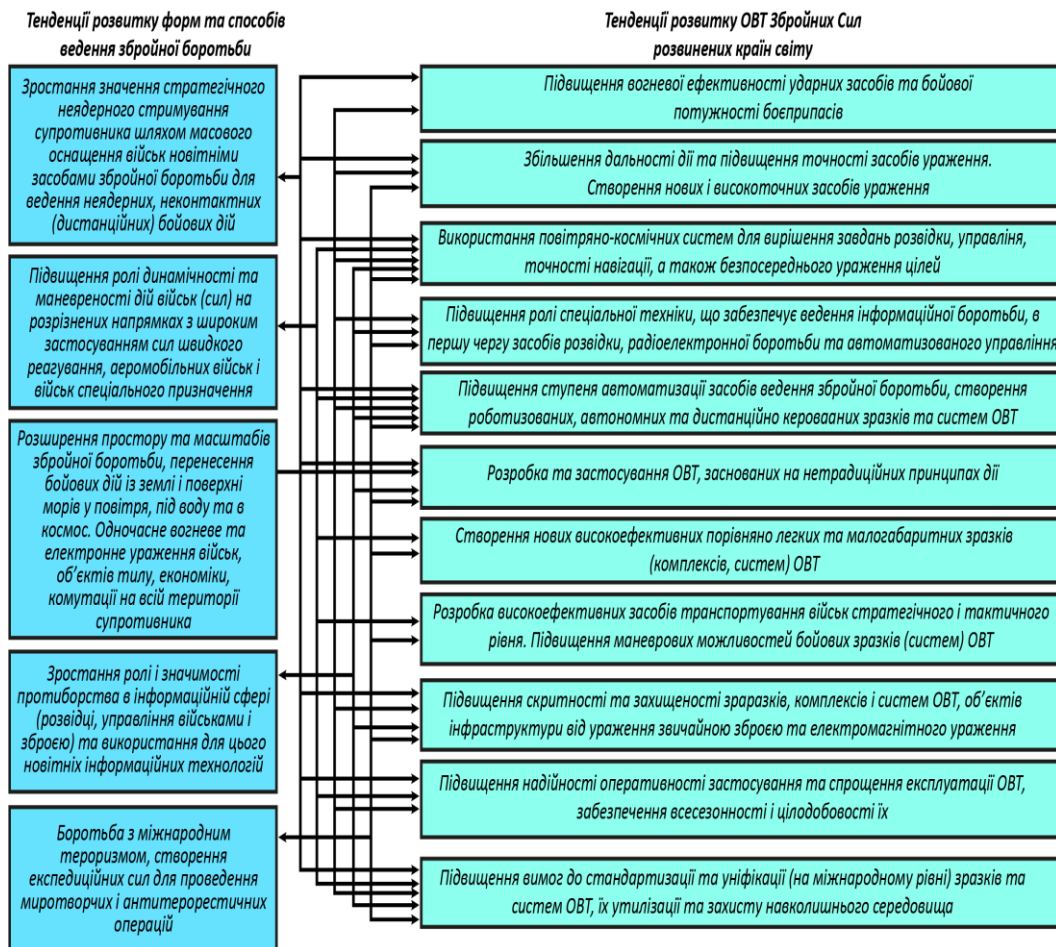


Рисунок 1.3 – Взаємозв'язок тенденцій розвитку ОВТ з тенденціями розвитку форм та способів ведення збройної боротьби [45]

Інформаційна інфраструктура Збройних Сил України формується як сукупність взаємопов'язаних інформаційних систем різних рівнів управління, інтегрованих за вертикальним і горизонтальним принципом. Створення єдиного інформаційного середовища та забезпечення функціонування автоматизованих систем управління військами у режимі, наближеному до реального часу, є одним із ключових факторів підвищення ефективності управління військами [46].

Застосування АСУВ забезпечує можливість автоматизованого формування документів бойового управління, отримання інформації про склад і положення

сил сторін, оцінювання можливих варіантів застосування сил і засобів, а також скорочення часу прийняття управлінських рішень (рис. 1.4).

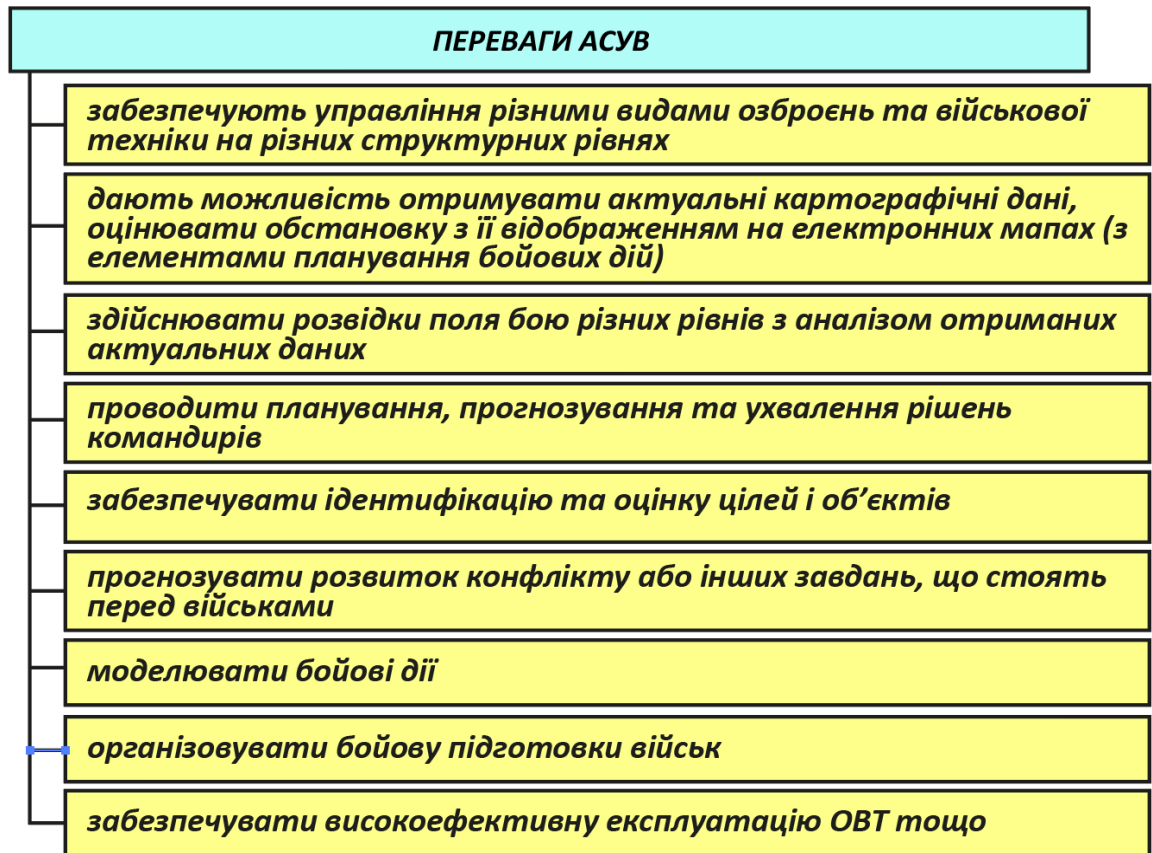


Рисунок 1.4 – Переваги АСУВ [46].

Зазначені чинники спричинили докорінний перегляд поглядів на характер майбутніх операцій і ведення бойових дій, які набули технологічного характеру в усіх сферах воєнної діяльності. Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки, засобів зв'язку і передачі даних, а також інформаційних технологій відкрив широкі можливості для автоматизації процесів управління [45].

Призначення і характер завдань, що вирішуються автоматизованими системами управління військами, визначають їх склад, структуру та використовувані засоби. Передумови переходу до нових форм і способів ведення бойових дій наведені на рис. 1.5, а класифікація АСУВ – на рис. 1.6.

Подальший розвиток автоматизованих систем управління військами пов'язаний із переходом від традиційних ієрархічних моделей управління до мережецентричних архітектур. У класичних ієрархічних системах структура

АСУВ відтворює організаційну структуру військ, що забезпечує чітку вертикаль управління, однак має ряд суттєвих обмежень.

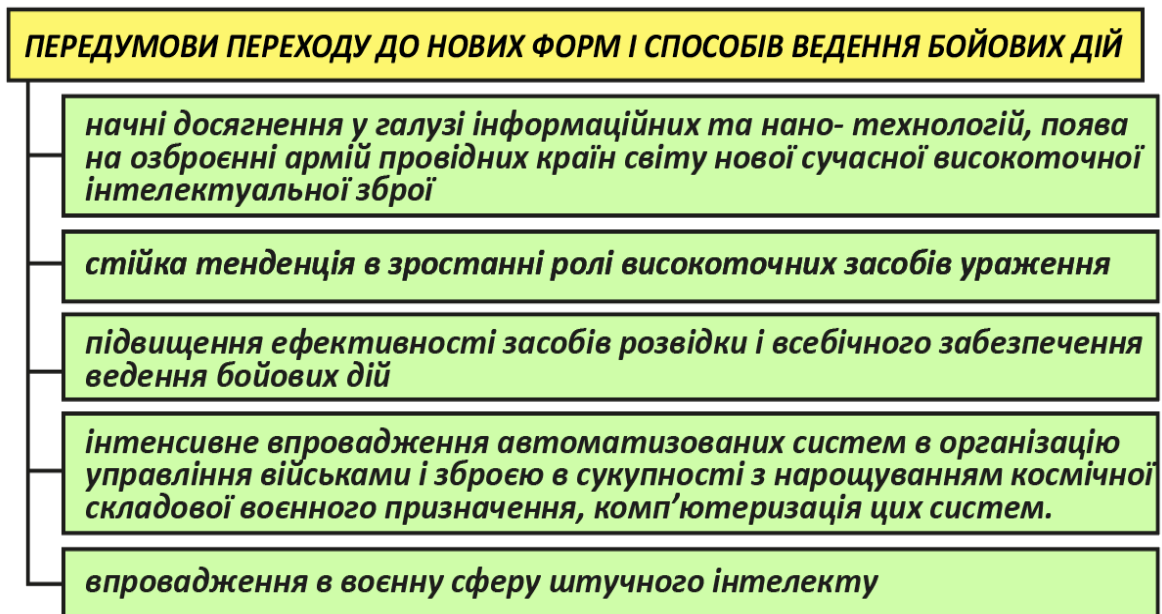


Рисунок 1.5 – Передумови переходу до нових форм і способів ведення бойових дій

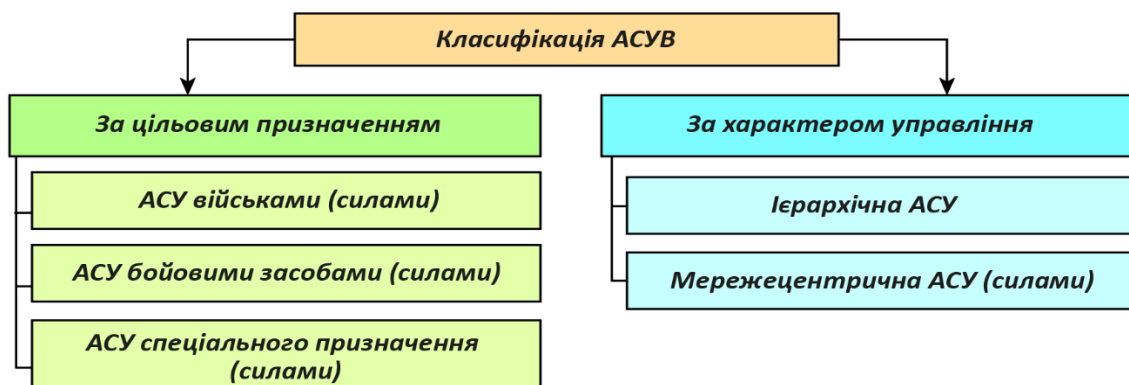


Рисунок 1.6 – Класифікація АСУВ

По-перше, послідовний характер передавання інформації між рівнями управління призводить до затримок у її обробленні та зменшує оперативність реагування на зміну обстановки. По-друге, пошкодження або втрата одного з вузлів управління може призвести до порушення функціонування значної частини системи управління. По-третє, передавання інформації через декілька проміжних

ланок створює ризик її спотворення та ускладнює формування достовірної картини обстановки [47].

Зазначені обмеження традиційних систем управління зумовили необхідність переходу до нових підходів організації управління військами. Перехід до мережецентричних систем управління розглядається як один із ключових напрямів розвитку сучасних систем управління військами [4, 50].

У межах концепції *network-centric warfare* управління військами здійснюється на основі інтегрованого інформаційного середовища, що забезпечує безпосередній доступ органів управління до даних сенсорів, підрозділів та інформаційних систем у реальному масштабі часу. [49].

Мережецентрична модель управління дозволяє скоротити тривалість циклу прийняття рішень OODA-loop (Observe – Orient – Decide – Act) та забезпечує більш високу швидкість реагування на зміну бойової обстановки.

Реалізація принципів мережецентричного управління потребує інтеграції різноманітних інформаційних систем та створення єдиного інформаційного простору геопросторових даних. У зв'язку з цим ключову роль у сучасних автоматизованих системах управління військами відіграють геоінформаційні системи військового призначення (ГІС ВП).

Згідно з результатами досліджень у сфері геоінформаційних технологій, до 80–85 % інформації, яка використовується у процесах військового управління, має просторову прив'язку до місцевості. Це обумовлює необхідність використання геоінформаційних систем як базової технологічної платформи для інтеграції інформаційних ресурсів АСУВ [51, 45].

ГІС ВП поєднують можливості роботи з базами даних, засоби просторового аналізу та візуалізацію інформації на електронних картах. Завдяки цьому вони забезпечують інтеграцію цифрової інформації про місцевість (ЦІМ), оперативно-тактичних даних, розвідувальної інформації та інших інформаційних ресурсів у єдиному інформаційному середовищі.

Основа інформаційного забезпечення ГІС ВП становить цифрова інформація про місцевість (ЦІМ), яка включає дані про рельєф, дорожню мережу,

гідрографію, населені пункти, інженерні споруди та інші об'єкти місцевості. На основі ЦІМ формуються електронні карти (ЕК), що використовуються як базовий інформаційний шар у процесах планування та ведення бойових дій.

Визначальним видом такої інформації є електронні карти (ЕК). Вимоги до електронних карт, що імпортуються до ГІС ВП представлені на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Вимоги до електронних карт, що імпортуються до ГІС ВП

Електронні карти використовуються як основа для відображення оперативної обстановки, розроблення документів управління військами, планування бойових дій, оцінювання впливу характеристик місцевості на застосування військ, а також для виконання розрахунків бойового застосування озброєння та військової техніки. Завдяки використанню геоінформаційних технологій електронні карти забезпечують інтеграцію різномірних геопросторових даних, що надходять із різних джерел, зокрема матеріалів

дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, навігаційних систем та інших інформаційних ресурсів.

Використання електронних карт дозволяє здійснювати оперативний аналіз просторової інформації, виявляти закономірності розвитку обстановки, моделювати можливі варіанти дій військ і оцінювати їх наслідки.

Крім того, дані про місцевість, представлені в електронних картах, у поєднанні з розвідувальною інформацією використовуються для оцінювання обстановки та прогнозування можливих дій противника.

Функціональні можливості ГІС ВП дозволяють вирішувати широкий спектр задач управління військами. Основні задачі, що можуть вирішуватися із застосуванням геоінформаційних систем військового призначення, наведено на рис. 1.8.

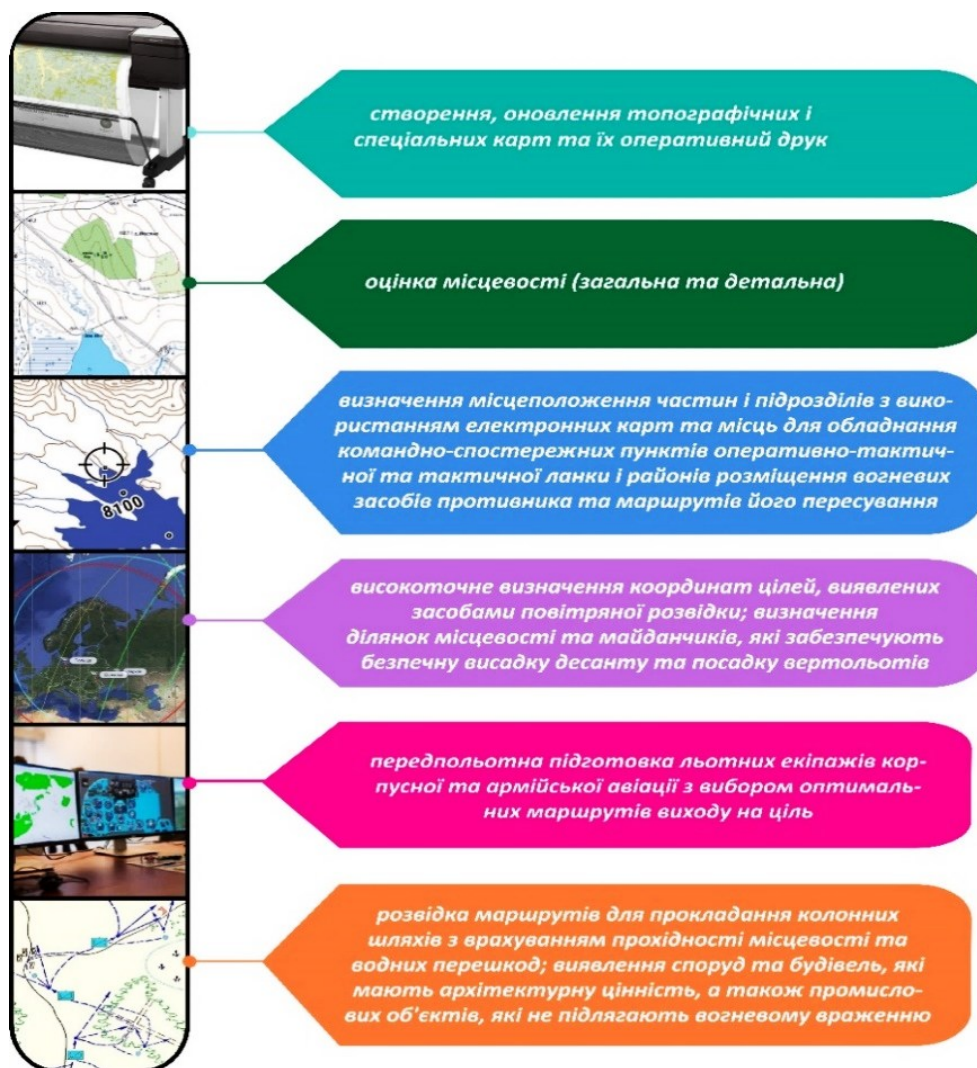


Рисунок 1.8 – Перелік задач, що розв'язуються ГІС ВП

Застосування ГІС ВП під час проведення спецоперацій представлено на рис. 1.9.

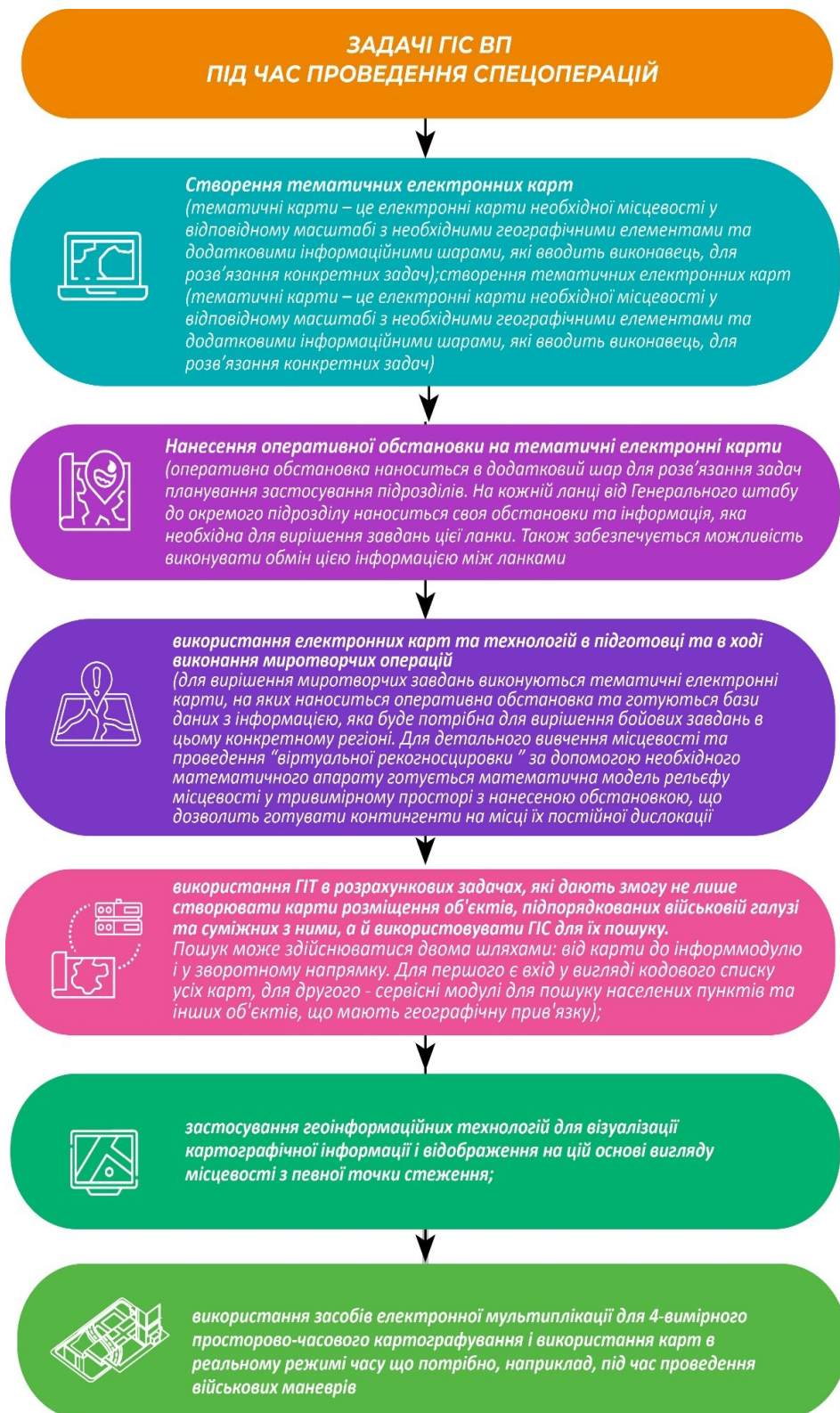


Рисунок 1.9 – Перелік задач, що виконуються ГІС ВП під час проведення спецоперацій

Вищенаведене свідчить чому саме ГІС ВП на сучасному етапі відводиться така важлива роль.

ГІС ВП повинні функціонувати у складі інформаційного забезпечення Єдиної автоматизованої системи управління (ЄАСУ) Збройних Сил України та забезпечувати виконання функцій, представлених у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні функції ГІС ВП ЗС України

	Зміст вимоги
1	<i>Глобальність, єдність (допустима розподіленість) бази даних обстановки</i>
2	<i>Синхронізація даних з декількох джерел, можливість колективної роботи, а також можливість автономної роботи з наступною синхронізацією локальних даних із централізованими сховищами даних</i>
3	<i>Можливість ведення карти відповідно до вимог, прийнятих у Збройних Силах України, і можливість аналізу місцевості й обстановки</i>
4	<i>Надійність (система повинна забезпечувати збереження даних у критичних ситуаціях)</i>
5	<i>Оперативність (у режимі реального часу має видати повну й актуальну інформацію про наявну обстановку)</i>
6	<i>Робота з даними великого об'єму в реальному масштабі часу</i>
7	<i>Простота і зручність інтерфейсу, його інтуїтивна зрозумілість</i>
8	<i>Розмежування доступу до даних</i>
9	<i>Можливість трансформації геоінформаційної системи під нові потреби Збройних Сил України</i>
10	<i>Забезпечення автоматизації процесу розробки бойових графічних документів та складання спеціальних карт</i>

Для забезпечення ефективного функціонування ГІС ВП необхідно створити централізовану систему управління геопросторовими даними, що включає банки цифрової картографічної інформації, довідкові бази просторових даних та механізми доступу до них [53].

На основі визначених функцій формуються вимоги до геоінформаційних систем військового призначення, наведені у табл. 1.2.

Впровадження геоінформаційних систем військового призначення є необхідною умовою підвищення ефективності автоматизованих систем управління військами. Геоінформаційні системи забезпечують інтеграцію різномірних інформаційних ресурсів, формування ситуаційної обізнаності органів

управління та підтримку прийняття управлінських рішень на основі аналізу геопросторових даних.

Таблиця 1.2 – Вимоги до ГІС військового призначення ЗС України

Номер вимоги	Зміст вимоги
1	Глобальність, єдність (допустима розподіленість) бази даних обстановки
2	Синхронізація даних з декількох джерел, можливість колективної роботи, а також можливість автономної роботи з наступною синхронізацією локальних даних із централізованими сховищами даних
3	Можливість ведення карти відповідно до вимог, прийнятих у Збройних Силах України, і можливість аналізу місцевості й обстановки
4	Надійність (система повинна забезпечувати збереження даних у критичних ситуаціях)
5	Оперативність (у режимі реального часу має видати повну й актуальну інформацію про наявну обстановку)
6	Робота з даними великого об'єму в реальному масштабі часу
7	Простота і зручність інтерфейсу, його інтуїтивна зрозумілість
8	Розмежування доступу до даних
9	Можливість трансформації геоінформаційної системи під нові потреби Збройних Сил України
10	Забезпечення автоматизації процеси розробки бойових графічних документів та складання спеціальних карт

Таким чином, геоінформаційні системи військового призначення виступають ключовим компонентом інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління військами та формують технологічну основу систем підтримки прийняття рішень, що використовують геопросторові дані для аналізу обстановки та обґрунтування управлінських рішень.

Подальший розвиток автоматизованих систем управління військами зумовлює необхідність інтеграції геоінформаційних технологій із системами підтримки прийняття рішень (СППР). У такому випадку геоінформаційні системи військового призначення виконують функції ядра інформаційного середовища, яке забезпечує інтеграцію просторових даних, оперативної інформації та аналітичних інструментів. Використання ГІС у складі СППР дозволяє автоматизувати процеси аналізу оперативної обстановки, оцінювання можливих варіантів дій військ та прогнозування розвитку бойових дій [51, 45].

Зростання обсягів інформації, що надходить від сучасних засобів розвідки та спостереження, призводить до збільшення інформаційного навантаження на органи військового управління. У цих умовах особливого значення набувають методи інтелектуальної обробки даних, спрямовані на зменшення інформаційної невизначеності під час оцінювання обстановки. Геоінформаційні системи дозволяють інтегрувати різноманітні інформаційні ресурси та виконувати просторовий аналіз даних, що є необхідною передумовою підвищення ефективності процесів підтримки прийняття управлінських рішень [48].

Таким чином, подальший розвиток автоматизованих систем управління військами потребує створення нових підходів до організації інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень на основі геоінформаційних технологій. Це обумовлює необхідність розроблення спеціалізованих моделей та методів оброблення геопросторових даних, які забезпечують інтеграцію цифрової інформації про місцевість, оперативної обстановки та аналітичних інструментів у межах єдиного інформаційного середовища управління військами.

Реалізація зазначених підходів дозволяє скоротити час прийняття управлінських рішень та підвищити обґрунтованість планування бойових дій і ефективність управління силами та засобами.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз розвитку автоматизованих систем управління військами у збройних силах провідних держав світу показав, що сучасні системи управління базуються на концепціях C4ISR та мережецентричних операцій (network-centric warfare). Використання таких архітектур забезпечує інтеграцію засобів розвідки, управління, зв'язку та ураження в єдине інформаційне середовище, що дозволяє скоротити цикл прийняття управлінських рішень OODA-loop та підвищити рівень ситуаційної обізнаності органів управління.

2. Аналіз сучасного стану автоматизації управління у Збройних Силах України показав, що існуючі інформаційні системи характеризуються фрагментарністю архітектури та недостатнім рівнем інтероперабельності. Відсутність відкритих програмних інтерфейсів (API) та єдиних стандартів інформаційної взаємодії ускладнює інтеграцію окремих систем у єдине інформаційне середовище управління та потребує впровадження підходів управління життєвим циклом інформаційних систем відповідно до стандартів НАТО (STANAG).

3. Встановлено, що значна частина інформації, яка використовується у процесах військового управління, має просторово-координатну прив'язку, що визначає геоінформаційні системи військового призначення як технологічну основу інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління військами. Використання ГІС ВП забезпечує інтеграцію цифрової інформації про місцевість, електронних карт та оперативних даних, а також дозволяє автоматизувати задачі просторового аналізу.

4. Проведений аналіз показав наявність протиріччя між стрімким зростанням обсягів геопросторової інформації, що надходить від сучасних засобів спостереження і розвідки, та обмеженим часом органів управління на її обробку і аналіз. Це обумовлює необхідність розроблення моделей і методів інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем військового призначення.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено теоретико-методичний апарат інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень (СППР) у геоінформаційних системах військового призначення. Основну увагу зосереджено на формалізації процесів отримання, обробки та передачі геопросторової інформації у системах управління військами (СУВ) з метою мінімізації невизначеності оперативної обстановки.

Обґрунтовано застосування ентропійного підходу для кількісного оцінювання ефективності впровадження геоінформаційних систем, що дозволяє визначити приріст інформації у каналі управління. Представлено образно-знакову модель електронної карти, яка вперше формалізована як інформаційний канал, що забезпечує не лише візуалізацію, а й семантичне структурування та передачу просторово-часових даних від театру бойових дій до особи, що приймає рішення.

У розділі також отримали подальший розвиток алгоритми пошуку оптимальної структури геоінформаційних систем військового призначення, що базуються на математичних функціонально-статистичних моделях та методах статистичної лінеаризації. Запропонований підхід дозволяє формувати динамічно адаптовані архітектури ГІС, які враховують стохастичний характер бойових дій та інтенсивність інформаційних потоків.

2.1 Метод оцінювання приросту інформації для геоінформаційних систем військового призначення у системах управління військами

Запропоновано метод оцінювання приросту інформації, що отримується у процесі застосування геоінформаційних систем військового призначення у системах управління військами на основі ентропійного підходу [56].

Процес управління ЗС і військовими підрозділами зазвичай розтягнутий у часі і може вестися або безперервно, або дискретно з певною частотою $1/T_n$, яка обирається за умови достатності часу для зменшення невизначеності до заданого рівня при певній інтенсивності управління. Його можна розглядати як процес виконання ГІС ВП за певним алгоритмом складних k завдань (випробувань, досліджень) $G_{ij} (1 = l, 2, \dots, k) \quad (j = 1, 2, \dots, l)$, що не перевершують l випробування. У процесі здійснення цих випробувань частина невизначеності (ентропія) замінюється інформацією, тобто процес управління військовими об'єктами зводиться до одночасного паралельного або зсунутого у часі переведення багатовимірної вектора $X(x_i, t, \tau)$ у багатомірний вектор $Y(y_i, t, \tau)$ $X \rightarrow Y$ (рис. 2.1).

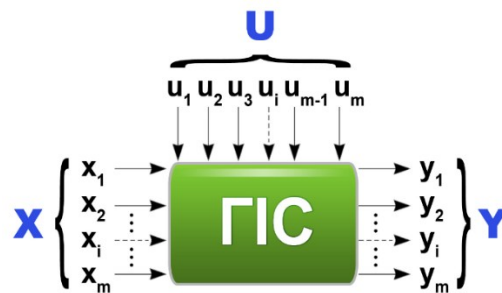


Рисунок 2.1 – Вхідні і вихідні сигнали ГІС ВП

Для спрощення викладу, обмежимося розглядом інформаційних взаємодій. Властивості такої системи передбачають наявність у ній елементів і зв'язків різної природи. Відслідковуючи ці зв'язки, можна побачити результат взаємодії не тільки елементів, а й усієї системи.

У процесі функціонування до ГІС ВП надходять дані і інформація про стан досліджуваних об'єктів, фіксуючи тим самим певні властивості зовнішніх і внутрішніх процесів та явищ, що відбуваються на театрі військових дій і впливають на них [51]. Володіючи можливістю фіксації зміни станів військових об'єктів, впливом на них інших систем і природних чинників, ГІС ВП аналізує ці зміни і інтерпретує їх, надаючи тим самим додаткову інформацію в канал

управління [48], тобто переводить об'єкт управління військовими об'єктами в новий апостеріорний стан, який визначається вектором .

Відомо декілька способів визначення кількості приросту інформації: ентропійний; алгоритмічний; комбінаторний; семантичний і прагматичний [54].

Найбільш доцільним способом оцінки приросту інформації, яку можна отримати за допомогою впровадження ГС ВП, є ентропійний підхід. Ентропія має переваги перед імовірнісною оцінкою приросту кількості інформації, оскільки не пов'язана із статистичними законами розподілу випадкових величин. За величиною ентропії можна судити про рівні надійності каналів ГС і вибір оптимального каналу з точки зору надійності.

Кількість інформації, що отримується у процесі управління військовими об'єктами (підрозділами, силами), дорівнює зміні ентропії:

$$I_{G_{ij}}(X, t, \tau) = H_0(X, t, \tau) - H_{G_{ij}}(X, t, \tau),$$

де $H_{G_{ij}}(X, t, \tau) = p_{G_{ij}} H_{G_{ij}}(X, t, \tau) + \dots + p_{G_{il}} H_{G_{il}}(X, t, \tau)$ – умовна ентропія стану об'єкта управління при здійсненні складного завдання (дослідження) G_{ij} , що складається з l підвипробувань;

$p_{G_{ij}}$ – імовірність результату завдання G_{ij} .

Найбільш цікавими для практики є випадки, коли має місце точне, але з запізнюванням на відтворення стаціонарного випадкового процесу [55]:

$Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t - \tau_3, \tau)$, або коли вихідний процес відтворюється без запізнювання, але діє вектор збурень U (рис. 2.5), який не залежить від вхідного процесу: $Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t - \tau_3, \tau) + U(u_j, t, \tau)$, де $j = 1, 2, \dots, m$.

При цьому передбачається, що вектор $X(t, \tau)$ характеризує апіорний стан об'єкта без урахування раптових відмов (надзвичайних або аварійних) ситуацій.

Середню кількість інформації, отримувану при переведенні вектора, можна визначити за формулою [55]:

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(X, Y, t, \tau) \log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau) f(Y, t, \tau)} dXdY, \quad (2.1)$$

де $f(X, Y, t, \tau)$ – загальний диференціальний закон розподілу векторів X і Y ;

$f(X, t, \tau)$ – диференціальний закон розподілу вектора X ;

$f(Y, t, \tau)$ – диференціальний закон розподілу вектора Y .

Виконавши певні перетворення, формулу (2.1) представимо у вигляді:

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(X, t, \tau) - m_Y [H_Y(X, t, \tau)],$$

або

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(Y, t, \tau) - m_X [H_X(Y, t, \tau)],$$

де $H(X, t, \tau) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(X, t, \tau) \log_2 f(X, t, \tau) dx$ – апіорна ентропія вектора X ;

$m_Y [H_Y(X, t, \tau)] = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(X, t, \tau, Y) \log_2 f(X, Y, t, \tau) dXdY$ – усереднене за

вихідними параметрами значення ентропії після одержання сигналів на виході;

$f_Y(X, t, \tau)$ – умовний диференціальний закон розподілу вектора X при одержанні вектора Y . При цьому отримуємо [3]

$$f_Y(X, t, \tau) = \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(Y, t, \tau)}.$$

При нормальному законі розподілу випадкових векторів на вході і виході ГПС у процесі управління територіями маємо:

$$f(X, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(X - m_X)^2}{2\sigma_X^2} \right\}; \quad (2.2)$$

$$f(Y, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(Y - m_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right\}. \quad (2.3)$$

Далі знаходимо:

$$\begin{aligned} & \log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau)f(Y, t, \tau)} = \\ & = \log_2 \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} - \frac{r^2 \log_2 e}{2(1-r^2)} \left[\frac{(X - m_X)^2}{\sigma_X^2} - \frac{2(X - m_X)(Y - m_Y)}{r\sigma_X\sigma_Y} + \frac{(Y - m_Y)^2}{\sigma_Y^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Підставивши вирази (2.2), (2.3) і (2.4) в формулу (2.1), після певних перетворень можна отримати:

$$\begin{aligned} I(X \rightarrow Y, t, \tau) &= \log_2 \frac{1}{\sqrt{1-r_{XY}^2(t, \tau)}} = -\frac{1}{2} \log_2 [1 - r_{XY}^2(t, \tau)], \\ r_{XY}(t, \tau) &= \frac{1}{\sigma_X \sigma_Y} \int_{-\infty}^{\infty} (X - m_X)(Y - m_Y) f(X, Y, t, \tau) dXdY, \end{aligned}$$

де r_{XY} – коефіцієнт кореляції векторів X, Y ; $\sigma_X^2(t, \tau)$ – дисперсії векторів X, Y .

Ентропія випадкового m -мірного вектора $X(t, \tau)$, що підпорядковується нормальному закону розподілу, дорівнює: $H(X, t, \tau) = \log_2 \sqrt{(2\pi e)^m |R^{XX}|}$.

Середня кількість інформації при перетворенні $X \rightarrow Y$ можна виразити через кореляційні матриці:

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{|R|}{|R^{XX}| + |R^{YY}|}, \quad (2.5)$$

$$\text{де } R^{XX} = \begin{vmatrix} R_1^{XX} & \dots & R_{1m}^{XX} \\ R_2^{XX} & \dots & R_{2m}^{XX} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^{XX} & \dots & R_{mm}^{XX} \end{vmatrix}; \quad R^{YY} = \begin{vmatrix} R_1^{YY} & \dots & R_{1m}^{YY} \\ R_2^{YY} & \dots & R_{2m}^{YY} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1}^{YY} & \dots & R_{mm}^{YY} \end{vmatrix}; \quad R^{XY} = \begin{vmatrix} R_{11}^{XX} & \dots & R_{1m}^{XX} & R_{11}^{XX} & \dots & R_{1m}^{XY} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1}^{XX} & \dots & R_{mm}^{XX} & R_{11}^{XY} & \dots & R^{XY} \\ R_{11}^{XY} & \dots & R_{1m}^{XY} & R_{11}^{YY} & \dots & R_{1m}^{YY} \\ R_{m1}^{XY} & \dots & R_{mm}^{XY} & R_{1m}^{YY} & \dots & R_{mm}^{YY} \end{vmatrix}$$

– кореляційні визначники, що відповідають кореляційним матрицям, складеним з кореляційних моментів:

$$\begin{aligned} R_{\nu\mu}^{XX} &= m[(X_\nu - m_{X_0})(X_\mu - m_{X_\mu})]; \\ R_{\nu\mu}^{YY} &= m[(Y_\nu - m_{Y_0})(Y_\mu - m_{Y_\mu})]; \\ R_{\nu\mu}^{XY} &= [m(X_\nu - m_{Y_\mu})(X_\mu - m_{X_\mu})]. \end{aligned}$$

При незалежних компонентах вектора $X(t, \tau)$ маємо $R_{\nu\mu}^{XX} = \begin{cases} \sigma_0^2 & \text{при } \nu = \mu \\ 0 & \text{при } \nu \neq \mu \end{cases}$, а ентропія вектора дорівнює $H(X, t, \tau) = \log_2 \sigma_1 \sqrt{2\pi e} + \dots + \log_2 \sigma_m \sqrt{2\pi e}$.

Відомо, що ступінь зв'язку між випадковими процесами характеризується кореляційною функцією. Якщо вихідний вектор $Y(t, \tau)$ не пов'язаний з вхідним вектором $X(t, \tau)$, то $R_{\nu\mu}^{XX} = 0$, тобто кількість інформації, що надходить у процесі управління, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) = 0$.

При урахуванні усіх характеристик вектора $X(t, \tau)$ коефіцієнт кореляції $r_{XY}(t, \tau) \rightarrow 0$, отже $I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow \infty$. Для одновимірного випадкового процесу формула (2.5) перетворюється в формулу

$$I(x_i \rightarrow y_i, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 [1 - r^2(t, \tau)],$$

де

$$r(t, \tau) = -\frac{R_{11}^{XX}(t, \tau)}{\sigma_X(t, \tau)\sigma_Y(t, \tau)} - \text{коефіцієнт кореляції.}$$

Розглянемо окремі випадки одновимірної передачі інформації. При запізнюванні відтворення

$$y(t, \tau) = x(t - \tau_3, \tau);$$

$$r(t, \tau) = -\frac{1}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int [x(t) - m_x] [x(t - \tau_3) - m_x] f(x, y, t, \tau) dx dy,$$

або остаточно $r(t, \tau) = \frac{R(\tau_3)}{R(0)}$, де $R(\tau_3)$ – кореляційна функція центрованої

випадкової величини; $R(0) = \sigma^2$ – дисперсія.

Кількість інформації у цьому випадку дорівнює:

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \left[1 - \frac{R^2(\tau_3)}{R^2(0)} \right].$$

Оскільки $0 \leq R(\tau_3)/R(0) < 1$ при $\tau_3 > 0$, то $\infty > I(x \rightarrow y, t, \tau) \geq 0$.

ГІС ВП спроможна надати додаткову інформацію про стан об'єкта, якщо вона представляє вихідний вектор $Y(t, \tau)$ при мінімальній затримці τ_3 : при $\tau_3 \rightarrow 0$

$$R(\tau_3) \rightarrow 0 \text{ і, отже, } I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow \infty.$$

ГІС ВП практично не надає додаткової інформації про стан об'єкта дослідження, якщо вона представляє вихідний вектор $Y(t, \tau)$ з великою затримкою τ_3 : при $\tau_3 \rightarrow \infty$ $R(\tau_{33}) \rightarrow 0$ і, отже, $I(X \rightarrow Y, t, \tau) = 0$.

При наявності шумів $u(t, \tau)$ і нормальному розподілі параметрів x, y маємо:

$$y(t, \tau) = x(t, \tau) + u(t, \tau),$$

$$\sigma_Y^2(t, \tau) = \sigma_x^2(t, \tau) + \sigma_u^2(t, \tau),$$

$$r(t, \tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int (x - m_x)(y - m_y) f(x, y, t, \tau) dx dy = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_x^2}}}.$$

Середня кількість інформації, яку можна отримати при наявності шумів, дорівнює:

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2(1 - r^2) = \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2}.$$

Якщо точність переведення вхідного вектора $X(t, \tau)$ у вихідний вектор $Y(t, \tau)$ є невисокою (присутні похибки), так що $\sigma_u \gg \sigma_x$, то

$$\frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2} \rightarrow 1 \text{ і отже } I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow 0.$$

ГІС ВП спроможна надати істотну кількість інформації про стан об'єкта при високій точності переведення вхідного вектора $X(t, \tau)$ у вихідний вектор $Y(t, \tau)$.

При $\sigma_u \gg \sigma_x$ $\frac{\sigma_x^2}{\sigma_u^2} + 1 \rightarrow \infty$ і, отже, $I(x \rightarrow y, t, \tau) \rightarrow \infty$.

Таким чином, середня кількість інформації, що отримується СУВ при використанні ГІС ВП при нормальному законі розподілу параметрів і похибок, залежить:

- від дисперсії похибок і точності ГІС;
- від ступеня зв'язку векторів X і Y ;
- затримки відтворення.

За результатами проведеного автором моделювання встановлено, що застосування ГІС військового призначення дозволяє зменшити ентропію інформаційного стану системи управління на 35–45 %, що свідчить про підвищення інформативності каналу управління в середньому на 40 %[56].

При законах розподілу вихідних параметрів і завад, які відрізняються від нормальних, середня кількість інформації, що отримується у процесі контролю, визначається за формулою (2.1).

Практична реалізація запропонованого методу можлива у сучасних геоінформаційних системах військового призначення, які використовують бази геопросторових даних, засоби просторового аналізу та програмні модулі підтримки прийняття рішень.

2.2 Образно-знакова модель карти як інформаційного каналу геоінформаційних систем військового призначення

До основних понять теорії геоінформаційних систем військового призначення належать картографічна інформація, міра її вимірювання та інформаційні характеристики ГІС. Для їх визначення розглянемо образно-знакову модель карти як інформаційного каналу [57].

Згідно з методикою [58, 59], окрім картографічної інформації ГІС вміщує ще й різні джерела похибок. При застосуванні ймовірнісного варіанту всі повідомлення про картографічні об'єкти, похибки їх обробки і передачі та іншу інформацію оцінюються як випадкові “об'єкти”, що мають певні “інформаційні” характеристики.

Щоб визначити ці характеристики та їх кількісні параметри, перейдемо від розглядання випадкового об'єкту до випадкового дослідження над ним. Як варіант

випадкового дослідження можна взяти результати пошуку чи вибору картографічного об'єкту на топографічній карті.

Припустимо, що ми маємо справу з аналізом станів, які будуть прийняті як витoki дослідження, а значення приймаємо як ймовірності цих витоків. Такий підхід дозволяє легко перейти до кількісної міри невизначеності випадкового дослідження, запропонованій в [54].

Ентропія $H(P_1, P_2, \dots, P_k) = -\sum P_i \cdot \log p_i$, приймається як міра невизначеності випадкового дослідження і позначається як $H(A)$.

При використанні в ГІС ВП карти найчастіше має місце не один дослід, а декілька, тому необхідно розглядати використання карти як складний дослід. Наприклад, одночасно можуть бути задіяні дослідження A і B .

Зазначивши кінцевий результат складного дослідження як (a_i, b_i) , а його ймовірність, як $P(a_i, b_i) = r_{ij}$, визначимо ентропію складного дослідження AB у вигляді:

$$H(AB) = -\sum \sum r_{ij} \log r_{ij}$$

У загальному випадку ймовірність має вигляд:

$$P(a_i b_i) = P(a_i)P(b_j | a_i) = P(b_j) \cdot (a_i | b_j)$$

Якщо a_i є виток дослідження A , то ймовірність витоків $b_j (j = 1, 2, \dots, l)$ дослідження B у цьому випадку визначиться умовними ймовірностями $P(b_j | a_i)$.

Тому функція $H(B | a_i) = -\sum P(b_j | a_i) \log P(b_j | a_i)$ буде умовною ентропією дослідження B при появі витoku a_i .

Математичне очікування значення $H(B | a_i)$ при усіх витоках a_i носить назву середньоумовної ентропії дослідження B при виконанні дослідження A і позначається

$$H_A(B) = \sum P(a_i) H(B | a_i).$$

Різниця $H(B) - H_A(B)$ характеризує середню зміну невизначеності дослідів B після виконання дослідів A , тому її визначають як середнє значення інформації про дослід B , отриманої як результат здійснення дослідів:

$$I(A, B) = H(B) - H_A(B)$$

Вочевидь, що

$$I(A, A) = H(A) = I(A),$$

тобто ентропія дослідів є власною інформацією дослідів A про самого себе.

Припустимо, що є система переробки і передачі картографічної інформації, в якій на вхід надходить a_n – вхідне повідомлення n про картографічний об'єкт, β_n – вихідне повідомлення, створене системою, коли на вхід поступає a_n і система обробки знаходиться у стані γ_n .

Тоді визначимо ГІС ВП як ймовірнісну модель у наступному вигляді:

$$\beta_n = f(a_n, \gamma_n); \gamma_{n+1} = q(a_n, \gamma_n)$$

де γ_n – стан системи обробки до моменту залучення n -го вхідного повідомлення.

Дане визначення дозволяє у загальному вигляді дані дистанційного зондування Землі як джерело геопросторових даних, яке створює послідовні повідомлення про картографічні об'єкти з обмеженого набору об'єктів, а ГІС ВП як систему обробки послідовностей повідомлень, що надходять на вхід і передачі їх на виході користувачеві.

Висновки про просторові характеристики ГІС ВП почнемо з основної з них – кількості картографічної інформації, яка може надходити, оброблятися і передаватися користувачеві ГІС ВП. З цією метою скористуємося визначенням інформації і ГІС. Вочевидь, що ентропія вхідних повідомлень про картографічні об'єкти $H(a)$ в результаті обробки картографічної інформації перейде в ентропію вихідних повідомлень $H(\beta)$. Тоді інформативну обробку в ГІС ВП можна визначити як кількість інформації, яка дорівнює:

$$I_{обр} = I(f(a, \beta), \beta).$$

Функція $I_{обр}$ характеризується значенням інформації про картографічні об'єкти місцевості в ГІС ВП за результатами обробки вихідних даних. У випадку, коли бази геоданих зберігають “усе” про картографічні об'єкти і $I(a) = I(\beta)$, інформативність обробки в ГІС буде максимальною.

Справедлива нерівність $I(a) \geq I(\beta)$, тобто коли у результаті обробки інформація не збільшується.

В загальному випадку при розрахунку інформативності обробки картографічної інформації в ГІС ВП у першу чергу необхідно врахувати кількість картографічних об'єктів, повідомлення про які занесені до бази даних (БД), кількість збережених числових і атрибутивних показників і характеристик об'єктів, а також показники частоти звернення до цих даних (вірогідність вибору).

Далі, якщо визначити випадкове значення η як повідомлення залучені користувачем, то можна вести мову й про ентропію користувача $H(\eta)$. В результаті отримаємо кількість інформації, яку надає.

$$I_{ГІС} = \min(I(\eta), I(\beta))$$

Інформативність – одна з найважливіших характеристик ГІС. Вона максимальна, коли користувач “знає все” про картографічні об'єкти і відсутні втрати інформації при її обробці і транспортуванні.

Серед інших характеристик ГІС ще одну, не менш важливу характеристику – пропускну спроможність обробки й передачі картографічної інформації користувачем.

Якщо подати на ГІС випадкову величину L , то на виході, як результат обробки і випадкових помилок отримаємо величину β , а користувач отримає випадкову величину. У такий спосіб можна розрахувати кількість інформації $I(a, \eta)$ користувача відносно входу ГІС. При варіюванні випадкової величини L на вході системи кількість інформації $I(a, \beta)$ на виході теж може змінюватися. Тоді значення $C_{\max} = (I(a, \beta), I(a, \eta))$ можна вважати пропускну здатністю ГІС ВП.

C_{\max} характеризує максимальну кількість інформації, яка може бути опрацьована і передана ГІС за одиницю часу, тобто визначає швидкість, з якою ведеться надійне транспортування інформації. Цю характеристику можна поширити й на обробку і передачу картографічної інформації.

Швидкість обробки і передачі інформації визначається формулою $R = k / t$, де k – кількість одиниць картографічної інформації;

t – час, що витрачається на обробку або передачу k одиниць інформації.

В праці [54] було доведено, що можна здійснити якісну і надійну обробку/передачу інформації зі швидкістю, яка не перевищує пропускну здатність. З іншого боку, будь-який спосіб обробки й передачі інформації зі швидкістю, яка перевищує пропускну здатність, призводить до збільшення ймовірності похибок, яка характеризується показником надійності, під яким розуміють ймовірність появи помилки.

Отже, ще однією з важливих характеристик обробки та передачі картографічної інформації в ГІС ВП є її надійність, що визначається як ймовірність появи помилки (картографічне повідомлення β на виході та η – повідомлення, отримане користувачем, різняться від повідомлення L на вході).

Ймовірність похибки назвемо $P(e)$, $P(e) = L(f(I(a, \eta)))$

У загальному випадку помилки в системі зменшують надійну обробку і передачу інформації і гальмують її вихід.

Для підвищення надійності обробки й передачі інформації, зокрема картографічної, важливу роль відіграє спосіб її кодування.

Аналіз об'єктів місцевості, що здійснюється сучасними ГІС, за даними [60] свідчить, що загальна кількість класифікаційних ознак картографічних об'єктів не перевищує значення 900 (760 безпосередньо ознаки об'єктів і 140 підписи до цих об'єктів). У цьому випадку джерела картографічної інформації, що забезпечують послідовну подачу повідомлень про картографічні об'єкти при рівноймовірному виборі об'єктів, мають ентропію, яка дорівнює:

$$H_3 = -\sum \frac{1}{900} \log\left(\frac{1}{900}\right) = \log 900 = 2,95 \text{ знак/об'єкт}$$

Для кодування картографічних об'єктів, як повідомлень достатньо в середньому три десятинні знаки, звідси, стосовно підсистеми ГІС ВП, об'єм бази даних рівня бригади складає щонайменше 500 Мб (це 20–25 тис. користувачів). Об'єм семантичної інформації на 1 користувача ~ 2 Кб [57].

Таким чином, кодування є важливим аспектом підвищення надійності і передачі картографічної інформації. Для ГІС ВП актуальними завданнями сьогодення є спрощення та стандартизація картографічних даних, забезпечення можливості ефективного пошуку, аналізу та візуалізації даних у ГІС та зниження ризику помилок та забезпечення сумісності даних між різними програмними засобами та системами. При цьому можуть використовуватись алфавітно-цифрові коди для позначення об'єктів, які легко розпізнаються за кодом, класифікаційні коди, що відображають класифікацію. Можуть використовуватись ієрархічні моделі, які мають кілька рівнів класифікації, сіткові моделі, які кодуються за допомогою координатної сітки або іншої системи координат. Можуть використовуватись міжнародні стандарти ISO 19115, INSPIRE Data Specifications, Національні стандарти ДСТУ або інші нормативні документи, що регулюють кодування картографічної інформації.

У сучасних геоінформаційних системах військового призначення реалізація запропонованих моделей здійснюється на основі використання баз геопросторових даних, сервісів просторового аналізу та розподілених обчислювальних середовищ. Використання сервіс-орієнтованих архітектур та хмарних технологій дозволяє інтегрувати різноманітні джерела геопросторової інформації та забезпечувати оперативну обробку даних у системах підтримки прийняття рішень.

2.3 Алгоритм пошуку оптимального варіанту ГІС ВП

Геоінформаційні системи військового призначення – складна система, яка визначається головним чином складністю окремих її підсистем. Це означає, що окрім відомих і чітко визначених факторів, що впливають на стан і динаміку ГІС ВП, здійснюється вплив стохастичних параметрів і відповідно до цього її поведінка найчастіше виявляється непередбачуваною. Другою особливістю ГІС

ВП є її ієрархічність, тобто її елементи найчастіше також є складеними системами, які мають свою поведінку, стан і структуру, свої зворотні зв'язки, спостережувані входи і виходи. Третьою особливістю ГІС ВП є її цілісність, тобто всі її частини системи працюють на найкращий (оптимальний) результат та емерджентність.

Пошук оптимального варіанту ГІС ВП є складною задачею, яка потребує врахування значної кількості характеристик території бойових дій та параметрів функціонування геоінформаційної системи військового призначення [62]. Задача оптимізації ГІС належить до числа задач, пов'язаних з оптимізацією складних автоматичних систем і які ґрунтуються на класичних і сучасних математичних методах: варіаційне обчислення, теорія статистичних рішень, теорія ігор, теорія дослідження операцій, теорія інформації, теорія імовірності, метод Понтрягіна, метод динамічного програмування Беллмана тощо [61].

Алгоритм оцінки ефективності і оптимізації ГІС запропонований Зацерковним В.І. [61] і був доопрацьований автором представлений на рис. 2.2.

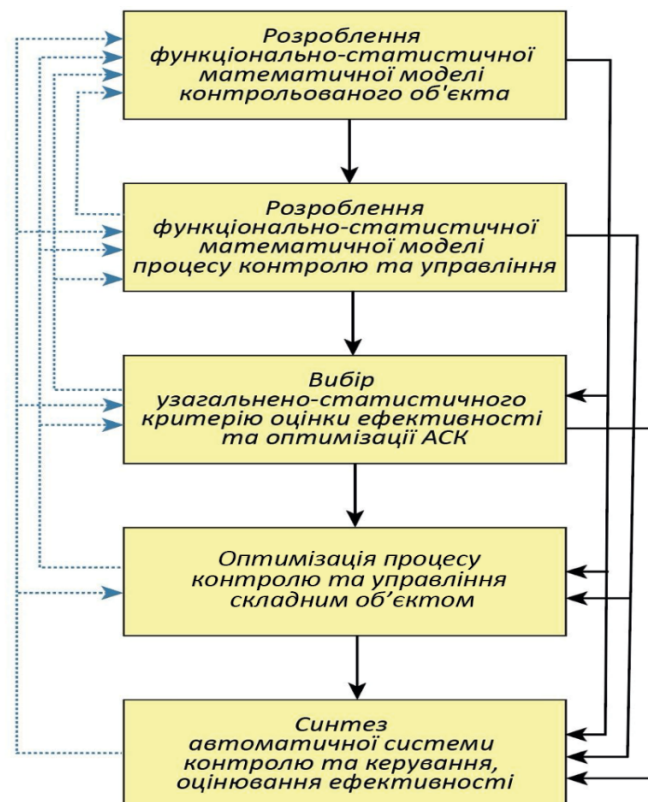


Рисунок 2.2 – Алгоритм оцінки ефективності і оптимізації ГІС

Математична функціонально-статистична модель. Найбільш повно стан об'єкта дослідження характеризує його математична функціонально-статистична

модель (МФСМ), під якою розуміють систему рівнянь, що описує залежність параметрів об'єкта дослідження від зовнішніх і внутрішніх впливів в процесі функціонування ГІС ВП. На основі аналізу цієї моделі з'являється можливість формулювання основних задач, які повинні розв'язуватись ГІС ВП та синтезувати оптимальну структуру ГІС.

При побудові МФСМ необхідно враховувати те, що вона включає в себе різноманітні класи і види систем. Ці системи можуть бути автономними і неавтономними, замкнутими і розімкнутими, стаціонарними і нестаціонарними, безперервними і дискретними. Тому доцільно використовувати загальний математичний апарат, який при відповідних змінах може бути поширений на різноманітні часткові випадки.

Крім того, при побудові МФСМ об'єкта ураховуються основні параметри критеріїв, за якими виконується оптимізація характеристик процесу контролю [61, 63]. До таких параметрів відносяться:

- час протікання процесу в цілому і його складових;
- імовірність безвідмовної роботи і імовірності виконання задачі різними системами, що входять в об'єкт дослідження і ГІС ВП;
- точність роботи різних систем, їх вага, об'єм, вартість, споживана енергія та інші важливі показники.

Збурений стан об'єкта дослідження при моніторингу і управлінні можна описати наступною системою рівнянь, яка в загальному випадку є математичною функціональною моделлю [61, 63].

$$\sum_{\rho}^m M_{l\rho}(t, \tau, d/dt, Q)x_{\rho} = F_l(t, \tau, X, Z); \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (2.6)$$

де $X\{x_1, \dots, x_m\}$ – вектор випадкових функцій часу, який характеризує вихідні параметри об'єкта дослідження;

$Z\{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$ – вектор випадкових функцій часу, який характеризує зовнішні і внутрішні збурення і керуючі впливи;

F_l – нелінійна функція;

$M_{lp}(t, \tau, d/dt, Q)$ – багаточлен відносно операторів диференціювання d/dt зі змінним у часі вектором коефіцієнтів $Q\{q_1, \dots, q_n\}$;

t – поточне значення часу;

τ – момент часу, до якого ведеться дослідження об'єкта.

В процесі моніторингу стану театру бойових дій, яка є динамічною системою і перебуває під впливом керуючих впливів і збурень, визначається вихідними параметрами, певним чином пов'язаними з впливами на систему через відповідний системі рівнянь (2.6) вектор-оператор динамічної системи, заданий або сукупністю математичних операцій $A_{lp}(t, \tau, X, Z, Q)$, або сукупністю лінійних або нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx_i}{dt} = F_{0i}(t, \tau, X, Z) \quad i = 1, 2, \dots, m' \quad (2.7')$$

$$\xi_j = \sum_{i=1}^{k'} \xi_{ij}^0(t, \tau, X) \bar{\xi}_i,$$

де ξ_{ij}^0 – не випадкові координатні функції;

$\bar{\xi}_i$ – випадкові коефіцієнти;

F_{0i} – не випадкові нелінійна функція.

Кожній групі номінальних умов при $t = \tau_0$, $\xi_{01}, \dots, \xi_{0k}$ з номінальної області G_0 і початкових умов x_{01}, \dots, x_{0m} відповідає своє рішення системи рівнянь (2.7):

$$x_{i0} = \varphi_{i0}(\tau_0, \tau, x_{01}, \dots, x_{0m}, \bar{\xi}_{01}, \dots, \bar{\xi}_{0k'}) \quad (2.8)$$

Кожній групі реальних умов в моменти часу $t = \tau_1, x'_{01}, \dots, x'_{0m}, \zeta_1, \dots, \zeta_k, t = \tau_1$, реальній області G_l відповідає реальне рішення системи рівнянь (2.7):

$$x_i = \varphi_i(x'_{01}, \dots, x'_{0m}, \bar{\xi}_1, \dots, \bar{\xi}_k, \tau_1, \tau) \quad (2.9)$$

Система рівнянь (2.7) як за числом нелінійних операторів, так і за числом вихідних параметрів може розпадатися на m окремих рівнянь [61].

Для простоти будемо вважати, що кількість вихідних параметрів дорівнює кількості операторів, хоча, взагалі їх може бути більше. Для i -го параметра система рівнянь (2.6) вироджується в рівняння:

$$M_{I_p}(t, \tau, d/dt, q, \dots, q_n)x_p = F_I(t, \tau, x_i, \zeta_1, \dots, \zeta_k). \quad (2.10)$$

Розгляд рівняння збуреного стану об'єкта дозволяє виконати функціональний аналіз стану об'єкта, синтез системи контролю і оцінку її ефективності. Однак більш повною характеристикою статичного і динамічного стану об'єкта є імовірнісний опис за допомогою законів розподілу імовірностей параметрів елементів вхідних впливів, вихідних параметрів і векторів-операторів. Оскільки імовірності раптових відмов визначаються за відомими формулами теорії надійності, то основна увага звертається на визначення імовірності появи поступових відмов. Запропонована модель відображує детерміновані і статистичні властивості, що визначають зміну характеристик і параметрів об'єкта.

Для визначення імовірності поступових відмов можуть бути застосовані три математичні моделі [61]:

- математична модель, заснована на методі інтегрування диференціальних рівнянь;
- математична модель, заснована на методі Монте-Карло;
- математична модель, заснована на методі квазілінійних збурень.

Під методом інтегрування диференціальних рівнянь розуміється метод прямого обчислення багатомірних щільностей ймовірностей вихідних параметрів об'єкта дослідження за допомогою інтегрування змінних, які є математично вираженими щільностями імовірності.

Метод Монте-Карло полягає в багаторазовому виборі випадкової величини параметрів системи з наступним визначенням закону розподілу вихідних параметрів об'єкта дослідження.

Метод квазілінійних збурень полягає у поданні вихідних параметрів у вигляді ряду Тейлора з наступним визначенням закону розподілу ймовірностей вихідних параметрів.

Для визначення диференціального закону системи випадкових вихідних параметрів $x_1(t), \dots, x_m(t)$ можна скористатися методикою, описаною в працях [61, 63].

Якщо припустити, що для отриманих рішень (2.7), відомий диференціальний закон розподілу ймовірностей $f_0(x_1(t), \dots, x_m(t), \bar{\zeta}_{01}, \dots, \bar{\zeta}_{0k'}, \tau_0, \tau)$ системи випадкових величин $x_{01}, \dots, x_{0m}, \bar{\zeta}_{01}, \dots, \bar{\zeta}_{0k'}$, функція F_{0i} має кусково-безперервні часткові похідні за координатами x_i , рішення системи рівнянь (2.1) φ_i мають другі часткові похідні за x_i і t , крім того, рішення мають перші похідні за ζ_i , то диференціальний закон розподілу системи випадкових величин x_1, \dots, x_m , визначається рівністю [64, 65]:

$$f(x_1, \dots, x_m, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots (k') \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}. \quad (2.11)$$

Якщо врахувати границі змін величин $\bar{\zeta}_1, \dots, \bar{\zeta}_{k'}$, то рівняння (2.11) можна переписати у такому вигляді:

$$f(x_1, \dots, x_m, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'},$$

де $\eta_j = \varphi_j[\tau_0, \tau, \varphi_\gamma(\tau, \tau_0, x_\sigma, \zeta_\nu), \zeta_\nu]$ при індексах j, γ, σ , що пробігають значення $1, 2, \dots, m$, а ν пробігає значення $1, 2, \dots, k'$.

Для визначення закону розподілу перехідної функції об'єкта дослідження необхідно на його вхід продати стрибкоподібні впливи і визначити закон [61, 63]:

$$f(h_1, \dots, h_m, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Для визначення диференціального m' -мірного закону розподілу імпульсних функцій можна скористатися якобіаном перетворення $I(f_h \rightarrow f_w)$ з урахуванням того, що $w(t, \tau, X, Z, Q) = h'(t, \tau, X, Z, Q)$.

Диференціальний закон розподілу передавальної функції амплітудних і фазочастотних характеристик визначаються при гармонійних впливах на об'єкт.

Тоді отримуємо закон розподілу передавальної функції об'єкта:

$$f(W_1, \dots, W_m, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Закон розподілу амплітудно-частотної характеристики об'єкта:

$$f(A_1, \dots, A_{m'}, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} (k') \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Закон розподілу фазочастотної характеристики об'єкта:

$$f(\varphi_1, \dots, \varphi_{m'}, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} (k') \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Таким чином, теоретично виявляється можливим достатньо точно визначити m' -мірні диференціальні закони розподілу вихідних параметрів і векторів-операторів. Однак виконати інтегрування у явному виді можна тільки тоді, коли щільність імовірності є простою аналітичною функцією випадкових параметрів. Зі зростанням кількості параметрів і складності аналітичних функцій застосування методу викликає істотні математичні труднощі [61].

Використання методу статистичної лінеаризації. Для складних об'єктів з нелінійностями при імовірнісному аналізі, для практичних задач іноді достатньо оцінювати тільки перші два моменти вихідних параметрів: математичне очікування і кореляційну функцію або дисперсію. Ці моменти дозволяють повністю визначити закон розподілу ймовірностей, який приблизно можна вважати нормальним.

Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта в узагальненій формі представляється у вигляді:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) x_\rho = F_l(X, Z, t, \tau) + \varphi_l(Z_l); \\ Z_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j; \quad l = 1, \dots, m \end{cases} \quad (2.12)$$

де a_i^l, c_j^l – постійні коефіцієнти;

$X\{x_1, \dots, x_m\}$ – вектор випадкових функцій параметра t , який визначає рух об'єкта;

$Z\{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$ – вектор збурень, який є випадковою функцією параметра t ;

F_l – нелінійні функції, які припускають лінеаризацію відносно певного режиму руху об'єкта в межах робочих діапазонів величин або функцій;

φ_l – нелінійні функції, які не припускають звичайної лінеаризації;

$M_{l\rho}$ – поліноми відносно оператора диференціювання зі змінними у часі коефіцієнтами;

S_l – кількість параметрів, які визначають поведінку об'єкта;

N_l – кількість діючих збурень.

Після відповідних перетворень утворюється лінійна система рівнянь для визначення математичного очікування випадкових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) m_{x\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_l) + K_0^l m_l; \\ m_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{x_i} + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l m_{z_j} \end{cases} \quad (2.13)$$

й система рівнянь для визначення випадкових складових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) x_\rho^0 = \sum_{\mu=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{x_\mu}} \right]_0 x_\mu^0 + \sum_{j=1}^{N_l} \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{z_j}} \right]_0 \zeta_j^0 + K_1^l z_l^0; \\ z_l^0 = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^0 + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j^0, \end{cases} \quad (2.14)$$

де K_0^l і K_1^l – статистичні коефіцієнти посилення [63].

Проінтегрувавши системи рівнянь (2.13) і (2.14), наприклад методом послідовних наближень, визначимо математичне очікування, кореляційні функції і дисперсії вихідних параметрів.

Цей метод наближеного розв'язку застосовується тоді, коли метод гармонійної лінеаризації не дає бажаних результатів [61].

Використанням методу гармонійної лінеаризації. Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта подається у формі (2.12). Оскільки методика лінеаризації нелінійних систем зі змушеними коливаннями аналогічна методиці лінеаризації нелінійних систем, які працюють в автоколивальному режимі, то можна обмежитись викладенням метода лінеаризації систем з автоколиваннями.

Математичне очікування $m_{x\rho}(t)$ і кореляційна функція $K_{x\rho x_i}(t, S)$ $\rho = 1, \dots, m$) визначаються при представленні $Zt(t)$ у вигляді:

$$Z_l(t) = Z_l^0(t) + Z_l^*(t) \quad l = 1, \dots, m). \quad (2.15)$$

де: Z_l^0 – випадкова складова вихідного параметра, що повільно змінюється;
 $(t) = Z \sin \Omega t$ – гармонічна складова з випадковою амплітудою Z .

Для обґрунтованого виконання процедури гармонічної лінеаризації робимо припущення, що вихідний параметр системи близький до гармонічного коливання. Тоді функцію можна представити у вигляді [66]:

$$\varphi_l(Z_l) = \varphi_l^0 + gZ_l^* + \frac{g'}{\Omega} \cdot \frac{d}{dt} Z_l^*,$$

де

$$\begin{aligned} \varphi_l^0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) d\Psi; \\ g &= \frac{1}{2Z} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) \sin \Psi d\Psi; \\ g' &= \frac{1}{\pi Z} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) \cos \Psi d\Psi. \end{aligned}$$

Вирази g, g' для конкретних нелінійностей можна взяти з [66].

Виконуючи відповідні підстановки і перетворення, отримуємо систему рівнянь для визначення математичного очікування вихідних параметрів:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{\rho l} \left(t, \tau, \frac{d}{dt} \cdot Q \right) m_{x\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_z) + \varphi_l^0(Z_l^0); \\ Z_l^0 = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{xi} + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l m_{\xi j} \end{cases} \quad (2.16)$$

а також систему рівнянь для визначення випадкових складових функцій:

$$\begin{aligned} \sum_{\rho=1}^m M_{\rho l} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_{\rho}^0 &= \sum_{\rho=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{x\rho}} \right] x_{\rho}^0 + \\ &+ \sum_{\rho=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{\xi j}} \right] \xi_{\rho j}^0 + gZ_l^* + \frac{g'}{\Omega} \cdot \frac{d}{dt} Z_l^*; \quad (2.17) \\ Z_l^* &= \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^0 + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l x_{\xi j}^0 \end{aligned}$$

Проінтегрувавши системи рівнянь (2.16) та (2.17), можна визначити математичне очікування і кореляційну функцію вихідних параметрів. Це один з найпростіших методів. Наявність в системах великих відхилень і значної (великої) нелінійностей перешкоджає безпосередньому використанню цього метода.

В деяких випадках гарні результати дає комбінація метода лінійних збурень з методом Монте-Карло. При цьому аналіз нелінійної частини потрібно виконувати методом Монте-Карло, а лінійної – методом квазілінійних збурень.

Оцінка впливу законів розподілу стохастичних параметрів елементів на статистичні характеристики ГІС ВП. Випадкова зміна режиму та умов роботи ГІС ВП, а отже зміна параметрів елементів, обумовлює випадкову зміну її параметрів як протягом часу протікання процесів, так і реалізації одного процесу до іншого. Випадковий характер зміни параметрів ГІС ВП необхідно враховувати при оптимізації процесу моніторингу бойових дій. Тому розглянуті попередньо методи визначення імовірнісних характеристик об'єкта є з цієї точки зору недостатньо ефективними, оскільки вони отримані в припущенні, що параметри не випадкові, тобто вони змінюються в часі за певним законом або є постійними.

Оцінку імовірнісних характеристик параметрів ГІС ВП з урахуванням випадковості параметрів елементів можна виконати або методами безпосереднього визначення характеристики, або методом імовірнісного усереднення [67].

Методи безпосереднього визначення імовірнісних характеристик параметрів шляхом не випадкових впливів або методом Монте-Карло є доволі трудомісткими і одержувані цими методами залежності характеристик процесу від характеристик впливів і параметрів системи не є наочними.

Більш наочним і менш трудомістким є метод імовірнісного усереднення, суть якого полягає в наступному. Спочатку викладеними попередньо методами визначаються імовірнісні характеристики ідеалізованої системи об'єкта, тобто системи або нелінійної стаціонарної, або простої лінійної нестационарної з детермінованими параметрами. Потім відповідним імовірнісним усередненням

отриманих характеристик в діапазоні можливих значень непрямих впливів визначаються дійсні значення імовірнісних характеристик.

Припустимо, що всі випадкові зовнішні прямі і внутрішні впливи $\xi_i(t), \dots, \xi_k(t)$ не залежать від випадкових непрямих внутрішніх впливів $\zeta_i(t), \dots, \zeta_\mu(t)$ що майже завжди має місце (майже завжди виконується). Тоді випадковий процес $x_\rho(t)$ ($\rho = 1, \dots, m$) в об'єкті є функцією випадкових впливів

$$\zeta_i(t) \quad (i = 1, \dots, k), \quad \zeta_j(t) \quad (j = 1, \dots, \mu)$$

$$x_\rho(t) = \varphi_0[\xi_i(t), \zeta_i(t), \tau]$$

де φ_0 – деяка нелінійна функція.

Якщо $f_\xi(Z, t, \tau)$ і $f_\zeta(\zeta_1, \dots, \zeta_\mu, t, \tau)$ – диференціальні закони розподілу систем випадкових величин відповідно ξ_i і ζ_j , то математичне сподівання вихідних координат об'єкта можна розрахувати за формулою:

$$m_{x_\rho}(t, \tau) = \int \dots k \dots \int \dots \mu \int_{-\infty}^{\infty} \varphi \times \\ \times [\xi_i(t), \zeta_i(t), \tau] f_\zeta(\xi_i, t, \tau) f_\xi(\xi_j, t, \tau) d\xi_j d\zeta_i \\ \dots \dots \quad (i = 1, \dots, k) \quad (j = 1, \dots, \mu).$$

Математичне очікування параметрів x_ρ при конкретних значеннях $\bar{\xi}_i$ випадкових величин ξ_i отримаємо шляхом усереднення ζ_i :

$$m_{x_\rho}(\bar{\xi}_i, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots (k) \dots \int \varphi[\zeta_i(t), \bar{\xi}_i(t), \tau] f_\zeta(\zeta_i, t, \tau) d\zeta_i.$$

Це математичне очікування порівняно просто знаходиться для лінійних і нелінійних стаціонарних і нестаціонарних безперервних систем, а також для порівняно простих дискретних систем.

Для одержання математичного очікування вихідних параметрів об'єкта $x_\rho(t)$ з урахуванням випадковості параметрів елементів необхідно виконати подальше усереднення:

$$m_{x_\rho}(t, \tau) = \int \dots (\mu)_{-\infty}^{\infty} \dots \int m_{x_\rho}(\bar{\zeta}, t, \tau) f_\zeta(\zeta_j, t, \tau) d\zeta_j.$$

Кореляційна функція і дисперсія вихідних параметрів знаходяться за аналогічною методикою.

Основною перевагою метода імовірнісного усереднення є незалежність урахування випадковості параметрів елементів від прямих випадкових впливів. При прямому методі урахування випадковості параметрів зазначена залежність зберігається, що спричинює істотні обчислювальні складності.

Таким чином, виявляється можливість визначити імовірнісні характеристики об'єкта, що включає стаціонарні і нестаціонарні, лінійні і нелінійні системи, точно і наближено з використанням методу статистичних проб і методу не випадкових впливів, а також методу імовірнісного усереднення.

В результаті наближених розв'язків з використанням лінеаризованих рівнянь і операторів одержуються наближені імовірнісні характеристики вихідних параметрів ГС ВП, що визначають її стан, що дозволяє визначити оптимальну структуру ГС ВП.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено та науково обґрунтовано метод оцінювання приросту інформації, що отримується в результаті використання геоінформаційних систем військового призначення у системах управління військами. На основі ентропійного підходу показано, що процес управління може бути поданий як трансформація багатовимірних векторів стану системи, основною метою якої є зменшення невизначеності інформаційного стану. Результати проведеного моделювання свідчать, що застосування спеціалізованих ГІС ВП дозволяє зменшити ентропію інформаційного стану системи управління на 35–45 %, що забезпечує підвищення інформативності каналів управління та ефективності процесів підтримки прийняття рішень [56].

2. Запропоновано образно-знакову модель карти як інформаційного каналу ГІС ВП, у межах якої карту розглянуто як складний дослід у розумінні теорії інформації. Такий підхід дозволив формалізувати основні характеристики геоінформаційної системи, зокрема інформативність, пропускну здатність та надійність передачі геопросторових даних. У результаті аналізу встановлено, що інформаційна ємність бази геопросторових даних для рівня бригади (за кількості користувачів 20–25 тис.) становить не менше 500 Мб, при цьому обсяг семантичної інформації на одного користувача складає близько 2 Кб [57].

3. Удосконалено алгоритм оцінювання ефективності та оптимізації структури ГІС ВП, який базується на використанні математичної функціонально-статистичної моделі. Запропонована модель, представлена системою нелінійних диференціальних рівнянь, дозволяє враховувати динаміку об'єктів на театрі бойових дій, вплив зовнішніх збурень та затримки у відтворенні інформації. Для практичної реалізації моделювання обґрунтовано застосування методів статистичної та гармонійної лінеаризації, що дає змогу досліджувати складні динамічні системи з нелінійними та стохастичними характеристиками [62].

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

У сучасних умовах ведення бойових дій ефективність управління військами визначається не лише наявністю автоматизованих систем управління, а й здатністю цих систем забезпечувати командирів своєчасною, достовірною та просторово узгодженою інформацією для підтримки прийняття рішень [1, 2, 45, 46]. Особливу роль у цьому процесі відіграють геоінформаційні системи військового призначення, які формують єдину просторово-часову основу для інтеграції даних різної природи — розвідувальних, сенсорних, навігаційних та аналітичних [3,53].

У попередніх розділах обґрунтовано необхідність впровадження ГІС військового призначення в автоматизовані системи управління військами та визначено основні проблеми інформаційного забезпечення органів управління в умовах сучасних бойових дій [1, 2, 4, 17]. Подальший розвиток цих положень потребує переходу від загальних концептуальних підходів до формалізованих моделей, алгоритмів і методик, які можуть бути безпосередньо реалізовані в контурі підтримки прийняття рішень [7, 8, 28, 29]. Метою цього розділу є розроблення та обґрунтування моделі геоінформаційної підтримки прийняття рішень у системі управління військами, а також отримання подальшого розвитку алгоритмів обробки просторово-часових даних, зокрема відеоінформації з безпілотних літальних апаратів, для виявлення військової техніки противника в реальному часі.

У розділі послідовно розглядаються: модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень, джерела даних для її реалізації (матеріали дистанційного зондування Землі та дані з БПЛА), методи штучного інтелекту як інструмент обробки та аналізу інформації, а також удосконалений алгоритм аналізу відеопотоків з БПЛА, який є ключовим елементом запропонованої системи.

Таким чином, розділ спрямований на формування цілісного науково-методичного підходу до геоінформаційної підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах управління військами, що поєднує модельний, алгоритмічний та прикладний рівні дослідження.

3.1 Модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень

Управління військами вимагає постійного моніторингу і аналізу даних про розвиток театру військових дій, полігонів, територій бойових дій тощо, які в подальшому будемо називати скорочено об'єктом управління.

Для забезпечення ефективного управління військовими підрозділами необхідно мати достовірну та комплексну інформацію про їхній стан, можливості та ресурсний потенціал. Така інформація включає дані про наявність і розміщення об'єктів інфраструктури, природні ресурси (лісові, водні та земельні), транспортну мережу, засоби зв'язку, промислові та аграрні підприємства, об'єкти соціальної сфери, структуру розселення населення, а також екологічний стан територій. Сукупність зазначених просторових і атрибутивних даних формує інформаційну основу, необхідну для обґрунтованого прийняття управлінських рішень у системі військового управління.

Ефективна стратегія управління передбачає максимальне використання позитивного впливу територіальних факторів та мінімізацію негативних наслідків їх дії, насамперед ресурсних і екологічних. При цьому важливим є врахування природно-географічних, економічних і соціально-історичних особливостей розвитку регіонів, які суттєво впливають на можливості використання території та ресурсів у процесі планування і ведення бойових дій.

За існуючої організації управління військами процес прийняття рішень часто характеризується значними часовими витратами, що зумовлено наявністю великої кількості проміжних процедур і значною часткою рутинних операцій, які переважно виконуються вручну. Навіть за умов використання сучасних інформаційних технологій автоматизація здебільшого охоплює лише окремі етапи

оброблення інформації. Одночасно зростає роль управління на нижчих рівнях ієрархії військового управління, що обумовлює підвищені вимоги до інформаційної підтримки процесів прийняття рішень у системах оперативного управління військами та підрозділами. У сучасних умовах інформація фактично виступає одним із ключових факторів ефективного управління військами поряд із матеріально-технічним забезпеченням, ідеологічною складовою та рівнем розвитку військової техніки.

Сучасному рівню розвитку ЗСУ повинен відповідати і адекватний механізм управління військами. У зв'язку з цим, особливо актуальною стає задача удосконалення і розвитку існуючих систем управління військами з включенням механізму автоматизації розв'язання низки задач.

Для покращання якості управління військами з точки зору інформаційно-аналітичного підходу необхідно:

- забезпечити командирів усіх рівнів валідною (достовірною) інформацією для прийняття рішень;
- збільшити швидкість підготовки документів для прийняття рішень з можливістю перегляду сценаріїв розвитку за цими рішеннями;
- оптимізувати функції роботи з інформацією.

На особу, що приймає рішення (ОПР) здійснюють вплив різноманітні фактори, які умовно можна поділити на чотири групи: зовнішні, внутрішні, фактори систем вищого та нижчого рівнів (рис. 3.1). Оскільки в процесі управління військами просторова інформація становить понад 80% від її загальної кількості, тому можна стверджувати, що вона найчастіше є вирішальною для забезпечення успіху для і управління територіями, а сучасні ГІС, що забезпечують однакову просторову уніфікацію такої інформації та її спільне використання, виступають одним з універсальних інтегрованих інформаційно-технологічних засобів ефективного розв'язку різноманітних управлінських задач і підтримки прийняття рішень [3].

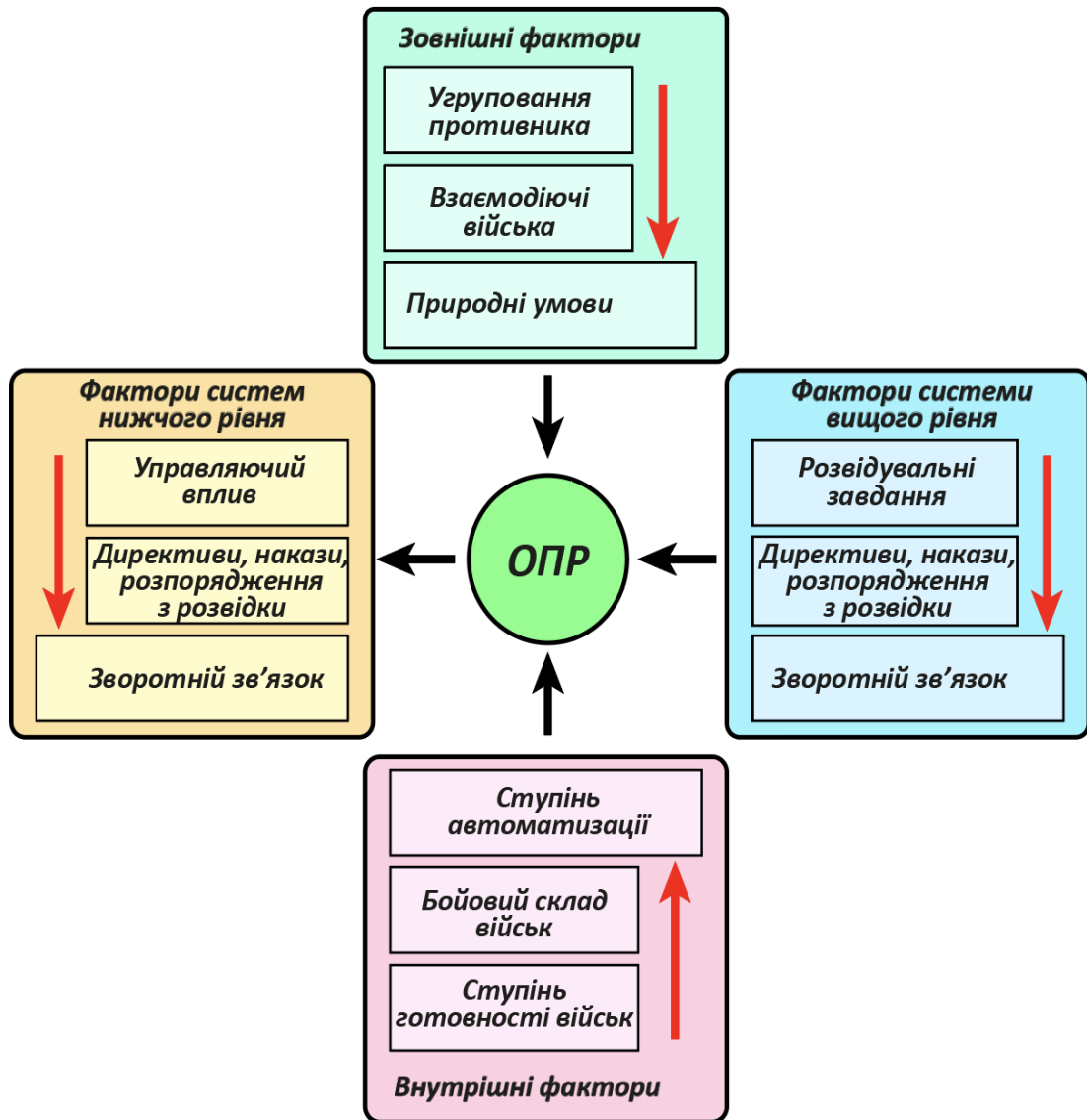


Рисунок 3.1 – Вплив різних факторів на ОПР

Для геоінформаційної підтримки прийняття рішень в СУВ необхідно мати адекватний математичний опис елементів цієї системи. В загальному випадку, система управління військами є багаторівневою системою. Методом опису багаторівневої системи управління військами цікавим представляється підхід, запропонований в праці [68].

Визначимо множину елементів описуваної території бойових дій як багатомірний вектор:

$$S = \{S_m\}, (m = \overline{1, M}),$$

де S_m – m -й елемент території (регіону бойових дій).

В залежності від розглядуваних практичних задач елементи території бойових дій можуть визначатись ідентифікатором (номером) або географічними координатами умовного центру (центроїдом); їх площі вимірюються у прийнятій системі координат (га, км², тощо).

Кожний елемент розглядуваної території бойових дій можна охарактеризувати бойовими засобами ураження P , персоналом обслуговування D , ресурсами R і суб'єктивними елементами сил F .

При цьому:

$$\forall m \exists (S_m \rightarrow \{P^m, D^m, R^m, F^m\}); \quad m = \overline{1, M},$$

де $P^m = \{P_l^m\}$, $(l = \overline{1, L})$, $(m = \overline{1, M})$ – множина типів засобів ураження, розташованих на m -ій території, а L – усі наявні типи засоби і ресурси, що існують у сфері регіону, тобто

$$\forall l, m \exists (P_l^m \rightarrow \overline{P_l^m}),$$

де $\overline{P_l^m} = (P_{l_1}^m, P_{l_2}^m, \dots, P_{l_n}^m)$ – вектор характеристик засобів ураження l -го типу.

Складовими вектора $\overline{P_l^m}$ є такі параметри як, типи і кількість озброєння, засоби ураження, споживані ресурси та їх запаси тощо, що є на озброєнні, економічні і технічні показники.

$$L = L^n \cup L^c.$$

Аналогічно викладеному, $D^m = \{D_z^m\}$, $(z = \overline{1, Z})$, $(m = \overline{1, M})$ – множина типів засобів обслуговування підрозділів і військових частин, розташованих на m -ій території, Z – усі наявні типи засобів обслуговування.

Відповідно,

$$\forall z, m \exists (D_z^m \rightarrow \overline{D_z^m}),$$

де $\overline{D_z^m} = (D_{z_1}^m, D_{z_2}^m, \dots, D_{z_r}^m)$ – вектор характеристик засобів обслуговування z -го типу розташованих m -ій території.

Складовими вектора $\overline{D_z^m}$ є такі характеристики як засоби управління і обслуговування, їх якість, вартість, продуктивність, споживані ресурси, вплив на навколишнє середовище тощо.

Множина типів бойових сил, розташованих на m -й території

$$R^m = \{R_k^m\}, \quad (k = \overline{1, K}), \quad (m = \overline{1, M}).$$

Вектор характеристик ресурсів k -го типу, розташованих на m -й території

$$\forall k, m \exists (R_k^m \rightarrow \overline{R_k^m}),$$

де

$$\overline{R_k^m} = (R_{k_1}^m, R_{k_2}^m, \dots, R_{k_\eta}^m).$$

Множина типів усіх наявних сил (підрозділів), розташованих на m -й території

$$F^m = \{F_\lambda^m\}, \quad (\lambda = \overline{1, \Lambda}), \quad (m = \overline{1, M}),$$

де λ - усі наявні типи підрозділів (сил).

Відповідно

$$\forall \lambda, m \exists (F_\lambda^m \rightarrow \overline{F_\lambda^m}),$$

де $\overline{F_\lambda^m} = (F_{\lambda_1}^m, F_{\lambda_2}^m, \dots, F_{\lambda_\theta}^m)$ – вектор характеристик усіх підрозділів, частин (сил) розташованих m -й території.

Для забезпечення можливості вибору елемента дослідження з цієї множини, повинні бути задані відповідні послідовності команд у вигляді макросів або скриптів для їх виконання за допомогою програмного забезпечення ГІС. Для цього можна скористатися завданням умов за допомогою мови SQL з застосуванням операцій, що входять до складу ГІС ВП.

Так, i -а умова u_i являє собою множину, що складається з правила відбору потрібних з множини усіх просторових об'єктів F_i^{OQ} , функції їх оброблення $F_i^Q(Q_i)$ і указівки на тип умови t_i . Кожній умові також відповідає набір його описових характеристик, зрозумілих ОПР.

$$u_i = \{F_i^{OQ} : O \mapsto Q_i, F_i^Q(Q_i), t_i\}.$$

Множину усіх створених умов можна записати як $U = \{u\}$. Множина просторових об'єктів, що відноситься до i -ї умови записується як

$$Q_i = F_i^{OQ} \{q_{i,1}, q_{i,2}, \dots, q_{i,j}\} = \{q_i\}.$$

Тоді множина умов, яка необхідна для визначення місця розташування об'єкта дослідження i -класу \hat{U}_i утворюється шляхом фільтрації (відсіву) множини усіх умов U виходячи з вимог певного «пакету нормативних документів умов»:

$$\hat{U}_i = F_i^{y.nnd}(U) = F_i^{y.nnd}(\{u\}) = \{F_i^{y.nnd}(u)\}$$

В i -му пакеті нормативних умов міститься множина вказівок, норм, правил і рекомендацій («документовані умови») \hat{U}_i^{nnd} які необхідно виконати для забезпечення визначення місця розташування об'єкта дослідження i -го класу:

$$\hat{U}_i^{nnd} = \{\hat{u}_i^{nnd}\}$$

Множина умов, необхідна для визначення місця розташування об'єкта дослідження (уваги) i -го класу \hat{U}_i містить умови, що відповідають документованим умовам i -го пакету нормативних документів умов в кількості, що дорівнює кількості даних документованих умов. Це означає, що множина \hat{U}_i існує у тому випадку, якщо в множині U є елементи u_i , що відповідають усім документованим умовам:

$$\hat{U}_i = \{u \mid F_i^{y.nnd}(u) \neq \emptyset \text{ и } |\hat{U}_i| = |\hat{U}_i^{nnd}|\}$$

У певний момент часу множина U може не містити \hat{U}_i через відсутність необхідних умов u_i , що відповідають усім документованим умовам \hat{u}_i^{nnd} , що входять в \hat{U}_i^{nnd} . У такому випадку множина умов, необхідних для визначення оптимального місця розташування об'єкта дослідження (уваги) i -го класу, отримане виходячи з наявних умов можна визначити як:

$$\hat{U}_i^{пот} = \{u \mid F_i^{y.pnd}(u) \neq \emptyset\}$$

Таким чином, можна визначити ефективність роботи з пошуку місця розташування об'єкта дослідження i -го класу, як відношення потужності поточної множини умов, що відповідають вимогам пакета нормативних умов i -го класу, до

потужності множини, необхідних для визначення місця розташування об'єкта дослідження i -го класу:

$$\eta_i = \frac{|\hat{U}_i^{\text{пот}}|}{|\hat{U}_i|}.$$

У цьому випадку пошук оптимального місця розташування об'єкта дослідження (уваги) i -го класу буде відповідати усім вимогам пакету нормативних документів умов, якщо:

$$\hat{U}_i^{\text{пот}} = \hat{U}_i \text{ або } \eta_i = 1.$$

Така ситуація може стати можливою, якщо виявлений відповідний пакет документації і потрібні умови описані на мові, зрозумілій програмному забезпеченню, що працює за заданою методикою. Це передбачає, що якщо умова створена, то надається доступ до усієї необхідної інформації для виконання даної умови. А це на практиці не завжди можливе. У цьому випадку зрозуміло, що показник поточної ефективності роботи буде варіюватися:

$$\eta_i \in [0,1]$$

На практиці не завжди необхідно прагнути досягати максимально можливого або максимального значення ефективності. Тому доцільно ввести позначення достатньої ефективності $\eta_i^{\hat{}}$.

Перший елемент попередньо визначеної множини певної множини u_i – функція фільтрації множини всіх просторових об'єктів O :

$$Q_i = F_i^{OQ}(O).$$

Результатом перетворення множини просторових об'єктів, що відповідають умові і u_i , є множина просторових об'єктів Q_i' :

$$Q_i' = F_i^{Q_i'}(Q_i) = \{q_i'\}.$$

Також варто відзначити таку важливу деталь: умови можуть бути головними, що визначають основні просторові ділянки – наприклад, об'єкт уваги знаходиться або гідрографічного об'єкта, або в лісовому масиві – цим відсікається усі інші варіанти розташування об'єкта дослідження, або умови можуть доповнювати основні – наприклад, об'єкт дослідження повинен знаходитись в

межах 10 метрів від лісового масиву. Однак наявність головних і додаткових умов не є обов'язковим для роботи з даною моделлю. Але їх потрібно виділяти для випадків, коли об'єкт дослідження може знаходитись або в одному місці, або в іншому.

Так одним з елементів множини u_i є тип даної умови t_i :

при $t_1 = 1$ – умова є «головною»;

при $t_2 = 2$ – умова є «додатковою».

Для об'єктів дослідження, що потребують планування їх місця розташування, має сенс задавати максимальні області їх теоретично можливого розміщення. Тому одним з кроків загального алгоритму пошуку є вказівка так званих «зон», де може теоретично перебувати об'єкт дослідження.

Після присвоєння об'єктам дослідження низки певних класифікаційних ознак, стає можливим автоматичний відбір з усієї сукупності доступної інформації даних, що відносяться до заданих в класі об'єктів дослідження умов.

Для виявлення області можливого місця розташування об'єкта дослідження i -го класу спочатку необхідно визначити множину просторових об'єктів, отриманих в результаті об'єднання площ множин просторових об'єктів, що відносяться до множини головних умов i -го класу (рис. 3.2).

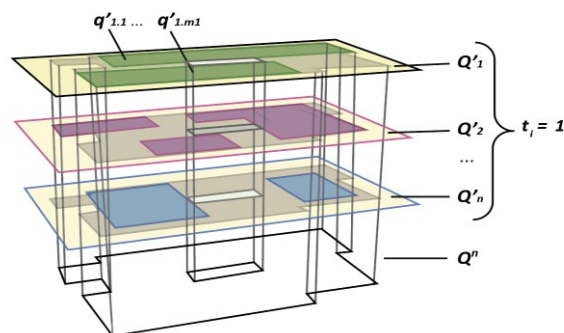


Рисунок 3.2 – Об'єднання площ за головними умовами

$$Q^{\Gamma} = \bigcup_{i=1}^k \bigcup_{j=1}^{m_i} (p(q'_{i,j}) | t_i = 1),$$

де k – кількість головних умов;

m – кількість перетворених просторових об'єктів за i -ю умовою:

$$m_i = |Q'_i|;$$

p – площинне подання x .

$$Q^{\delta} = \bigcup_{i=1}^k \bigcup_{j=1}^{m_i} (p(q'_{i,j}) | t_i = 2).$$

Наступним кроком послідовності дій, метою якої є виявлення області можливого місця розташування об'єкта уваги i -го класу, є виконання перетинання площ множини просторових об'єктів, об'єднаних за головними умовами, з площами множини просторових об'єктів, пересічених за додатковими умовами:

$$V = Q^{\Gamma} \cap Q^{\delta}$$

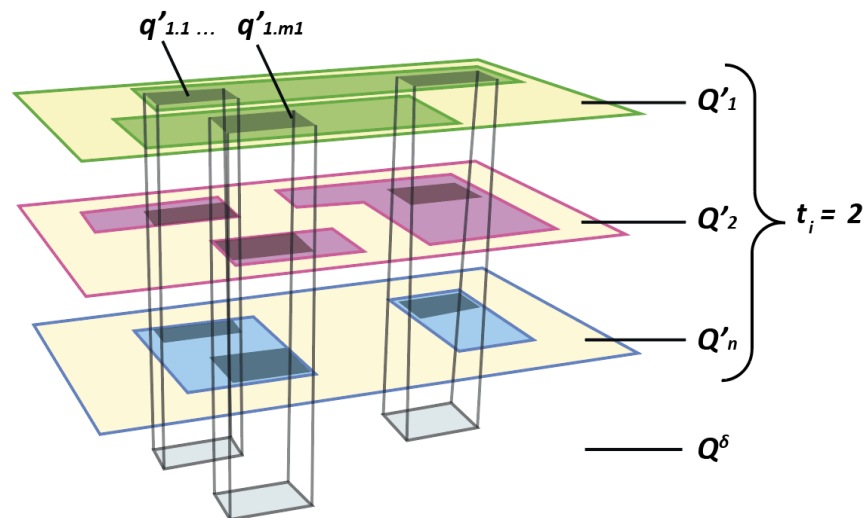


Рисунок 3.3 – Перетинання площ за додатковими умовами

Результатом пошуку є набір областей, тому наступним етапом роботи моделі є визначення ступеня «сприятливості» розміщення об'єкта дослідження в тій або іншій частині знайдених областей.

Клас об'єкта дослідження крім умов також задає набір «оцінок»:

i -а оцінка e_i – це множина, що складається з правила відбору потрібних з множини усіх просторових об'єктів $F_i^{OS} F$, функції їх обробки $F_i^S(S_i)$ і сприятливості z_i .

Кожній оцінці також відповідає набір його описових характеристик, зрозумілих ОПР:

$$e_i = \{F_i^{OS} : O \rightarrow S_i, F_i^S(S_i), z_i\}.$$

Множина усіх створених оцінок буде $E = \{e\}$.

Кількість оцінок, що використовується для визначення сприятливості розміщення об'єкта дослідження i -го класу, задається довільно. Для поділу кількості оцінок на поточну і достатню визначимо їх як \hat{E}_i і \hat{E}_i^o відповідно.

Множина просторових об'єктів, що відноситься до i -ої оцінки:

$$S_i = F_i^{OS}(O) = \{s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,j}\} = \{s_i\}$$

Результатом перетворення множини просторових об'єктів, що відповідають оцінці s_i , множина просторових об'єктів s_i' :

$$S_i' = F_i^S(S_i) = \{s_i'\}.$$

Для наочного відображення розподілу сприятливості на території зони пошуку створимо матрицю, кожний елемент k_m якої буде володіти сумарною сприятливістю усіх перетворених просторових об'єктів, що включає в себе площинне подання даного елемента матриці:

$$z(m_l) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} z(q_{i,j} | p(m_l) \subset (q_{i,j})).$$

Також є можливість розрахувати сприятливість в окремо взятій точці зони:

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} z(q_{i,j} | p(x, y) \subset (q_{i,j}))$$

Таким чином, i -й клас об'єкта дослідження K_i – це певна множина оцінок і умов, необхідних для визначення місця розташування об'єкта дослідження (рис. 3.4).

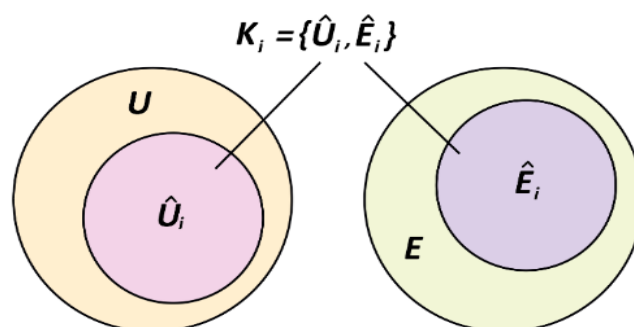


Рисунок 3.4 – Визначення класу об'єкта дослідження

Запропонована модель передбачає обов'язкову участь особи, що приймає рішення, на фінальному етапі аналізу.

Таким чином, на етапі подання звіту повинна бути сформована карта території, що містить області можливого розташування об'єкта уваги в межах обраних зон та допоміжну довідкову інформацію. Найкращим джерелом такої точної і актуальної інформації є матеріали дистанційного зондування Землі.

3.2 Джерела даних для розпізнавання військових об'єктів за допомогою матеріалів дистанційного зондування землі

Розпізнавання військових об'єктів за допомогою МДЗ є критично важливим для багатьох цілей, включаючи розвідку, спостереження та аналіз тощо. Цей процес передбачає використання різних технологій і методів для ідентифікації та класифікації військових об'єктів на зображеннях, отриманих з різних джерел.

Методи розпізнавання військових об'єктів за допомогою МДЗ представлені на (рис. 3.5).

Так для прикладу можна використати знімки на яких можна розпізнати військові об'єкти, бази, які розташовані на території бойових дій.

Для отримання радіолокаційних зображень високої роздільної здатності можуть використовуватись комерційні супутникові системи дистанційного зондування Землі, зокрема супутники ICEYE, що працюють у SAR-діапазоні. Використання таких систем дозволяє отримувати зображення незалежно від погодних умов та освітлення, що суттєво підвищує ефективність розвідувального забезпечення.

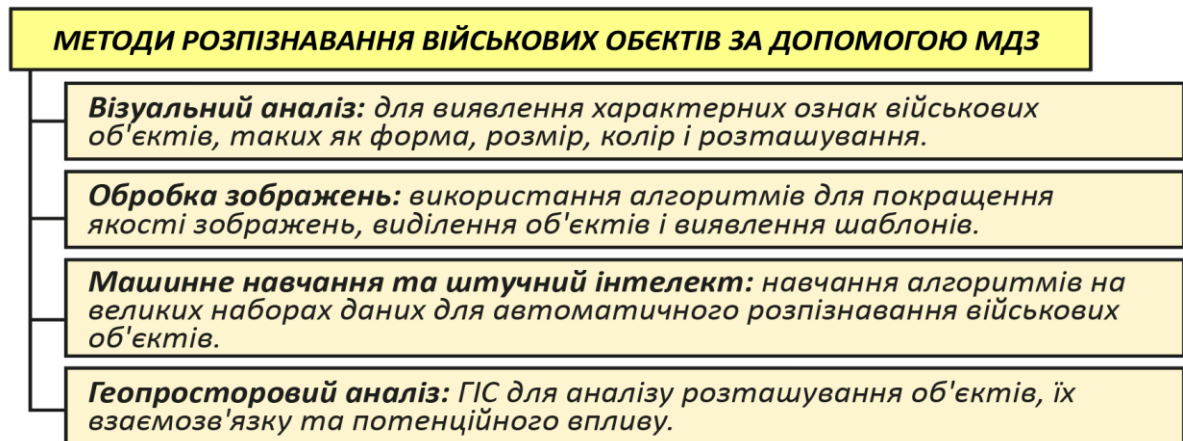
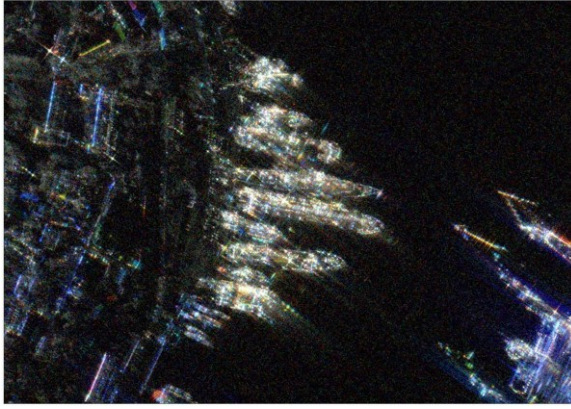


Рисунок 3.5 – Методи розпізнавання військових об'єктів за допомогою МДЗ

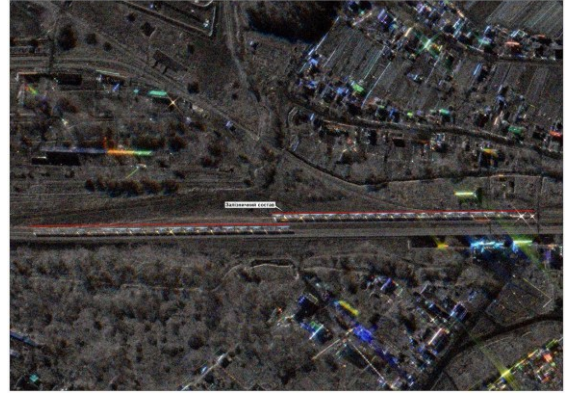
Використання сучасних супутникових систем дистанційного зондування Землі надає можливість розвідувальним органам отримувати актуальну інформацію про райони, що становлять інтерес з точки зору ведення бойових дій. Завдяки супутниковим технологіям забезпечується оперативне отримання високодеталізованих зображень територій незалежно від їх географічного розташування, що дозволяє здійснювати постійний моніторинг обстановки, виявляти зміни на місцевості та своєчасно реагувати на дії противника.

За наявними даними, протягом двох років Головним управлінням розвідки Міністерства оборони України було отримано понад 5200 супутникових знімків, що охоплюють райони ведення бойових дій та території розташування об'єктів противника. При цьому близько 40 % отриманих знімків були безпосередньо використані для планування та здійснення ураження визначених цілей. Це свідчить про високу ефективність використання супутникових даних як джерела геопросторової інформації для забезпечення розвідувальної діяльності та підтримки процесів прийняття рішень у системах управління військами [69].

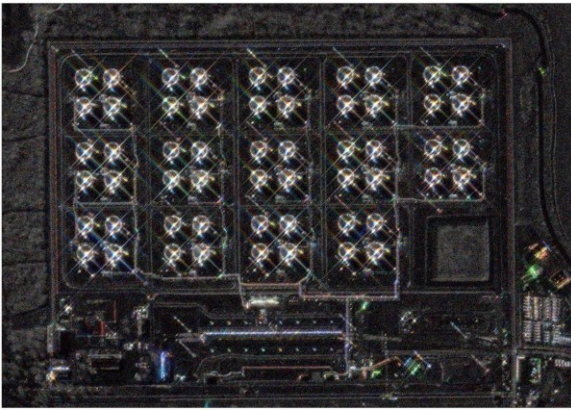
Приклади застосування МДЗ для ураження об'єктів агресора представлено на (рис. 3.6).



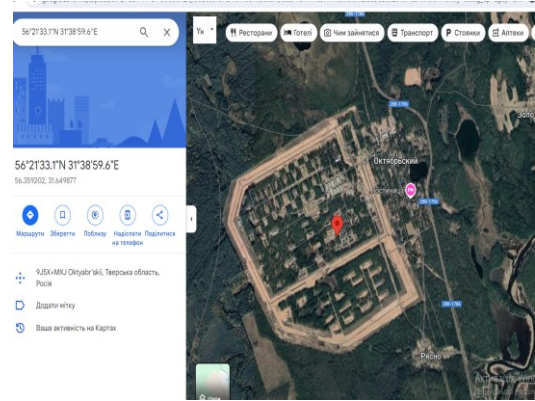
SAR-знімок кораблів агресора в бухті



SAR-знімок поїздів агресора



SAR-знімок нафтопереробного заводу



23-й арсеналу ГРАУ [70]

Рисунок 3.6 – Приклади застосування МДЗ для ураження об'єктів агресора

На знімку (рис. 3.7) представлені наслідки наступу на Київ і результати підризу мосту в Ірпіні.

Також за допомогою знімків можна візуалізувати як потерпали від бомбардувань авіації, артилерії та інших видів озброєнь землі сільськогосподарського призначення на полях за селом Кам'янка (рис. 3.8).

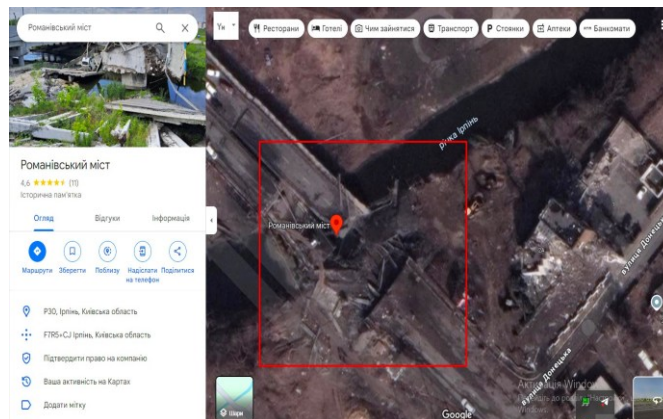


Рисунок 3.7 – Підірваний міст на річці Ірпінь біля Мощуна [70]



Рисунок 3.8 – Кам’янка після російського вторгнення 28 березня 2022 року, поля на південному заході села та околиці [70]

3.3 Методи штучного інтелекту для розпізнавання військових об’єктів

3.3.1 Класифікація та характеристика методів штучного інтелекту в задачах розпізнавання військових об’єктів

Традиційні методи розпізнавання військових об’єктів командирами та аналітиками, що засновані на візуальному аналізі зображень та відео, часто виявляються недостатньо ефективними у швидкісних та динамічних бойових ситуаціях. Саме тому, застосування методів штучного інтелекту, таких як згорткові нейронні мережі, глибоке та машинне навчання, відкриває нові можливості для автоматизації процесу розпізнавання військових об’єктів. Ці технології дозволяють обробляти великі обсяги даних, виявляти складні патерни та приймати рішення в режимі реального часу, що є критично важливим для забезпечення національної безпеки.

Огляд методів штучного інтелекту для розпізнавання зображень
Штучний інтелект (ШІ) пропонує різноманітні методи для автоматизації цього процесу, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Згорткова нейронна мережа, СНС, CNN – основний інструмент для класифікації та розпізнавання об’єктів, облич на фотографіях, розпізнавання мови

тощо. Є безліч варіантів застосування CNN, такі як Deep Convolutional Neural Network (DCNN), Region-CNN (R-CNN), Fully Convolutional Neural Networks (FCNN), Mask R-CNN та інші [71].

Згорткові нейронні мережі (CNN) є спеціалізованими нейронними мережами, розробленими для обробки даних у вигляді сіток, таких як зображення.

Основні компоненти CNN представлені на рис. 3.9.

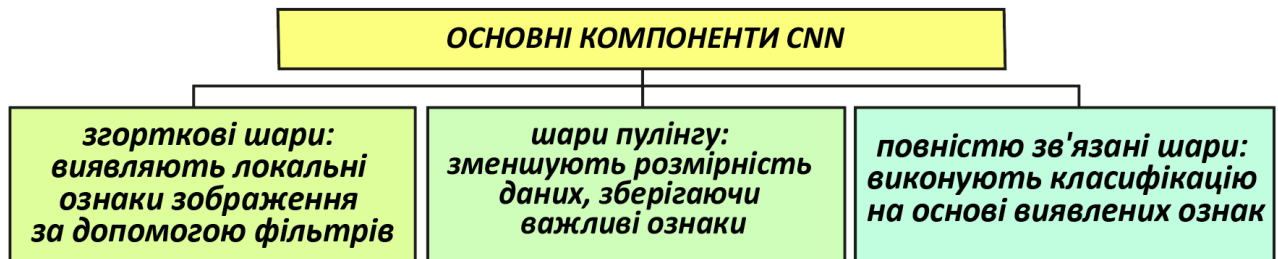


Рисунок 3.9 – Основні компоненти CNN

Перевагами CNN виступають висока точність розрізнення, здатність виявляти складні патерни, стійкість до зсувів та масштабування. CNN можуть застосовуватись для розпізнавання бронетехніки, авіації та інших військових об'єктів.

Сучасними архітектурами згорткових нейронних мереж можуть виступати: ResNet, VGG, EfficientNet, YOLO, та інші.

Рекурентна нейронна мережа (RNN) є типом штучної нейронної мережі, спеціально розробленою для розпізнавання та обробки патернів у послідовностях даних. Ці послідовності можуть включати різні типи інформації, такі як часовий ряд або природна мова. RNN відрізняється від традиційних нейронних мереж прямого розповсюдження, це їх здатність демонструвати динамічну тимчасову поведінку завдяки наявності з'єднань, які утворюють спрямований цикл [72].

RNN обробляють вхідні послідовності по одному елементу, при цьому одночасно зберігаючи внутрішній стан, який захоплює інформацію про те, що було побачено до цього часу. Цей внутрішній стан дозволяє RNN демонструвати тимчасову динамічну поведінку, що робить їх надзвичайно ефективними для

завдань, таких як розпізнавання мови, моделювання мови та передбачення часових рядів.

Подання рекурентної моделі у розгортці представлено на рис. 3.10.

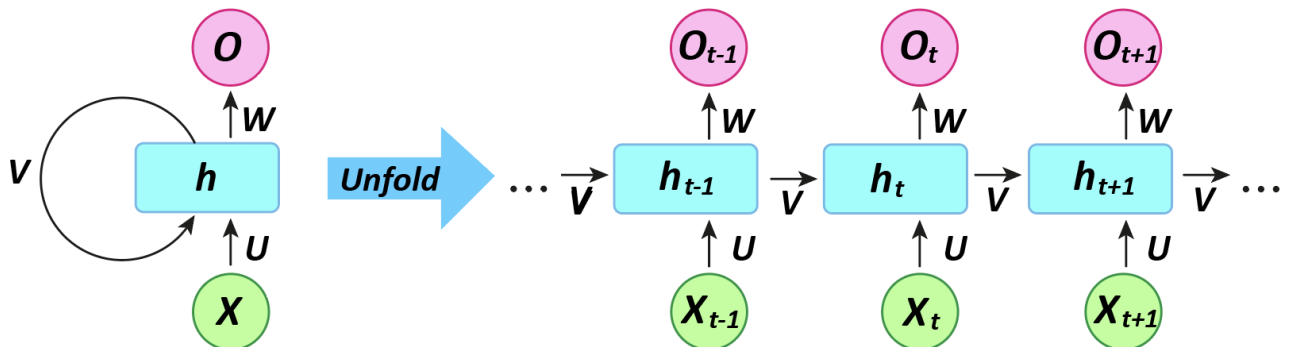


Рисунок 3.10 – Рекурентна нейронна мережа у розгортці

Фундаментальною особливістю RNN є рекурентне з'єднання, яке дозволяє їм зберігати та використовувати інформацію з попередніх введень. Це особливо важливо для завдань, що залежать від контексту або інформації про послідовність, таких як передбачення наступного слова в реченні або передбачення наступного значення в часовому ряді.

Традиційні RNN стикаються зі значним обмеженням, відомим як проблема зникнення градієнта. Ця проблема заважає RNN вивчати довгострокові залежності в послідовностях, оскільки градієнти, що використовуються під час навчання, мають тенденцію зменшуватися з часом. Для вирішення цієї проблеми були розроблені більш вдосконалені архітектури RNN, такі як довготривала короткочасна пам'ять (LSTM) і згортковий рекурентний блок (GRU).

Deep Learning навчається на основі великих обсягів даних з використанням зворотного поширення помилки. Нейронні мережі самостійно виявляють закономірності, підлаштовуючись під тренувальні дані. Це дає їм змогу ефективно обробляти нові дані, навіть якщо вони відрізняються від тих, на яких проходило навчання [6].

Для роботи з *Deep Learning* використовуються різні інструменти та технології. До популярних фреймворків і бібліотек *Deep Learning* належать:

- *TensorFlow*: це фреймворк з відкритим вихідним кодом для машинного та глибокого навчання, розроблений Google;

– *PyTorch*: фреймворк для машинного та глибокого навчання, заснований на мові Python;

– *Keras*: фреймворк для машинного і глибокого навчання, написаний Python, який використовує TensorFlow або Theano як бекенд.

Для ефективного використання Deep Learning потрібне потужне апаратне забезпечення. Наприклад: GPU (графічні процесори), TPU (тензорні процесори), CPU (багатоядерні центральні процесори), кластери та хмарні обчислення (для опрацювання великих обсягів даних і масштабованості), а також сховище даних (для поліпшення продуктивності навчання).

Машинне навчання (МО, Machine Learning, ML) – вивчає методи побудови алгоритмів, здатних навчатися [5].

Основні методи машинного навчання представлені на (рис. 3.11).

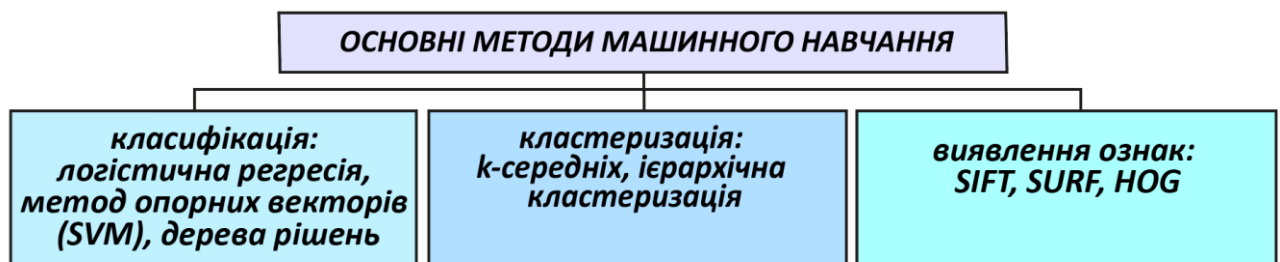


Рисунок 3. 11 – Основні методи машинного навчання

Перевагами методів машинного навчання можуть слугувати простота застосування та можливість використання на невеликих наборах даних. Також вони можуть застосовуватись як допоміжні методи для розпізнавання та попереднього аналізу даних, для попередньої обробки зображень, виявлення простих об'єктів, та для задач, де не вистачає даних для глибокого навчання.

Порівняння методів Deep Learning та машинного навчання наведено в таблиці 3.1.

Розпізнавання (дешифрування) військових об'єктів є складним завданням, яке відрізняється від розпізнавання звичайних об'єктів у цивільному секторі. Воно вимагає врахування ряду специфічних факторів, що впливають на ефективність застосування методів штучного інтелекту.

Таблиця 3.1 – Порівняння методів Deep Learning та машинного навчання

Характеристика	Deep Learning	Машинне навчання
Архітектура моделей	Глибокі нейронні мережі з безліччю шарів, здатних витягувати складні ознаки.	Поверхневі моделі з невеликою кількістю шарів, найчастіше лінійні або деревоподібні.
Використання даних	Потребує великих обсягів даних для ефективного навчання.	Може працювати з меншими обсягами даних, часто більш ефективно в завданнях з обмеженими даними.
Робота з ознаками	Автоматичне вилучення ознак у процесі навчання.	Вимагає ручної інженерії ознак для визначення найкращих характеристик.
Навчання	Ієрархічне, з уточненням уявлень на різних рівнях.	Зазвичай більш плоске, не має ієрархії в поданні даних.
Обробка даних	Ефективно обробляє неструктуровані дані, такі як зображення, тексти, звук.	Більш орієнтований на структуровані дані, такі як таблиці та бази даних.
Продуктивність	Вимагає потужних обчислювальних ресурсів, особливо GPU.	Може працювати на менш потужних пристроях, що робить його більш доступним.
Інтерпретованість	Моделі можуть бути складними і важкозрозумілими (чорний ящик).	Простіші моделі, легше інтерпретувати і пояснити.
Застосування	Ефективний у завданнях, що вимагають опрацювання великих обсягів даних і виділення складних закономірностей.	Часто використовується в задачах з обмеженими даними і явними ознаками.

Військові об'єкти, які підлягають розпізнаванню за допомогою штучного інтелекту, надзвичайно різноманітні. Кожен тип має свої унікальні характеристики, які потрібно враховувати при розробці алгоритмів розпізнавання (табл. 3.2).

Особливості розпізнавання (дешифрування) військових об'єктів представлені на (рис. 3.12).

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ (ДЕШИФРУВАННЯ) ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1. Військові об'єкти включають широкий спектр техніки: танки, літаки, кораблі, ракетні установки, безпілотні літальні апарати (БПЛА) тощо. Кожен тип об'єкта має свої унікальні характеристики, які можуть змінюватися залежно від модифікації та призначення. Наприклад, розпізнавання танків вимагає ідентифікації специфічних елементів: башти, гармати, гусениць. Розпізнавання літаків, у свою чергу, вимагає аналізу форми крил, фюзеляжу та інших аеродинамічних характеристик.

2. Військові об'єкти часто спостерігаються в умовах обмеженої видимості: ніч, туман, дощ, сніг. Це вимагає використання спеціальних сенсорів (тепловізори, радары) та алгоритмів обробки зображень. Маскування є ще одним фактором, що ускладнює розпізнавання. Військові об'єкти можуть бути замасковані під навколишнє середовище, що робить їх важко помітними на звичайних зображеннях.

3. У військових застосуваннях точність розпізнавання є критично важливою. Помилкове розпізнавання може призвести до серйозних наслідків. Швидкість розпізнавання також має велике значення, особливо в умовах динамічних бойових дій. Системи розпізнавання повинні працювати в режимі реального часу.

4. Навчальні дані для розпізнавання військових об'єктів можуть бути обмеженими та специфічними. Необхідно враховувати класифікацію даних, та їх маркування. Часто виникає необхідність в аугментації даних (збільшення обсягу даних шляхом застосування різних трансформцій).

Рисунок 3.12 – Особливості розпізнавання (дешифрування) військових об'єктів

Таблиця 3.2 – Унікальні характеристики при розробці алгоритмів розпізнавання

Авіація (літаки, гелікоптери, БПЛА)			
	Літаки	Гелікоптери	БПЛА
Характеристики	форма крил, фюзеляжу, хвостового оперення, кількість двигунів, розміри.	кількість несучих та хвостових гвинтів, форма фюзеляжу, розміри.	розміри, форма, тип двигуна, корисне навантаження.
Типи	винищувачі, бомбардувальники, транспортні літаки, розвідувальні літаки.	ударні гелікоптери, транспортні гелікоптери, розвідувальні гелікоптери.	розвідувальні БПЛА, ударні БПЛА, БПЛА-камікадзе.
Особливості	висока швидкість, маневреність, різні конфігурації.	вертикальний зліт та посадка, маневреність на малих висотах.	різноманітність розмірів та конфігурацій, можливість тривалого перебування в повітрі.
Бронетехніка (танки, БМП, БТР):			
	Танки	БМП	БТР
Характеристики	форма башти, калібр гармати, тип гусениць, розміри.	наявність гармати та протитанкових ракет, кількість десантників, тип гусениць.	кількість десантників, наявність озброєння, тип коліс або гусениць.
Особливості	висока вогнева міць, захищеність, прохідність.	вогнева підтримка піхоти, транспортування десанту.	транспортування піхоти, захист від стрілецької зброї.
Ракетні комплекси та артилерія:			
	Ракетні комплекси	Артилерія	
Характеристики	тип ракет, дальність, мобільність.	калібр, тип гармати (гаубиця, міномет), мобільність.	
Типи	зенітно-ракетні комплекси (ЗРК), протитанкові ракетні комплекси (ПТРК), тактичні ракетні комплекси.	вогнева підтримка, різноманітність типів боеприпасів.	
Особливості	висока точність, велика дальність.		

3.3.2 Згорткові та рекурентні нейронні мережі для обробки зображень і відео для розпізнавання бронетехніки

Розпізнавання бронетехніки є критично важливим завданням у військовій розвідці та аналізі ситуації. Згорткові нейронні мережі (CNN) продемонстрували високу ефективність у задачах розпізнавання зображень, тому їхнє застосування для розпізнавання бронетехніки є перспективним напрямком.

Для розпізнавання бронетехніки можна використовувати різні архітектури CNN, такі як ResNet, VGG, EfficientNet, або спеціально розроблені архітектури. Зазвичай, архітектура складається з таких шарів:

Згорткові шари (Convolutional layers): використовуються для вилучення ознак з зображення. Вони застосовують фільтри до зображення для виявлення країв, текстур та інших характерних деталей.

Шари пулінгу (Pooling layers): зменшують розмірність ознак, зберігаючи при цьому важливу інформацію. Це допомагає зменшити обчислювальні витрати та запобігти перенавчанню.

Шари активації (Activation layers): вводять нелінійність у модель, що дозволяє їй навчатися складним залежностям. Найчастіше використовуються функції ReLU, Sigmoid або Tanh.

Повністю зв'язані шари (Fully connected layers): використовуються для класифікації ознак. Вони з'єднують кожен нейрон з усіма нейронами попереднього шару.

Шар класифікації (Classification layer): останній шар, який видає ймовірність належності зображення до кожного класу (типу бронетехніки).

Наприклад, можна використовувати ResNet-50, навчену на наборі даних, що містить зображення танків, БМП, БТР та інших типів бронетехніки. Після навчання модель може бути використана для розпізнавання бронетехніки на нових зображеннях. Для оцінки ефективності моделі використовуються такі метрики, як точність, повнота та F1-міра.

Рекурентні нейронні мережі (RNN) особливо ефективні для аналізу послідовностей даних, таких як відео. У контексті військового спостереження вони можуть бути використані для виявлення та відстеження рухомих об'єктів, аналізу їхньої поведінки та прогнозування їхніх дій.

Відеоспостереження за військовими об'єктами вимагає аналізу часових залежностей. RNN, завдяки своїй здатності зберігати інформацію про попередні кадри, можуть:

Виявляти рух та відстежувати об'єкти: RNN можуть аналізувати послідовність кадрів для виявлення змін та відстеження траєкторій рухомих об'єктів.

Аналізувати поведінку об'єктів: RNN можуть навчатися розпізнавати типові патерни поведінки військових об'єктів, такі як рух колони бронетехніки або патрулювання території.

Прогнозувати дії об'єктів: на основі аналізу попередньої поведінки RNN можуть прогнозувати майбутні дії об'єктів, наприклад, напрямок руху або можливі атаки.

Для аналізу відеоспостереження можуть бути використані різні архітектури RNN, такі як:

LSTM (Long Short-Term Memory): LSTM-мережі особливо ефективні для обробки довгих послідовностей, оскільки вони здатні запам'ятовувати інформацію на тривалий час.

GRU (Gated Recurrent Unit): GRU-мережі є спрощеною версією LSTM, які також ефективні для обробки послідовностей [73].

3D-CNN+RNN: Комбінація 3D-CNN для вилучення просторово-часових ознак з відео та RNN для аналізу послідовностей.

Наприклад, RNN можуть бути використані для автоматичного виявлення та відстеження рухомих об'єктів на відео з БПЛА, для аналізу поведінки військових колон або для прогнозування можливих атак. Для оцінки ефективності моделей використовуються такі метрики, як точність виявлення та відстеження об'єктів, точність прогнозування дій та час обробки відео.

3.3.3 Гібридні моделі та мультимодальні підходи розпізнавання військових об'єктів за складних погодних умов.

Розпізнавання військових об'єктів у складних погодних умовах (туман, дощ, сніг, ніч) є серйозним викликом. Традиційні методи розпізнавання, засновані на видимих зображеннях, часто не працюють у таких умовах. Гібридні моделі, що поєднують різні типи сенсорних даних та методи штучного інтелекту, можуть покращити якість розпізнавання. Джерелами даних можуть виступати:

– теплові зображення (Thermal imaging): виявляють інфрачервоне випромінювання, що дозволяє розпізнавати об'єкти навіть у темряві та за наявності туману. У праці [74] представлена система розрізнення HADAR (Heat-Assisted Detection And Ranging), виявлення та визначення дальності за допомогою тепла. Ця система достатньо точна, щоб вловлювати геометричні текстури в слабких, розсіяних інфрачервоних сигналах. Таких властивостей досягають за допомогою теплофізики та машинного навчання в поєднанні зі спектральною роздільною здатністю теплових зображень. HADAR використовує гіперспектральний тепловізор, який робить теплові зображення сцени для сотень різних кольорів в тепловому інфрачервоному діапазоні. (рис. 3.13);

– радарні дані (Radar data): забезпечують інформацію про відстань, швидкість та розмір об'єктів, незалежно від погодних умов;

– мультиспектральні зображення (Multispectral imaging): збирають дані в різних діапазонах електромагнітного спектра, що дозволяє виявляти об'єкти, які невидимі у видимому діапазоні;

– лідарні дані (LiDAR data): забезпечують точну 3D-інформацію про об'єкти та їхнє оточення, що корисно для розпізнавання за складних погодних умов.

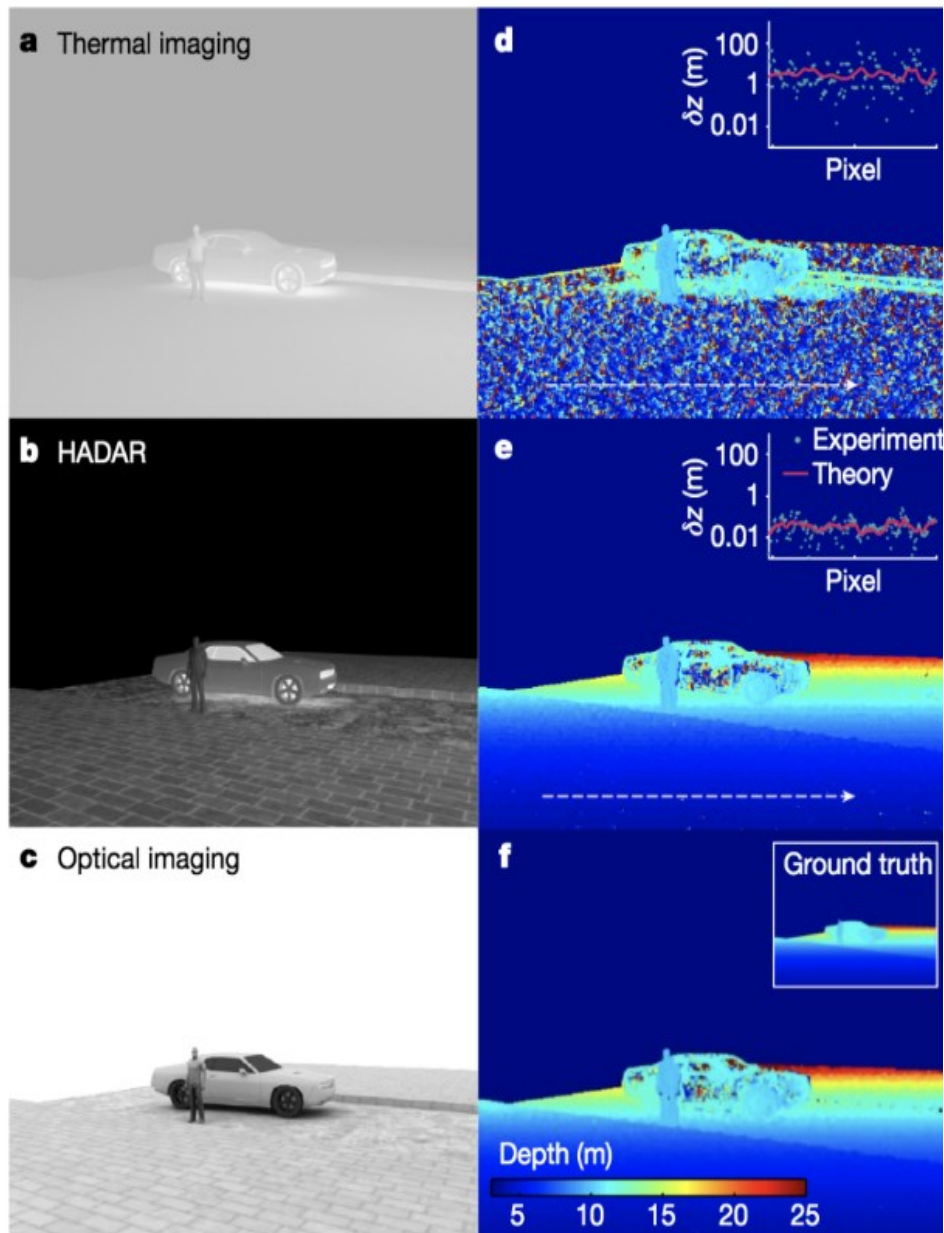


Рисунок 3.13 – Розпізнавання об’єктів за допомогою теплових зображень [74].

Гібридні моделі поєднують різні типи сенсорних даних та методи ШІ для покращення якості розпізнавання. Наприклад:

– CNN + RNN + Fusion: згорткові нейронні мережі (CNN) використовуються для вилучення ознак з теплових та видимих зображень, рекурентні нейронні мережі (RNN) для аналізу послідовностей радарних даних, а потім застосовується метод fusion для об’єднання ознак з різних сенсорів;

– глибокі нейронні мережі з мультимодальним навчанням: мережі навчаються на наборах даних, що містять різні типи сенсорних даних, використовуючи методи мультимодального навчання;

– генеративно-змагальні мережі (GAN) для синтезу даних: GAN можуть бути використані для синтезу зображень, що імітують складні погодні умови, для навчання моделей розпізнавання. Наприклад, гібридна модель може поєднувати теплові та радарні дані для розпізнавання бронетехніки вночі та за наявності туману. Або поєднувати дані з лідару та мультиспектральних камер для розпізнавання об'єктів, які замасковані під навколишнє середовище.

3.3.4. Порівняльний аналіз різних методів штучного інтелекту для розпізнавання військових об'єктів

У контексті розпізнавання військових об'єктів, різні методи штучного інтелекту мають свої переваги та недоліки. Порівняльний аналіз дозволяє визначити, які методи найкраще підходять для конкретних завдань та умов. Порівняння методів ШІ наведено у табл. 3.3.

Вибір методу ШІ залежить від конкретного завдання, доступних ресурсів та вимог до точності та швидкості розпізнавання. Гібридні моделі та глибоке навчання часто забезпечують найкращі результати, але вимагають великих обчислювальних ресурсів.

Для задач розпізнавання в реальному часі можуть бути ефективними алгоритми YOLO або SSD.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) для розпізнавання військових об'єктів відкриває широкі можливості, але також стикається з низкою проблем і обмежень, представлених в табл. 3.4.

Таблиця 3.3 – Порівняння методів ШІ

	Переваги	Недоліки
Згорткові нейронні мережі (CNN)	Висока ефективність у задачах розпізнавання зображень. Здатність вилучати складні ознаки з зображень. Широке застосування та велика кількість доступних архітектур	Потребують великих наборів даних для навчання. Можуть бути чутливі до змін освітлення та кута огляду. Не завжди ефективні для аналізу послідовностей даних.
Рекурентні нейронні мережі (RNN)	Ефективні для аналізу послідовностей даних (відео, радарні дані). Здатність запам'ятовувати інформацію про попередні кадри. Можливість аналізу поведінки та прогнозування дій об'єктів.	Вимагають великі обчислювальні ресурси. Можуть мати проблеми з обробкою довгих послідовностей. Складність навчання.
Гібридні моделі (CNN+RNN, мультимодальні мережі)	Покращена якість розпізнавання за рахунок об'єднання різних типів даних. Здатність працювати в складних погодних умовах. Можливість використання різних сенсорних даних.	Складність розробки та навчання. Вимагають точну калібровку та синхронізацію сенсорів. Високі обчислювальні витрати.
Алгоритми виявлення об'єктів у реальному часі (YOLO, SSD)	Висока швидкість обробки даних. Ефективні для розпізнавання об'єктів у реальному часі. Можливість використання на обладнанні з обмеженими обчислювальними ресурсами.	Можуть мати нижчу точність порівняно з більш складними моделями. Можуть мати проблеми з розпізнаванням малих об'єктів.
Машинне навчання (SVM, Random Forest)	Відносно прості в реалізації. Добре працюють з невеликими наборами даних. Висока швидкість навчання	Можуть мати нижчу точність порівняно з глибокими нейронними мережами. Складно вилучати складні ознаки з зображень.

Проведене комплексне дослідження можливостей застосування методів штучного інтелекту для розпізнавання військових об'єктів засвідчило, що наявні методи ШІ, такі як згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN), глибоке та машинне навчання, забезпечують високу ефективність у задачах розпізнавання зображень та відео.

Специфіка розпізнавання військових об'єктів вимагає врахування таких факторів, як різноманітність типів об'єктів, складні умови спостереження та високі вимоги до точності та швидкості розпізнавання.

Подальші перспективи розвитку технологій розпізнавання військових об'єктів пов'язані з використанням нових архітектур нейронних мереж, методів навчання без вчителя та інтеграцією з іншими військовими системами.

ШІ може забезпечити перевагу в розвідці та спостереженні.

Таблиця 3.4 – Можливості і проблеми застосування штучного інтелекту для розпізнавання військових об'єктів

Характеристика	Проблеми застосування
Недостатня точність і надійність	Військові об'єкти можуть мати різні модифікації, камуфляж, ракурси, що ускладнює їх розпізнавання. Погодні умови, освітлення, перешкоди можуть впливати на якість зображень і знижувати точність розпізнавання. Противник може застосовувати засоби маскування, імітації, радіоелектронної боротьби, щоб ускладнити розпізнавання. Неправильне розпізнавання цивільних об'єктів або нешкідливих предметів може призвести до небажаних наслідків.
Етичні та правові питання	Використання ШІ для автономних систем зброї викликає серйозні етичні питання щодо відповідальності за прийняття рішень про застосування сили. Помилки в розпізнаванні можуть призвести до загибелі цивільних осіб або ескалації конфлікту. Необхідно розробити міжнародні норми та стандарти щодо використання ШІ у військовій сфері. Використання ШІ не повинно порушувати права людини, такі як право на приватність, життя та безпеку
Технічні обмеження	Для навчання ШІ потрібні великі обсяги даних, які можуть бути обмежені через секретність або недоступність. Розпізнавання об'єктів у реальному часі вимагає потужних обчислювальних ресурсів, які можуть бути обмежені в умовах бойових дій. Системи ШІ можуть бути вразливими до кібератак, які можуть призвести до їх виходу з ладу або спотворення даних. ШІ повинен бути здатним адаптуватися до змін в умовах бойових дій, таких як поява нових типів об'єктів або зміна тактики противника.
Проблеми безпеки	Дані, що використовуються для навчання ШІ, можуть містити конфіденційну інформацію, яка може бути викрадена або використана противником. Противник може спробувати здійснити зворотне проектування систем ШІ, щоб зрозуміти їх алгоритми та методи розпізнавання. Противник може спробувати маніпулювати даними, що використовуються для навчання ШІ, щоб спотворити його результати.

3.3.5 Критерії оцінки ефективності розпізнавання військових об'єктів

Оцінка ефективності систем розпізнавання військових об'єктів є критично важливим етапом, що дозволяє визначити придатність та надійність розроблених моделей. Вибір критеріїв залежить від конкретних завдань та вимог, але загалом можна виділити ряд груп, представлених в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Критерії ефективності розпізнавання військових об'єктів

Метрики точності та повноти	
Точність (Precision)	Відображає частку правильно розпізнаних об'єктів серед усіх розпізнаних об'єктів: $Precision = TP / (TP + FP)$, де: TP (True Positives) – кількість правильно розпізнаних об'єктів; FP (False Positives) – кількість неправильно розпізнаних об'єктів
Повнота (Recall)	Відображає частку правильно розпізнаних об'єктів серед усіх фактично присутніх об'єктів. $Recall = TP / (TP + FN)$ де: FN (False Negatives) – кількість нерозпізнаних об'єктів.
F1-міра (F1-score)	гармонійне середнє між точністю та повнотою, що дозволяє оцінити баланс між цими двома метриками. $F1-score = 2 * (Precision * Recall) / (Precision + Recall)$
Середня точність (Average Precision, AP) та середня середня точність (mean Average Precision, mAP)	використовуються для оцінки якості розпізнавання в задачах виявлення об'єктів, де необхідно не лише класифікувати об'єкти, але й визначити їхнє розташування.

Метрики, що враховують специфіку військових задач представлені на (рис. 3.14).

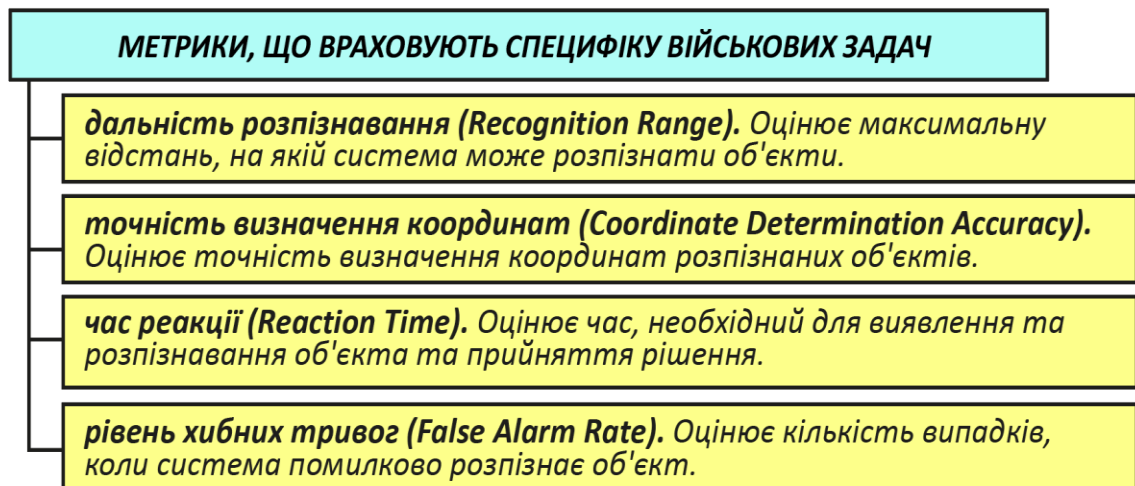


Рисунок 3.14 – Метрики, що враховують специфіку військових задач

3.4 Алгоритм аналізу відео з безпілотних літальних апаратів для виявлення військової техніки противника в реальному часі

Традиційні методи військової розвідки (аеро- та космічна зйомки) тривалий час були основою для збору розвідувальної інформації для Збройних Сил, надаючи цінні дані про можливості та наміри противника (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Зображення військової колони з супутника Махар [75].

Проте названі методи мають свої недоліки і стикаються з проблемами, пов'язаними з досяжністю, вразливістю та обмеженістю ресурсів. Зазвичай такі знімки мають недостатню роздільну здатність для детального аналізу наземних цілей або дій. Супутники обмежені своїми заздалегідь визначеними орбітальними траєкторіями, що обмежує їхню здатність фіксувати динамічні події, які відбуваються на землі, в реальному часі. Вони також вразливі до глушіння методами радіоелектронної боротьби, яка виводить з ладу супутникові лінії зв'язку або погіршує можливості отримання зображень.

Інші методи військової розвідки, такі як проникнення силами спеціальних операцій у тил противника, також мають свої ризики та виклики. Такі завдання супроводжуються ризиками, включаючи виявлення ворожими силами, захоплення в полон або участь у бойових зіткненнях. Підрозділи спеціальних операцій обмежені чисельністю особового складу та ресурсами, що обмежує масштаби їх застосування.

Російсько-українська війна продемонструвала світу мінливий характер війни та важливість технологічної переваги над ворогом, зокрема за рахунок використання БПЛА (рис. 3.16).

БПЛА стали частиною нової технологічної революції у військовій справі, пропонуючи можливості, які покращують спостереження, ведення бою, логістику надаючи можливість вести розвідку, спостереження та завдавати ударів. тощо

БПЛА мають вирішальне значення для збору розвідданих і спостереження за полем бою. Оснащені камерами з високою роздільною здатністю і сучасними

датчиками, такі БПЛА, як MQ-9 Reaper (рис. 3.16), надають дані про пересування і позиції противника в режимі реального часу.

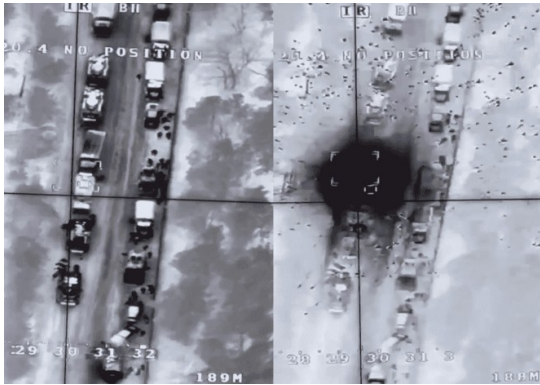


Рисунок 3.16 – Знімок знищеної військової колони з турецького БПЛА Bayraktar TB2 [76].



Рисунок 3.17 – Військовий БПЛА MQ-9 Reaper, оснащений камерою для збору інформації та підвісним арсеналом для завдання ударів по ворожим цілям [77].

Особливості розпізнавання військових об'єктів за допомогою БПЛА представлені на рис. 3.18.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

Динамічна зміна кута огляду та відстані. БПЛА можуть рухатися, що призводить до постійної зміни кута огляду та відстані до об'єктів

Висока швидкість руху. БПЛА можуть рухатися з високою швидкістю, що вимагає швидкої обробки зображень та розпізнавання об'єктів.

Обмежені обчислювальні ресурси. БПЛА часто мають обмежені обчислювальні ресурси, що вимагає використання ефективних алгоритмів розпізнавання.

Різноманітні сенсори. БПЛА можуть бути оснащені різними сенсорами, такими як камери видимого діапазону, тепловізори, мультиспектральні камери, що дозволяє отримувати різноманітну інформацію.

Нестабільність зображення. Вплив вітру та інших факторів може призводити до нестабільності зображення.

Рисунок 3.18 – Особливості розпізнавання військових об'єктів за допомогою БПЛА

Методи ШІ для розпізнавання об'єктів з БПЛА можуть використовуватись для виявлення та відстеження рухомих цілей; розпізнавання типів військової техніки, моніторингу периметру та виявлення порушень певних територій, оцінки збитків після бойових дій тощо і представлені на рис. 3.19.

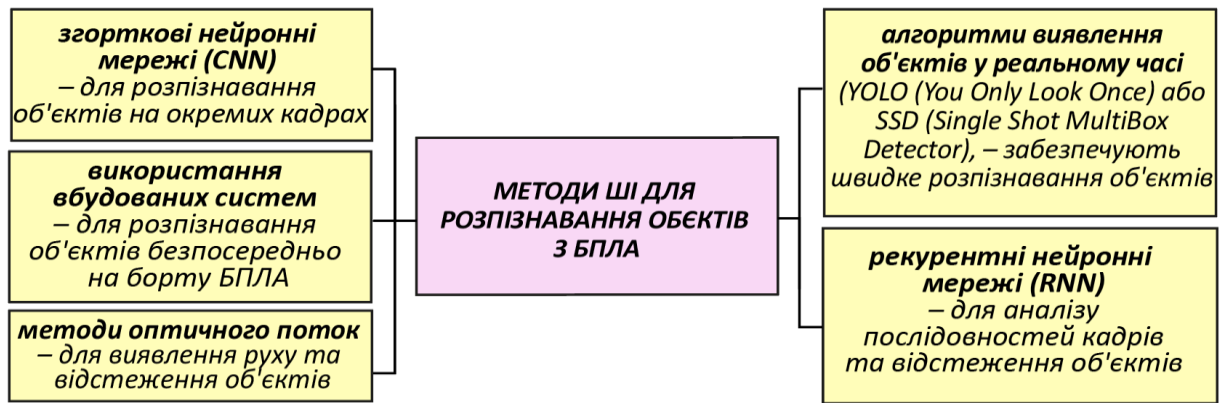


Рисунок 3.19 – Методи ШІ для розпізнавання об'єктів з БПЛА

Вони також відіграють життєво важливу роль в операціях з патрулювання кордонів, відстежуючи великі території на предмет незаконної діяльності та вторгнень. Додатково можуть бути оснащені високоточними боєприпасами, що дозволяє військовим наносити точкові удари з мінімальними супутніми втратами. Ці безпілотники забезпечують безпосередню повітряну підтримку наземним військам, знищуючи сили противника і водночас зменшуючи ризик для пілотів-людей. Іншим завданням безпілотників є радіоелектронна боротьба, коли вони застосовуються для виведення з ладу радіолокаційних систем і ведення радіоелектронної розвідки [78].

На сьогодні деякі види БПЛА, такі як K-MAX, вже здатні доставляти вантажі у віддалені або у тил ворога. Це дозволяє забезпечити війська необхідними боєприпасами, медикаментами та іншими предметами першої необхідності, не наражаючи конвої постачання на ворожі атаки. Окрім логістики, БПЛА допомагають у пошуково-рятувальних місіях, визначаючи місцезнаходження збитих пілотів або військ, що зазнали лиха. БПЛА, оснащені тепловізійними та іншими датчиками, можуть швидко охоплювати великі території, що значно підвищує шанси на успішну рятувальну операцію.

БПЛА можуть слугувати відмінними мішенями для тренувань зенітних підрозділів та випробувань нових систем озброєння. Їх використання в навчальних сценаріях допомагає підвищити ефективність стратегій протиповітряної оборони і гарантує, що війська добре підготовлені до реальних бойових ситуацій.

Російсько-українська війна відзначилася широким застосуванням ударних безпілотників, що перетворило її на полігон для тестування та вдосконалення цієї технології. Одними з таких є FPV-дрони (<https://armyrecognition.com/>) (з англ. FPV – з видом від першої особи), оснащені камерами і вибуховим пристроєм. Вони зарекомендували себе серед військових як ефективний і недорогий інструмент для знищення ворожих цілей без нараження особового складу на прямі бойові дії. Пряма трансляція відеосигналу дозволяє вносити корективи в реальному часі і завдавати точні удари під час дистанційного пілотування.

Такі БПЛА досить прості у виробництві і часто збираються на базі цивільних моделей, що робить їх відносно недорогими у порівнянні з іншими видами зброї та технікою, яку вони призначені вражати. Нерідко трапляються випадки, коли дрон вартістю кілька тисяч доларів знищує багатомільйонну ворожу техніку. Завдяки такій доступності, військові можуть широко застосовувати їх. Проте FPV-дрони можуть використовуватися не тільки для ударів по наземній техніці чи особовому складу ворога, але й для розвідки та виявлення ворожих позицій чи об'єктів. Така можливість подвійного застосування робить їх універсальними засобами на полі бою.

З боку Російської Федерації у поточній війні зарекомендували себе спеціальні ударні безпілотники Shahed-136 і Lancet. Shahed-136 (відомий на російському озброєнні як "Герань-2") призначений для атак на великі відстані і може нести значне вибухове навантаження. У конфлікті він використовувався переважно для атак на об'єкти української інфраструктури, такі як електростанції та мережі зв'язку, спричиняючи значні руйнування та пошкодження. Lancet – російський баражуючий боеприпас, що має більш досконалу систему наведення, яка дозволяє йому завдавати точних ударів по важливих цілях. Lancet

використовується для ураження українських військових об'єктів, включаючи артилерійські позиції, бронетехніку і системи протиповітряної оборони. Його точність і універсальність роблять його грізною зброєю на полі бою [80].

Майбутнє БПЛА та дронів у військових операціях обіцяє значний прогрес завдяки постійним дослідженням і технологічним інноваціям. Досягнення в галузі штучного інтелекту і машинного навчання дозволять БПЛА виконувати завдання автоматизованої розвідки. Оснащені високоточними камерами та сенсорами, дрони вже зараз збирають величезні обсяги візуальної та інфрачервоної інформації. Ці дані можуть бути швидко оброблені для визначення ворожих об'єктів та оцінки загроз, що значно скоротить час від отримання інформації до прийняття рішень.

Збільшуючи кількість таких БПЛА, можна створити цілі рої БПЛА, які будуть синхронізовано збирати інформацію на великих ділянках фронту, забезпечуючи більше покриття території і точність розвідувальних даних. Це також крок до автоматизації бойових місій, таких як виявлення, наведення та знищення цілей з мінімальним втручанням людини.

Важливим аспектом є підвищення безпеки особового складу. Використання автономних БПЛА дозволяє зменшити кількість особового складу, який безпосередньо бере участь у розвідувальних та бойових операціях. Це значно знижує ризик втрат серед військових і дозволяє зосередити людські ресурси на стратегічному плануванні та управлінні [81].

Незважаючи на всі переваги, впровадження інтелектуальних систем у безпілотники викликає також низку етичних та правових питань. Автономні бойові системи можуть приймати рішення про знищення цілей без участі людини, що піднімає питання щодо відповідальності за такі дії та можливих помилок. Крім того, існує ризик неправильного використання цих технологій, що може призвести до загибелі мирного населення або неправомірного застосування сили.

Для перевірки цих теоретичних викладок була обрана модель ШІ-аналізатора YOLO, яка вже була навчена розрізняти техніку [82]. Дана модель забезпечує

розпізнавання важкої та легкої військової техніки, а також інших зразків озброєння та військової техніки противника.

Для перевірки працездатності ШІ була обрана випадкова добірка відео, яка мала на меті кадри знищення російської військової техніки. Критерієм ефективності алгоритму було обрано досягнення точності розпізнавання не менше 70 %, що відповідає вимогам оперативного аналізу відеоданих у режимі реального часу. Вибір порогу довіри $\tau = 0,7$ обумовлений необхідністю мінімізації похибок другого роду (пропуску цілі) при збереженні прийняттого рівня хибнопозитивних спрацювань. Математично цей поріг відповідає точці на кривій Precision-Recall, що забезпечує максимізацію F1-міри в умовах завад, характерних для відеопотоків низької роздільної здатності.

На даній добірці (рис. 3.20) видно, що в більшості випадків ШІ попадає в обраний нами коефіцієнт, але присутні і проблеми.

Основною перешкодою для ШІ виступає оптика та ступінь навченості ШІ. Так, погано видне зображення сильно збиває ШІ та понижує точність з 70 – 100% до 20 – 60%.



Рисунок 3.20 – Результат аналізу фоторяду за допомогою навченого ШІ YOLO (власна розробка)

Легку ж техніку ШІ може і пропустити, оскільки йому важко відрізнити модель через свою недосконалість та не може нормально відрізнити громадську легку техніку від військової, якщо вона не має відповідного камуфляжу або форми. Цю доведено добіркою, представленою на рис. 3.21.

З рис. 3.21 видно, що камуфльовану легку техніку та вантажну техніку ШІ починає помічати, що підтверджує теорію вище.

Тепер спробуємо застосувати даний ШІ до відео, де військова техніка динамічно рухається (рис. 3.21, рис. 3.22), що може значно вплинути на якість обробки.

Проведений аналіз засвідчив наступні проблеми. ШІ здатний аналізувати та знаходити об'єкти на відео (в русі), але як тільки з'являється перешкода, то ШІ починає не відрізнити об'єкти. Навіть застосовуючи для оцінки доступні джерела з інтернету, можна пересвідчитись, що має місце певна недосконалість алгоритмів і як наслідок, можливість помилок та похибок.



Рисунок 3.21 – Друга підбірка фотокадрів розпізнавання військових об'єктів ШІ YOLO (власна розробка)



Рисунок 3.22 – Перше пробне використання ШІ для аналізу відеоряду (власна розробка)



Рисунок 3.23 – Приклад вразливості ШІ до незначних перешкод (власна розробка)

Аналіз помилок алгоритму детекції показав, що основними причинами зниження точності розпізнавання є:

- зниження контрастності зображення;
- часткове перекриття об'єктів;
- наявність шумів у відеопотоці;
- маскуванню техніки.

З точки зору теорії обробки сигналів це призводить до зменшення відношення сигнал/шум (SNR), що ускладнює виділення характерних просторових ознак об'єктів нейромережею.

Важливо зазначити, що під час військових дій скачування даних з невідомих джерел може виявитися небезпечним, оскільки російська зовнішня розвідка полює на OSINT дослідників, які значно заважають ворогові та створюють проблеми для ворожої пропаганди. Тому, важливо бути дуже обачним і не довіряти будь-яким посиланням.

Для виявлення військової техніки за допомогою обробки відео з БПЛА та автоматичного визначення військової техніки на кадрах було використано OpenCV для обробки зображень і YOLOv8 для детекції об'єктів.

Алгоритм обробки відео передбачає етапи:

- попередньої обробки: розбиття відео на кадри, підвищення контрастності;

- розпізнавання об'єктів: використання YOLOv8 для ідентифікації військової техніки.

Була використана попередньо натренована модель YOLOv8, адаптовану для військових об'єктів. Виявлені об'єкти записувалися у файл для подальшого аналізу. Для реалізації алгоритму аналізу відеопотоку використовується програмне середовище Python із застосуванням бібліотек OpenCV та моделі детекції об'єктів YOLOv8.

Алгоритм обробки відеопотоку включає етапи завантаження моделі YOLOv8, попередньої обробки відеокадрів та автоматичної детекції об'єктів. Після завершення обробки результати детекції зберігаються у вигляді кадрів із виділеними об'єктами та відповідними параметрами класифікації.

Всі кадри, які були отримані під час обробки відео з дрону зберігаються в папці з кодом. За результатами аналізу відео з БПЛА в програмному забезпеченні PyCharm було виділено декілька знімків на яких зображена ворожа військова техніка (рис. 3.24).

Запропонований алгоритм для аналізу відео з дронів у реальному часі дозволяє оперативно виявляти та відстежувати військову техніку противника. Це забезпечує ефективний збір розвідувальної інформації та покращує ситуаційну обізнаність командирів та штабів.

Інтеграція методів Big Data, машинного навчання та комп'ютерного зору значно покращує можливості моніторингу бойових дій. Подальший розвиток цих технологій сприятиме вдосконаленню військових стратегій, покращенню безпеки та зменшенню втрат серед військових і цивільного населення.

Використання Big Data у військовій справі дозволяє швидко обробляти великі масиви інформації, що сприяє прийняттю оперативних та обґрунтованих рішень. Інтеграція машинного навчання дозволяє автоматизувати процеси аналізу, підвищуючи точність виявлення загроз та прогнозування ситуацій. Використання комп'ютерного зору для аналізу відео з дронів відкриває нові можливості для розвідки та тактичного планування.

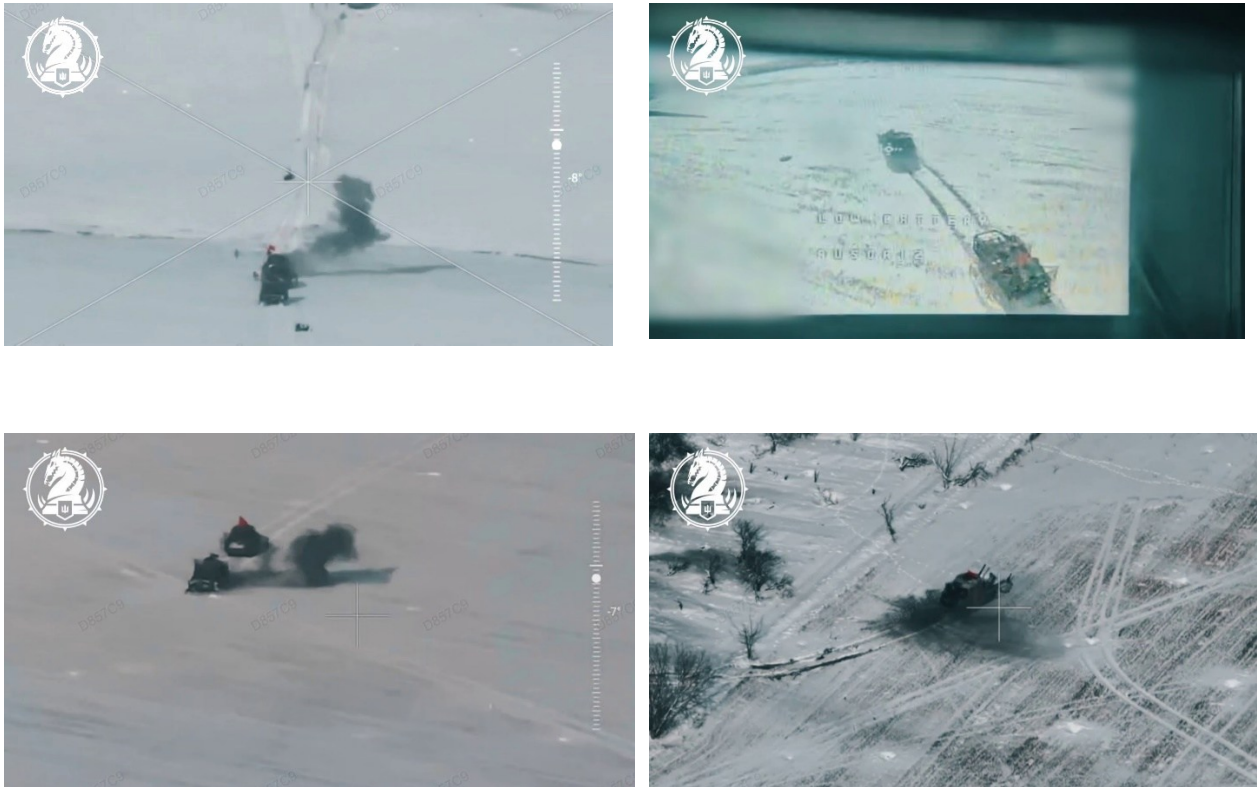


Рисунок 3.24 – Результати обробки відео з БПЛА для виявлення військової техніки противника

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів прогнозування, інтеграцію різних джерел даних та підвищення ефективності систем підтримки прийняття рішень у військовій сфері.

Застосування Big Data та штучного інтелекту у військовій сфері дозволяє значно підвищити ефективність аналізу бойової ситуації, прогнозування загроз та планування операцій.

Алгоритм створення теплової карти бойових дій демонструє можливість автоматизованого виявлення зон активних атак та дозволяє визначити найбільш небезпечні території. Використання алгоритму DBSCAN дозволяє ефективно групувати події бойових дій, що сприяє швидшому ефективному прийняттю рішень.

Прогнозування небезпечних зон за допомогою Random Forest свідчить про високу точність у передбаченні потенційних атак на основі історичних даних.

Аналіз точності моделі та використання показника асигасу підтвердили її ефективність для військового планування та захисту цивільного населення.

Створення карт небезпечних зон для евакуації дозволяє формувати безпечні маршрути для переміщення мирного населення у разі загрози наближення бойових дій. Врахування інфраструктурних та стратегічних факторів забезпечує підвищену надійність запропонованих шляхів евакуації.

Аналіз відео з БПЛА для виявлення військової техніки довів, що використання неймереж YOLOv8 дозволяє оперативно виявляти та класифікувати об'єкти військового призначення. Це сприяє ефективному збору розвідувальних даних та покращенню ситуаційної обізнаності військових підрозділів. Результати роботи алгоритму YOLOv8 інтегруються в модель геоінформаційної підтримки шляхом динамічного оновлення підмножини засобів ураження P та бойових сил F у векторі стану елемента території S_m . Таким чином, автоматизована детекція об'єктів забезпечує актуалізацію інформаційної ємності моделі в реальному часі

3.5 Технології Big Data у підтримці прийняття рішень

3.5.1 Застосування технологій Big Data для покращення успішних бойових дій

Як відомо, сьогодні інформація є одним із ключових елементів успішних бойових дій. Швидкість і точність прийняття рішень безпосередньо залежить від здатності оперативно обробляти великі обсяги даних, але традиційні методи аналізу інформації в умовах сучасної війни не забезпечують необхідної ефективності. Саме тому технології Big Data займають важливе місце у військовій сфері, відкриваючи нові можливості для прогнозування подій, підтримки бойових рішень і підвищення безпеки військових дій.

Big Data дозволяє інтегрувати та аналізувати дані з різних джерел, таких як супутникові знімки, дані з безпілотних літальних апаратів, датчики військового обладнання та дані розвідки. Це значно розширює можливості військового

командування для контролю над ситуацією в реальному часі, прогнозування розвитку подій та виявлення потенційних загроз. Крім того, технології обробки великих даних дозволяють автоматизувати багато процесів, оптимізувати логістику, підвищити рівень захисту інформаційних систем [83].

Сучасні військові конфлікти демонструють важливість інноваційних підходів до управління даними. Наприклад, аналіз геопросторових даних може відстежувати переміщення військової техніки та оцінювати вплив військових операцій на цивільну інфраструктуру та навколишнє середовище в зонах конфлікту тощо.

Метою даного дослідження є аналіз основних напрямків застосування технологій Big Data у військовій справі, визначення їхнього впливу на прийняття рішень та оцінка потенційних переваг у підвищенні обороноздатності й безпеки для населення.

Big Data або великі дані – це поєднання структурованих, напівструктурованих та неструктурованих даних, які можуть бути видобуті для отримання інформації та використані в проектах машинного навчання, прогнозного моделювання та інших передових програм аналітики [84].

Технології Big Data стали невід’ємною частиною в умовах сучасної війни, значно змінивши способи ведення бойових дій, розвідки, планування та забезпечення безпеки. Сьогодні аналіз великих даних дозволяє зменшити невизначеність, покращити якість прийняття рішень і забезпечити ефективне управління ресурсами в умовах динамічних змін на полі бою [85].

Основні сфери використання Big Data у військовому секторі охоплюють широкий спектр завдань. Одним із найважливіших є усвідомлення ситуації в реальному часі. Використання технологій аналізу великих даних дозволяє отримувати інформацію з різних джерел: радарів, супутників, сенсорних систем і дронів. Об’єднання цих даних дає можливість створити повну картину подій і швидко реагувати на зміни ситуації [86].

Ще один важливий напрямок – моніторинг і прогнозування загроз. Великі дані дозволяють аналізувати великі обсяги історичних даних для прогнозування

можливих дій противника. Це допомагає передбачати потенційні загрози, приймати зважені рішення та розробляти оптимальні тактичні сценарії. Наприклад, використання алгоритмів машинного навчання може розпізнавати закономірності в пересуванні військових частин або передбачати місця ймовірних атак.

Кібербезпека є одним з пріоритетних напрямків, у якій великі дані відіграють ключову роль. У сучасних умовах військові дії часто супроводжуються кібератаками. Аналіз великих даних допомагає виявляти потенційні загрози, відстежувати зловмисну діяльність і запобігати несанкціонованому доступу до критично важливих систем [87].

Застосування Big Data у системах підтримки прийняття рішень (СППР) допомагає командирам швидко моделювати різні сценарії розвитку подій і оцінювати ризики. Це дозволяє приймати оптимальні рішення навіть в умовах високої невизначеності [88].

Технології Big Data також використовуються в системах управління логістикою. Аналіз даних допомагає прогнозувати потреби в ресурсах, оптимізувати маршрути постачання та зменшити ризики, пов'язані з переміщенням обладнання в зонах бойових дій. Це значно підвищує ефективність постачання для військових частин.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та супутникові знімки також є важливими джерелами великих даних при веденні бойових дій. Аналіз зображень дає змогу швидко оцінювати зміни місцевості, виявляти фортифікаційні споруди противника, а також відстежувати наслідки техногенних катастроф чи військових дій [86].

Таким чином, Big Data стала важливим елементом сучасної військової стратегії. Її застосування сприяє підвищенню ефективності, зниженню ризиків і посиленню безпеки військовослужбовців і цивільного населення. Технології обробки великих даних продовжують розвиватися, і їх роль у військовій сфері в майбутньому тільки зростатиме.

Big Data та ШІ відіграють ключову роль у військовій сфері, забезпечуючи ефективний аналіз великих обсягів даних, автоматизацію процесів та підвищення точності прийняття рішень. Завдяки цим технологіям можна швидко обробляти супутникові знімки, аналізувати відео з дронів, прогнозувати небезпечні зони та візуалізувати бойові дії на картах. У рамках цього дослідження було реалізовано кілька практичних завдань у PyCharm.

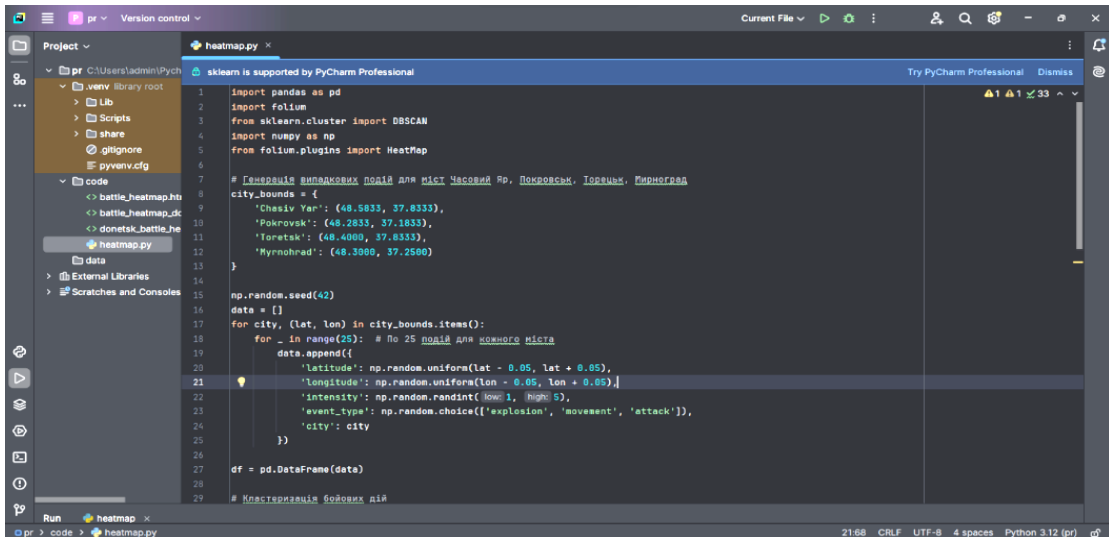
3.5.2 Створення теплової карти бойових дій із використанням технологій Big Data та машинного навчання

Для створення теплової карти було зібрано дані про бойові дії в Часовому Яру, Покровську, Мирнограді та Торезьку Донецької області. Використовуючи бібліотеки `pandas` (для обробки табличних даних), `folium` (для створення інтерактивної карти), `DBSCAN` з `sklearn.cluster` (алгоритм кластеризації для виявлення гарячих точок бойових дій) та `numpy` (для генерації випадкових даних), було створено теплову карту, що показує інтенсивність бойових дій на основі географічних координат і рівня атак. Це дозволяє оперативно оцінити зони підвищеної небезпеки.

Метод `DBSCAN` (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) було використано для кластеризації даних. Він допоміг виявити зони з найбільшою концентрацією атак, що дозволяє автоматично визначати "гарячі точки" бойових дій. Параметр `eps` задавав максимальну відстань між точками одного кластера, а `min_samples` – мінімальну кількість точок для формування кластера. Для кожного міста було згенеровано по 25 випадкових подій (рис. 3.25; рис. 3.26).

Проведемо кластеризацію точок бойових дій за допомогою алгоритму `DBSCAN`:

- `eps = 0.05` – максимальна відстань між точками, щоб вони вважалися частиною одного кластера.
- `min_samples = 3` – мінімальна кількість точок для утворення кластера.



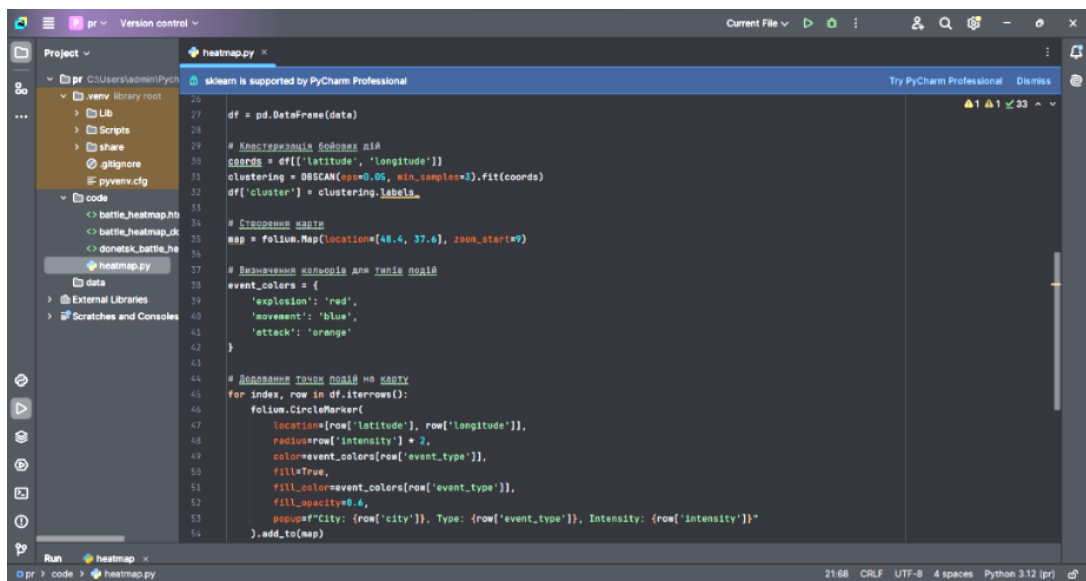
```

1 import pandas as pd
2 import folium
3 from sklearn.cluster import DBSCAN
4 import numpy as np
5 from folium.plugins import HeatMap
6
7 # Генерація випадкових подій для міст Часовий Яр, Покровськ, Торезьк, Мирноград
8 city_bounds = {
9     'Chasiv Yar': (48.5933, 37.8333),
10    'Pokrovsk': (48.2833, 37.1833),
11    'Toretsk': (48.4080, 37.8333),
12    'Myrnohrad': (48.3980, 37.2580)
13 }
14
15 np.random.seed(42)
16 data = []
17 for city, (lat, lon) in city_bounds.items():
18     for _ in range(25): # По 25 подій для кожного міста
19         data.append({
20             'latitude': np.random.uniform(lat - 0.05, lat + 0.05),
21             'longitude': np.random.uniform(lon - 0.05, lon + 0.05),
22             'intensity': np.random.randint(low=1, high=5),
23             'event_type': np.random.choice(['explosion', 'movement', 'attack']),
24             'city': city
25         })
26
27 df = pd.DataFrame(data)
28
29 # Кластеризація бойових дій

```

Рисунок 3.25 – Генерація випадкових подій

Правильний вибір `eps` критично важливий, оскільки занадто велике значення може об'єднати розрізнені події в один кластер, а занадто мале – призвести до великої кількості шумових точок.



```

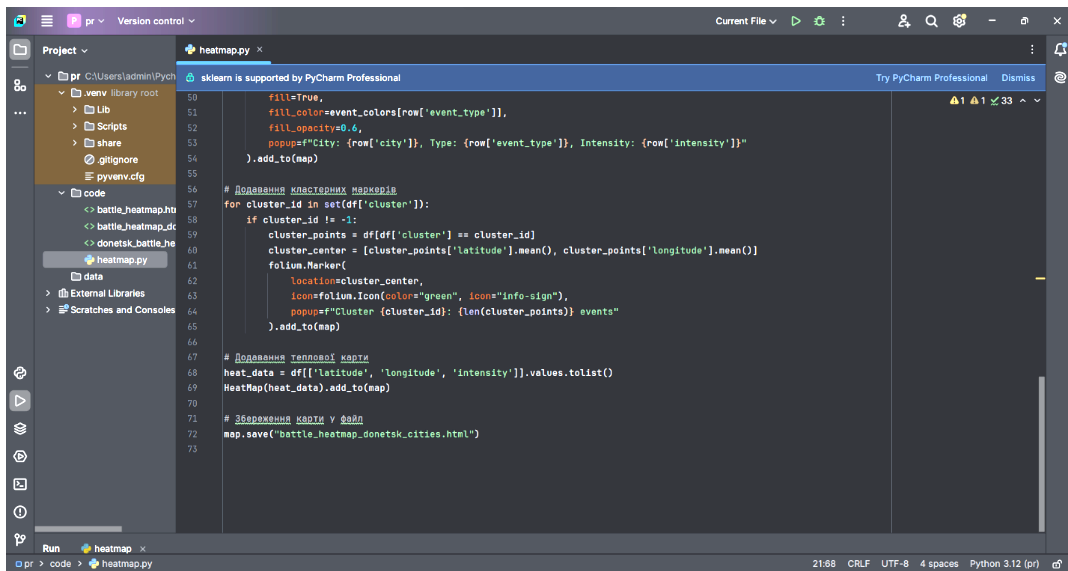
26 df = pd.DataFrame(data)
27
28 # Кластеризація бойових дій
29 coords = df[['latitude', 'longitude']]
30 clustering = DBSCAN(eps=0.05, min_samples=3).fit(coords)
31 df['cluster'] = clustering.labels_
32
33 # Створення карти
34 map = folium.Map(location=(48.4, 37.6), zoom_start=9)
35
36 # Визначення кольорів для типів подій
37 event_colors = {
38     'explosion': 'red',
39     'movement': 'blue',
40     'attack': 'orange'
41 }
42
43 # Додавання точок подій на карту
44 for index, row in df.iterrows():
45     folium.CircleMarker(
46         location=[row['latitude'], row['longitude']],
47         radius=row['intensity'] + 2,
48         color=event_colors[row['event_type']],
49         fill=True,
50         fill_color=event_colors[row['event_type']],
51         fill_opacity=0.4,
52         popup=f'City: {row['city']}, Type: {row['event_type']}, Intensity: {row['intensity']}'
53     ).add_to(map)
54

```

Рисунок 3.26 – Формування правильного вибору максимальної відстані між точками

Далі додамо кластерні маркери (рис. 3.27) та теплову карту (рис. 3.28).

Колір кластерних маркерів – зелений, на карті показаний їхній ID та кількість подій у кластері та зберігаємо карту у форматі HTML, її можна відкривати в браузері (рис. 3.29).



```

50     fill=True,
51     fill_color=event_colors[row['event_type']],
52     fill_opacity=0.4,
53     popup=f'City: {row['city']}, Type: {row['event_type']}, Intensity: {row['intensity']}'
54     ).add_to(map)
55
56 # Додавання кластерних маркерів
57 for cluster_id in set(df['cluster']):
58     if cluster_id != -1:
59         cluster_points = df[df['cluster'] == cluster_id]
60         cluster_center = [cluster_points['latitude'].mean(), cluster_points['longitude'].mean()]
61         folium.Marker(
62             location=cluster_center,
63             icon=folium.Icon(color="green", icon="info-sign"),
64             popup=f'Cluster {cluster_id}: {len(cluster_points)} events'
65         ).add_to(map)
66
67 # Додавання теплової карти
68 heat_data = df[['latitude', 'longitude', 'intensity']].values.tolist()
69 HeatMap(heat_data).add_to(map)
70
71 # Збереження карти у файл
72 map.save('battle_heatmap_donetsk_cities.html')
73

```

Рисунок 3.27 – Додавання кластерних маркерів

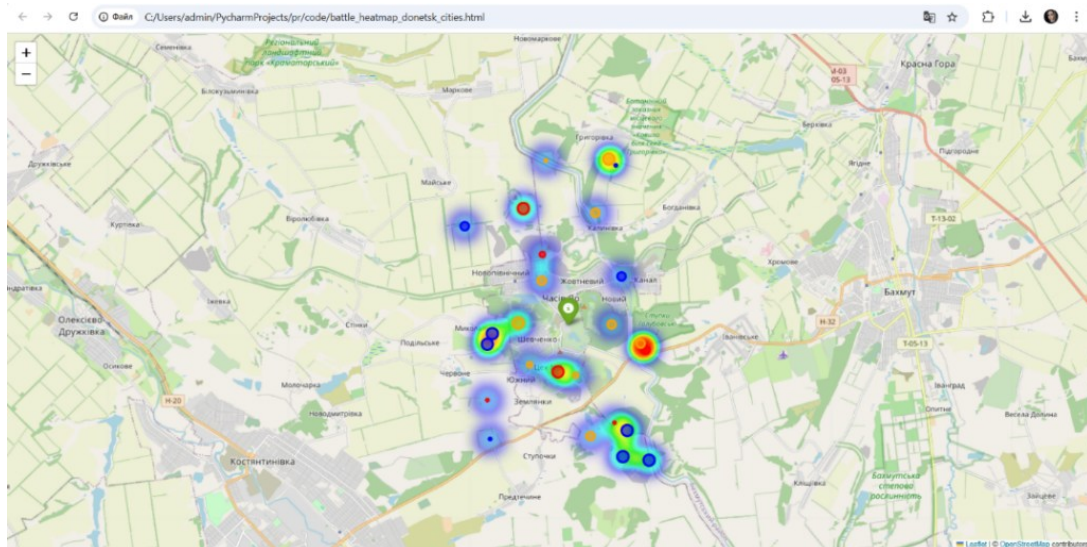


Рисунок 3.28 – Створення теплової карти

В результаті отримали карту бойових дій із точками вибухів, атак та пересування техніки для населених пунктів Часів Яр, Торецьк Покровськ та Мирноград, з автоматичним визначенням «гарячих точок» за допомогою машинного навчання (рис. 3.30).

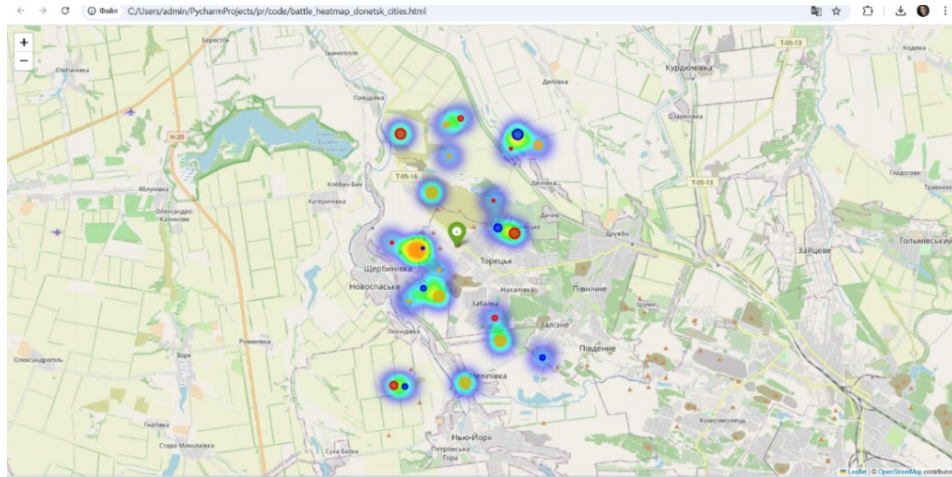


Рисунок 3.29 – Створена карта з кількістю подій у кластері

Пояснення кольорів на карті:

- червоний (red) – вибухи;
- синій (blue) – переміщення військ;
- помаранчевий (orange) – атаки.

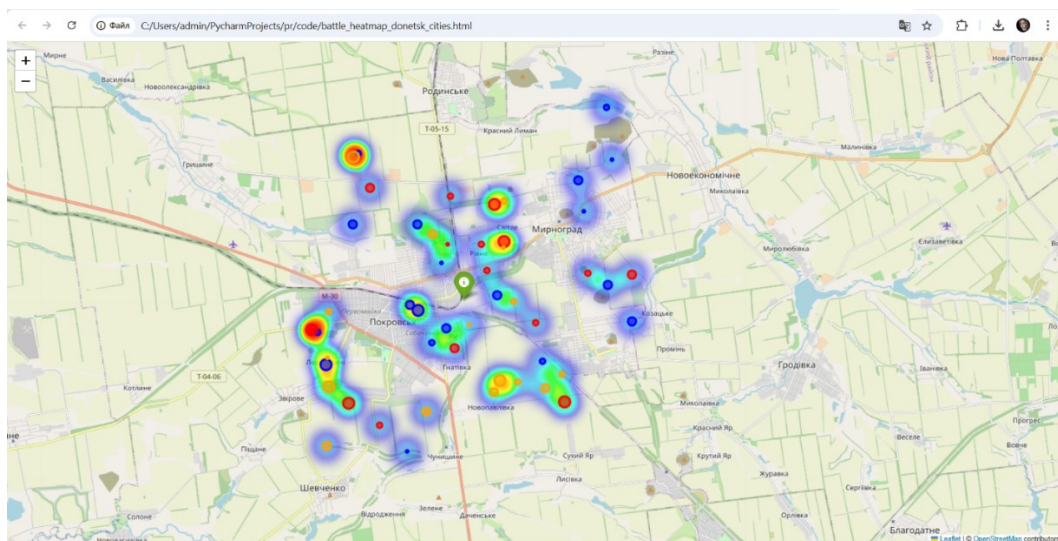


Рисунок 3.30 – Карта бойових дій

Використання теплової карти та алгоритму DBSCAN дозволяє швидко оцінити зони активних бойових дій і виявити небезпечні території. Це може бути корисним для військового планування та оперативного аналізу ситуації.

3.6 Прогнозування можливих атак (небезпечних зон) за допомогою Random Forest

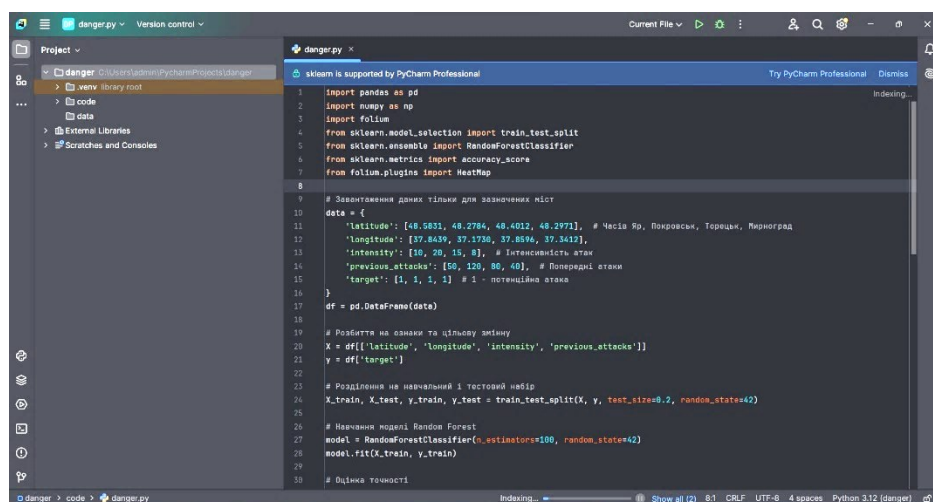
Для прогнозування можливих атак було використано модель Random Forest Classifier із sklearn. Дослідження проводилося для Часового Яру, Покровська, Мирнограда та Торцяка.

Метод Random Forest було обрано через його високу точність у задачах класифікації та стійкість до перевиконання (overfitting). Для навчання використовувалися такі ознаки:

- координати атаки (широта, довгота);
- кількість атак у попередні періоди;
- інтенсивність бойових дій;
- розташування стратегічних об'єктів.

Модель навчалася на історичних даних і використовувалася для передбачення ймовірності нових атак у різних точках регіону. Для оцінки точності прогнозування використовували метрику accuracy – загальна точність моделі. Також було враховано балансування класів, оскільки вхідні дані можуть містити дисбаланс між мирними та атакованими зонами.

Завантажуємо та отримуємо дані (рис. 3.31).



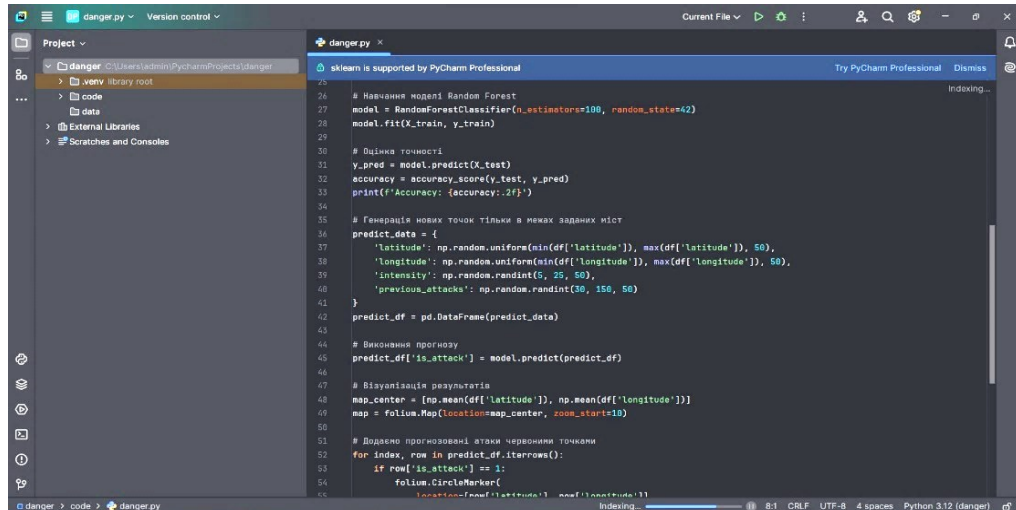
```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import folium
4 from sklearn.model_selection import train_test_split
5 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
6 from sklearn.metrics import accuracy_score
7 from folium.plugins import HeatMap
8
9 # Завантаження даних у вигляді для зазначених міст
10 data = {
11     'latitude': [48.5831, 48.2786, 48.4012, 48.2971], # Часів Яр, Покровськ, Торцяк, Мирноград
12     'longitude': [37.8639, 37.1738, 37.8596, 37.3610],
13     'intensity': [10, 20, 15, 8], # Інтенсивність атак
14     'previous_attacks': [50, 120, 80, 40], # Попередні атаки
15     'target': [1, 1, 1, 1] # 1 - потенційна атака
16 }
17
18 df = pd.DataFrame(data)
19
20 # Розбиття на ознаки та цільову змінну
21 X = df[['latitude', 'longitude', 'intensity', 'previous_attacks']]
22 y = df['target']
23
24 # Розділення на навчальний і тестовий набір
25 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
26
27 # Навчання моделі Random Forest
28 model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
29 model.fit(X_train, y_train)
30
31 # Оцінка точності

```

Рисунок 3.31 – Побудова моделі Random Forest Classifier із sklearn

Навчаємо модель для прогнозування атак (рис. 3.32).



```

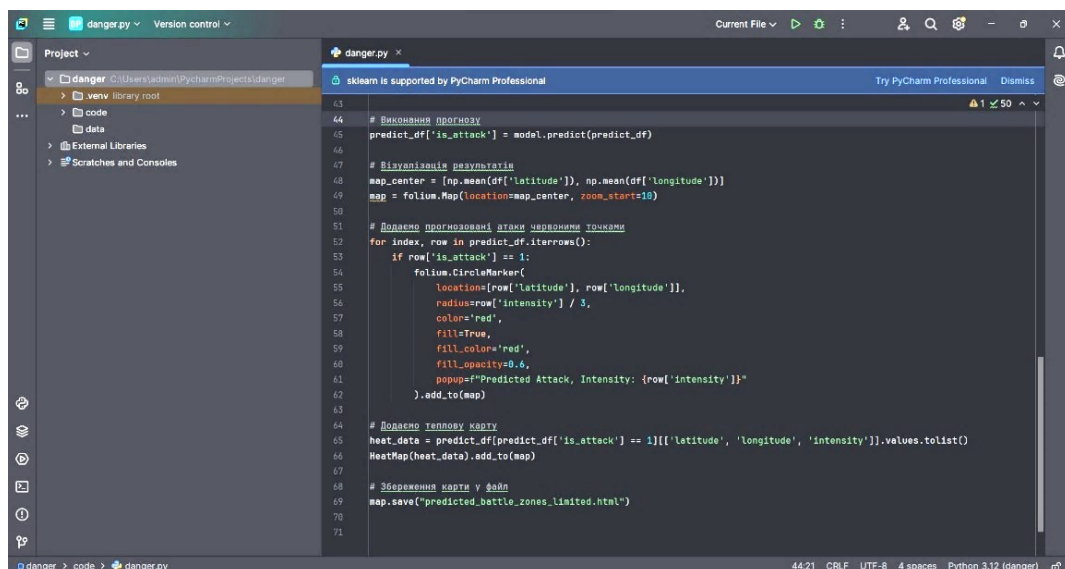
25
26 # Навчання моделі Random Forest
27 model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
28 model.fit(X_train, y_train)
29
30 # Вибір точності
31 y_pred = model.predict(X_test)
32 accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
33 print(f"Accuracy: {accuracy:.2f}")
34
35 # Генерація нових точок тільки в межах заданих міст
36 predict_data = {
37     'latitude': np.random.uniform(min(df['latitude']), max(df['latitude']), 50),
38     'longitude': np.random.uniform(min(df['longitude']), max(df['longitude']), 50),
39     'intensity': np.random.randint(5, 25, 50),
40     'previous_attacks': np.random.randint(50, 150, 50)
41 }
42 predict_df = pd.DataFrame(predict_data)
43
44 # Виконання прогнозу
45 predict_df['is_attack'] = model.predict(predict_df)
46
47 # Візуалізація результату
48 map_center = [np.mean(df['latitude']), np.mean(df['longitude'])]
49 map = folium.Map(location=map_center, zoom_start=10)
50
51 # Додаємо прогнозовані атаки червоними точками
52 for index, row in predict_df.iterrows():
53     if row['is_attack'] == 1:
54         folium.CircleMarker(
55             location=(row['latitude'], row['longitude']),
56             radius=row['intensity'] * 10,
57             color='red',
58             fill=True,
59             fill_color='red',
60             fill_opacity=0.6,
61             popup=f"Predicted Attack, Intensity: {row['intensity']}"
62         ).add_to(map)
63
64 # Додаємо теплову карту
65 heat_data = predict_df[predict_df['is_attack'] == 1][['latitude', 'longitude', 'intensity']].values.tolist()
66 HeatMap(heat_data).add_to(map)
67
68 # Збереження карти у файл
69 map.save("predicted_battle_zones_limited.html")
70
71

```

Рисунок 3.32 – Побудова моделі для прогнозування атак

Наступним кроком є прогнозування атак (рис. 3.33), їх візуалізація на карті та збереження карти у форматі HTML для перегляду в браузері (рис. 3.34).

В результаті отримали карту з прогнозованими атаками. Використовуючи історичні дані про координати та атаки для навчання Random Forest, можна згенерували нові координати для прогнозування, визначити чи будуть там атаки (червоні точки на карті).



```

43
44 # Виконання прогнозу
45 predict_df['is_attack'] = model.predict(predict_df)
46
47 # Візуалізація результату
48 map_center = [np.mean(df['latitude']), np.mean(df['longitude'])]
49 map = folium.Map(location=map_center, zoom_start=10)
50
51 # Додаємо прогнозовані атаки червоними точками
52 for index, row in predict_df.iterrows():
53     if row['is_attack'] == 1:
54         folium.CircleMarker(
55             location=(row['latitude'], row['longitude']),
56             radius=row['intensity'] / 3,
57             color='red',
58             fill=True,
59             fill_color='red',
60             fill_opacity=0.6,
61             popup=f"Predicted Attack, Intensity: {row['intensity']}"
62         ).add_to(map)
63
64 # Додаємо теплову карту
65 heat_data = predict_df[predict_df['is_attack'] == 1][['latitude', 'longitude', 'intensity']].values.tolist()
66 HeatMap(heat_data).add_to(map)
67
68 # Збереження карти у файл
69 map.save("predicted_battle_zones_limited.html")
70
71

```

Рисунок 3.33 – Прогнозування атак

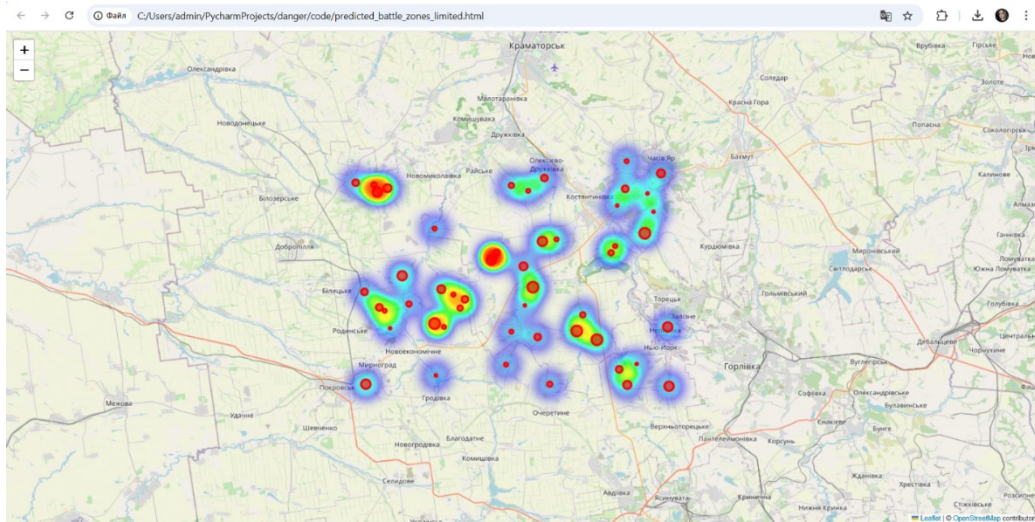


Рисунок 3.34 – Візуалізація атак на карті

Метод Random Forest дозволяє з високою точністю передбачати можливі атаки та визначати потенційно небезпечні зони. Ці прогнози можуть бути використані для планування оборони та організації евакуації мирного населення.

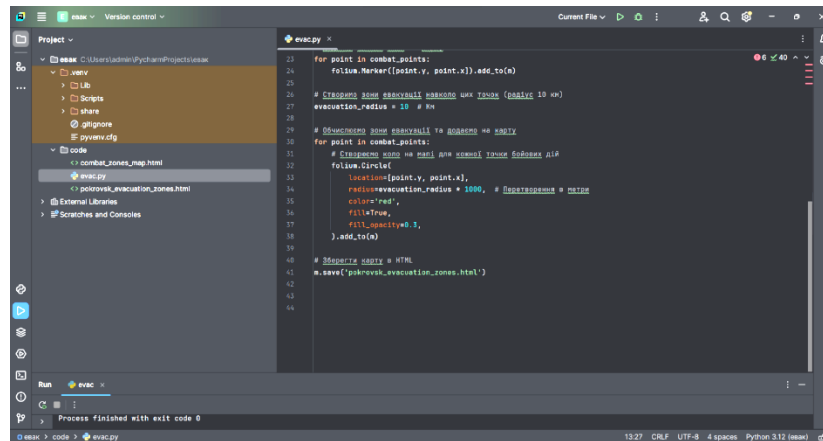
Для визначення найбільш небезпечних зон у Покровській громаді Донецької області на основі теплової карти та прогнозної моделі створено карту евакуаційних маршрутів, що дозволяє визначити найбільш безпечні шляхи виходу з небезпечних територій. Для візуалізації використовувалися GeoPandas та Folium. Вказуємо координати для населеного пункту міста Покровськ та додаємо декілька додаткових координат для Покровської громади (рис. 3.35).

```

1 import geopandas as gpd
2 import folium
3 from shapely.geometry import Point
4 from geopy.distance import geodesic
5
6 # Координати для Покровська, Донецька область
7 pokrovsk_center = [48.2782, 37.1832]
8
9 # Вибір створення точки бойових дій в Покровську
10 combat_points = [
11     Point(37.1132, 48.2668),
12     Point(37.0545, 48.2554),
13     Point(37.2645, 48.2911),
14 ]
15
16 # Створення GeoDataFrame для бойових точок
17 gdf_combat = gpd.GeoDataFrame(geometry=combat_points)
18
19 # Створення карти для Покровська
20 m = folium.Map(location=pokrovsk_center, zoom_start=12)
21
22 # Додаємо бойові зони на карту
23 for point in combat_points:
24     folium.Marker([point.y, point.x]).add_to(m)
25
26 # Створення зони евакуації навколо цих точок (радіус 10 км)
27 evacuation_radius = 10 # км
  
```

Рисунок 3.35 – Створення евакуаційних маршрутів

Далі для кожної точки бойових дій створюємо коло радіусом 10 км –умовно небезпечні зони для евакуації (рис. 3.36), візуалізуємо на карті та зберігаємо карту в форматі HTML для перегляду в браузері (рис. 3.37).



```

23 for point in combat_points:
24     folium.Marker([point.y, point.x]).add_to(m)
25
26     # Створюємо умовні небезпечні зони (радіус 10 км)
27     evacuation_radius = 10 # km
28
29     # Обчислюємо умовні небезпечні зони
30     for point in combat_points:
31         # Створюємо коло на map і додаємо його до map
32         folium.Circle(
33             location=[point.y, point.x],
34             radius=evacuation_radius * 1000, # Перетворення в метри
35             color='red',
36             fill=True,
37             fillColor='red',
38             ).add_to(m)
39
40 # Зберігаємо HTML
41 m.save('pokrivosk_evacuation_zones.html')
42
43
44

```

Рисунок 3.36 – Створення умовних небезпечних зон для евакуації

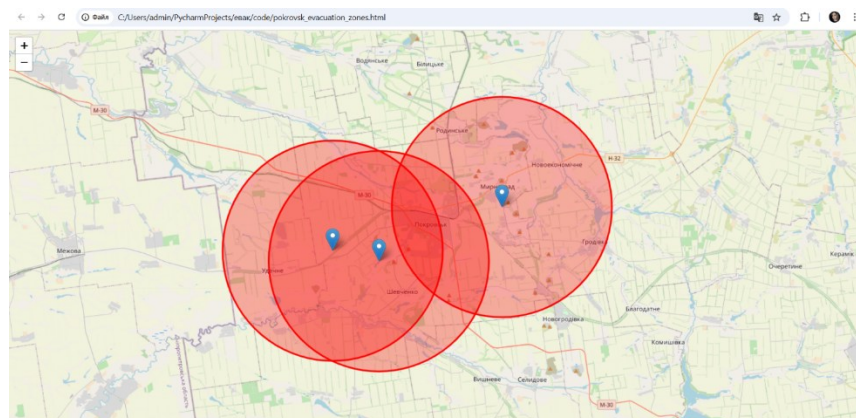


Рисунок 3.37 – Візуалізація умовних небезпечних зон для евакуації

За результатами проведеного дослідження була одержана карта з небезпечними зонами для евакуації з Покровської громади радіусом 10 км.

Запропонована модель дозволяє швидко будувати безпечні маршрути евакуації в умовах бойових дій. Це може значно покращити координацію цивільного населення та військових підрозділів у кризових ситуаціях.

Висновки до третього розділу

1. Розроблено модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень, яка базується на формалізації території бойових дій у вигляді багатовимірного вектора характеристик $S_m = \{P, D, R, F\}$. Застосований підхід дозволяє структурувати дані про засоби ураження, персонал, ресурси та бойові сили, що забезпечує перехід від описового відображення обстановки до її математично формалізованого аналізу в межах єдиного інформаційно-аналітичного середовища.

2. Запропоновано метод просторового аналізу умов розміщення об'єктів, який базується на використанні операцій просторових запитів до геопросторових баз даних. Введено показник ефективності пошуку η_i як відношення поточної множини умов до вимог нормативних документів, що дозволяє кількісно оцінювати якість інформаційного забезпечення при визначенні оптимальних зон дислокації підрозділів.

3. Розроблено та реалізовано алгоритм аналізу відеопотоків із БПЛА на основі нейромережевої моделі YOLOv8, який забезпечує автоматизовану детекцію та класифікацію військової техніки в реальному масштабі часу. Встановлено, що використання порогового значення довіри $\tau = 0,7$ забезпечує раціональний баланс між точністю детекції та швидкістю обробки даних для оперативних систем розвідки.

4. Обґрунтовано використання методів аналізу великих даних для просторового аналізу бойових дій. Застосування алгоритму кластеризації DBSCAN дозволяє автоматично визначати просторові кластери підвищеної активності та формувати динамічні теплові карти, що відображають зони найбільшої концентрації атак.

5. Запропоновано програмно-алгоритмічне рішення для прогнозування небезпечних зон із використанням моделі машинного навчання Random Forest. Модель дозволяє прогнозувати ймовірні напрямки атак противника на основі аналізу історичних геопросторових даних та використовувати ці результати для побудови безпечних маршрутів евакуації і планування оборонних заходів.

6. Доведено, що інтеграція методів комп'ютерного зору, інтелектуального аналізу даних та геоінформаційних технологій у складі СППР дозволяє суттєво підвищити рівень ситуаційної обізнаності органів управління. Це забезпечує реалізацію адаптивного циклу «дані – аналіз – прогноз – рекомендація», що дозволяє зменшити невизначеність інформаційного середовища та скоротити час прийняття управлінських рішень.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Четвертий розділ присвячений практичній апробації, випробуванням та впровадженню розроблених у дисертації моделей, методів і алгоритмів у реальних умовах моніторингу територій бойових дій. У розділі представлено результати застосування геоінформаційних технологій для фіксації та аналізу руйнувань об'єктів інфраструктури, що виникли внаслідок бойових дій.

На основі даних дистанційного зондування Землі (Sentinel-2, Landsat-8) реалізовано підхід до розв'язання вимірювальних задач, зокрема визначення геометричних характеристик об'єктів (Антонівський міст, Каховська ГЕС), моделювання зон затоплення та моніторингу обміління водойм. Використання матеріалів аерофотозйомки з БПЛА та програмного комплексу Pix4Dmapper дозволило створити детальні ортофотоплани та 3D-моделі зруйнованої інфраструктури (на прикладі м. Луч), що підтверджує синергетичний ефект мультимодальної обробки даних.

Отримані результати виступають емпіричним підтвердженням ефективності образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу та ентропійного методу оцінювання приросту інформації, забезпечуючи перехід від розрізнених геопросторових даних до структурованого інформаційного ресурсу підтримки прийняття рішень.

Важливим елементом практичної апробації стало інтегрування результатів геоінформаційного аналізу у контур підтримки прийняття рішень у системах управління військами. Використання сучасних геоінформаційних технологій забезпечує оперативне узагальнення різномірних джерел інформації, зокрема супутникових знімків, матеріалів аерофотозйомки та геопросторових баз даних, що дозволяє підвищити рівень ситуаційної обізнаності органів управління. Застосування розроблених моделей і алгоритмів сприяє скороченню часу обробки

інформації та підвищенню ефективності прийняття управлінських рішень в умовах високої динамічності бойових дій

4.1 Загальні відомості про геоінформаційний аналіз військових дій

В Україні, де війна та конфлікти стали неодмінною частиною сучасності, виникає актуальна потреба в розробці та застосуванні нових методів для фіксації та моніторингу руйнувань, спричинених російською агресією. Одним з найефективніших та перспективних інструментів, який дозволяє систематизувати та аналізувати геопросторові дані у контексті руйнувань, є ГІС.

ГІС відіграють ключову роль у фіксації та моніторингу руйнувань, які спричинені військовими діями і використовуються для збору, аналізу та візуалізації геопросторових даних, що дозволяє ефективно визначати обсяги руйнувань та їх географічний розподіл. З цією метою створюються геопортали для задоволення потреб фізичних та юридичних осіб в інформації про стан містобудівної діяльності, регіонального розвитку, НПС, ринку нерухомості, транспорту та надання інших інформаційно-довідкових і пізнавальних геоінформаційних послуг. З геопорталів можна отримати багато інформації про об'єкти пошкоджень та руйнувань тощо. Як приклад, на рис. 4.1 представлений геопортал м. Миколаїв, де відображені об'єкти пошкоджень і руйнувань та візуального оцінювання стану міста (рис. 4.1).

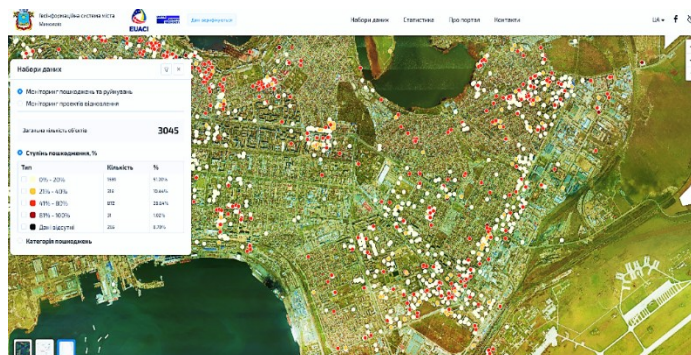


Рисунок 4.1 – Геопортал м. Миколаїв з ввімкненими шарами «Моніторинг пошкоджень та руйнувань» [89].

Моніторинг пошкоджень у місті Миколаїв (рис. 4.1) розглядається у межах даного дослідження як інструмент кількісного оцінювання зменшення ентропії інформаційного середовища. Наявність структурованих геопросторових даних про об'єкти руйнувань, їх просторове розташування та ступінь пошкодження дозволяє зменшити невизначеність інформації про стан міського середовища. Це, у свою чергу, забезпечує приріст інформативності системи управління військами та підтверджує ефективність застосування розробленого методу оцінювання приросту інформації.

4.2 Візуалізація зон бойових дій на території України

Відповідно до сформованого єдиного переліку територій, на яких ведуться (велися) бойові дії або тимчасово окупованих Російською Федерацією, прийнято постанову Кабінету Міністрів України від 06 грудня 2022 № 1364 «Деякі питання формування переліку територій, на яких ведуться (велися) бойові дії або тимчасово окупованих Російською Федерацією, на сьогодні, входять Харківська, Луганська, Донецька, Запорізька, Херсонська, Миколаївська, Дніпропетровська, Сумська, Чернігівська та АР Крим [90].

Розроблена автором карта територій на яких ведуться бойові дії, представлена на (рис. 4.2).

Донецька та Луганська області знаходяться на сході України і з 2014 року є епіцентром бойових дій. Протягом 10 років міста та села зазнають обстрілів, мають значні руйнування інфраструктури та екосистеми. Також, зазначимо, що частина Донбасу перебуває під окупацією і з кожним днем ситуація стає напруженішою.

Сумська, Чернігівська, Харківська області розташовані на півночі України та мають невеликі відстані з російським кордоном на початку повномасштабного вторгнення зазнали чималих втрат від обстрілів та тяжких втрат від окупації. На сьогоднішній день, невелика частина території Харківської області і досі перебуває під окупацією. Хоча активні бойові дії в північних областях

зменшилися в порівнянні з лютим та березням 2022 року, обстріли прикордонних територій не припиняться.

Запорізька, Херсонська та Миколаївська області на півдні України, також під час повномасштабного вторгнення зазнали значних руйнувань. Частина цих територій й наразі перебуває під окупацією.

Кримський півострів перебуває під російською окупацією з 2014 року. Карта окупованих та деокупованих територій України станом на 05.10.2024р. розроблена автором на основі DeepStateMAP, представлена на рис. 4.3.



Рисунок 4.2 – Карта територій бойових дій (розробка автора)



Рисунок 4.3 – Карта окупованих та деокупованих територій України станом на 05.10.2024р.

У межах даного дослідження розроблені автором карти територій бойових дій та окупованих територій України (рис. 4.2, рис. 4.3) розглядаються як практична реалізація запропонованої образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу.

На відміну від традиційного підходу, де карта виступає переважно як засіб візуалізації геопросторових даних, у даній роботі вона інтерпретується як структурований інформаційний канал, який забезпечує передачу, семантичне структурування та інтерпретацію просторово-часових даних від театру бойових дій до особи, що приймає рішення.

Завдяки використанню системи умовних позначень, тематичних шарів та просторових взаємозв'язків карта дозволяє формалізувати інформаційні потоки у

системі управління військами та забезпечує інтеграцію різнорідних джерел даних у єдине геоінформаційне середовище підтримки прийняття рішень.

Прикладом реалізації такого підходу є аналіз супутникових знімків Sentinel-2 Антонівського мосту, що представлений на рис. 4.5. Саме через цей інформаційний канал забезпечується відображення динаміки змін стану об'єкта інфраструктури в умовах бойових дій.

Дослідження виконане з використанням технологій ГІС та ДЗЗ для візуалізації бойових дій та розв'язку вимірювальних задач. Основні етапи методології включають вибір джерел супутникових даних, їх обробку та аналіз, а також застосування геоінформаційних систем (ГІС) для візуалізації та моделювання наслідків.

Для отримання даних про водні об'єкти використовувалися супутникові зображення з високою просторовою та спектральною роздільною здатністю. Основними джерелами даних були супутники Sentinel-2 (просторова роздільна здатність 10 м), що забезпечують високу частоту зйомки (раз на 5 днів), що є критичним для відстеження динамічних змін об'єктів [92], та супутники Landsat 8 (просторова роздільна здатність 30 м), що мають широкий спектр каналів для детального аналізу стану води та навколишньої території [93].

Після аналізу супутникових зображень і даних ГІС були зроблені висновки щодо змін у водних об'єктах під впливом бойових дій, руйнування мостів та гребель під час наступальних або оборонних дій та моніторинг затоплень.

Антонівський міст розташований у Херсоні, є важливим транспортним шляхом, що з'єднує правий і лівий береги річки Дніпро. Під час бойових дій його стратегічне значення зросло і зробило його важливим об'єктом для перекидання важкої військової техніки солдатів РФ з лівого берегу Херсонської області до міста Херсона під час наступальних дій в 2022 році. Довжина становить близько 1,5 км.

За допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.04 була виміряна довжина мостової конструкції, яка проходить через річку Дніпро та з'єднує правий та лівий берег Херсонської області (рис. 4.4), її довжина становить 85 м.

Супутникові знімки Sentinel-2 Антонівського моста 03.06.2022 р. та 13.09.2022 р. представлені на рис. 4.5.

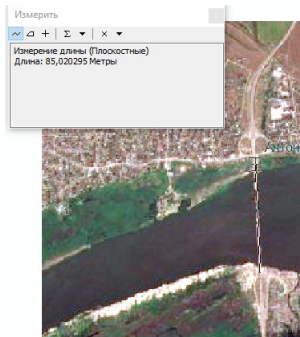


Рисунок 4.4 –
Вимірювання
довжини
Антонівського
мосту



а)



б)

Рисунок 4.5 – Супутниковий знімок Sentinel-2 Антонівського моста 03.06.2022 р. (а); супутниковий знімок Sentinel-2 Антонівського моста 13.09.2022 р. (б)

Під час контрнаступу наших військових влітку 2022 року міст неодноразово піддавався обстрілам з метою його пошкодження. Міст зазнав чималих ушкоджень, але все ж таки контроль над правим берегом Херсонської області було здобуто та лінія берега стала першою лінією оборони. Форсування неможливе, адже на даній ділянці дослідження площа річки Дніпро становить 29 897,3 м² (рис. 4.6), середня глибина 5-10м та сильні течії.

Каховська ГЕС розташована на річці Дніпро в Херсонській області України, збудована в 1955-1967 роках. З'єднувала правий та лівий берег Херсонської області. Це була одна з найбільших гідроелектростанцій в Україні (357 МВт) яка виконувала кілька важливих функцій, зокрема виробництво електроенергії, регулювання водного потоку, зрошення сільськогосподарських угідь та водопостачання [94].

Під час повномасштабного вторгнення Каховська ГЕС мала стратегічне значення, як мостова переправа через річку Дніпро між окупованою та підконтрольною територією, та як логістичний вузол. Одним із важливих моментів був контроль водних ресурсів, адже ГЕС забезпечувала подачу води до

Північно-Кримського каналу, який був основним джерелом водопостачання води до Криму.

Довжина моста, який проходить через Каховську ГЕС становить 159,9 м за результатами обрахунку в програмному забезпеченні ArcGIS 10.04 (рис. 4.7).

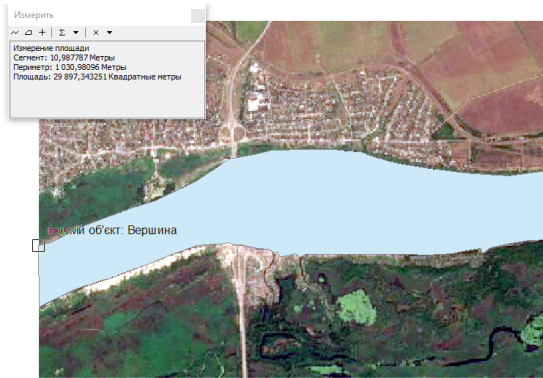


Рисунок 4.6 – Виміряна площа річки Дніпро на супутниковому знімку Sentinel-2

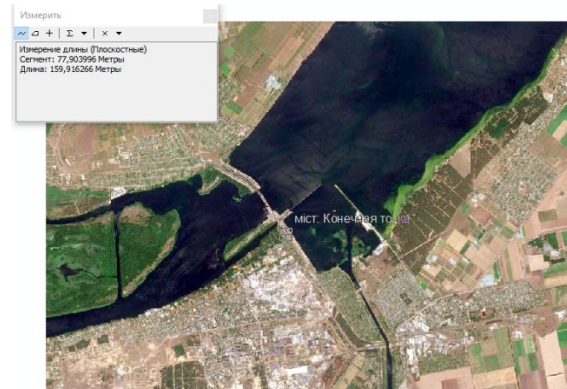


Рисунок 4.7 – Виміряна довжина мосту Каховської ГЕС

У червні 2023 р. було зруйновано Каховську гідроелектростанцію (рис. 4.8), що призвело до масштабного затоплення значних територій Херсонської та Миколаївської областей. Унаслідок цього відбулися суттєві зміни водного балансу річки Дніпро, виникли нові загрози для природних екосистем, було затоплено прилеглі населені пункти та інфраструктурні об'єкти, що спричинило людські втрати, а також подальше обміління річки та пов'язаних з нею водних об'єктів. За своїми наслідками ця подія розглядається як масштабна екологічна катастрофа техногенного характеру [94].

У межах даного дослідження наслідки руйнування Каховської ГЕС аналізуються із застосуванням геоінформаційних технологій та даних дистанційного зондування Землі. Використання супутникових знімків Sentinel-2 та Landsat-8 дозволяє виконати просторовий аналіз змін водної поверхні, моделювання зон затоплення та кількісне оцінювання масштабів трансформації водних об'єктів. Отримані результати є складовою геоінформаційної підтримки прийняття рішень у системі управління військами та дозволяють оперативно оцінювати зміни оперативної й екологічної обстановки.



Рисунок 4.8 – Супутникові знімки Sentinel-2 Каховської ГЕС:
а) 02.08.2022р.; б) 18.08.2024р.

За даними знімками було розраховано площу Каховського водосховища. До підриву площа водного об'єкта в межах даного знімку сягала 160 936,2 м², а після – 52 745,9 м² (рис. 4.9).

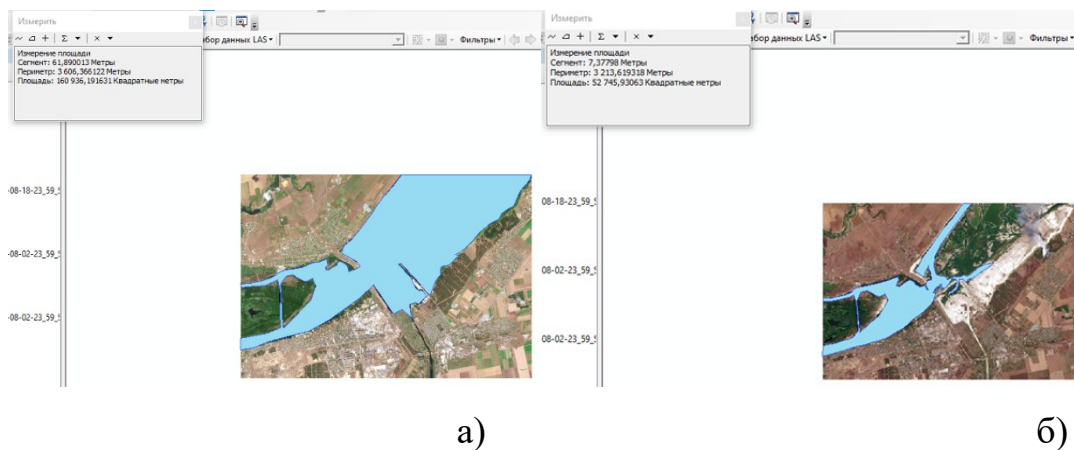


Рисунок 4.9 – Виміряна площа водного об'єкту на супутниковому знімку Sentinel-2 Каховської ГЕС: а) 02.08.2022р.; б) 18.08.2024р.

Підрив Каховської ГЕС призвів до різкого зниження рівня води в річці Дніпро, зменшилась відстань між правим і лівим берегом (рис. 4.10).

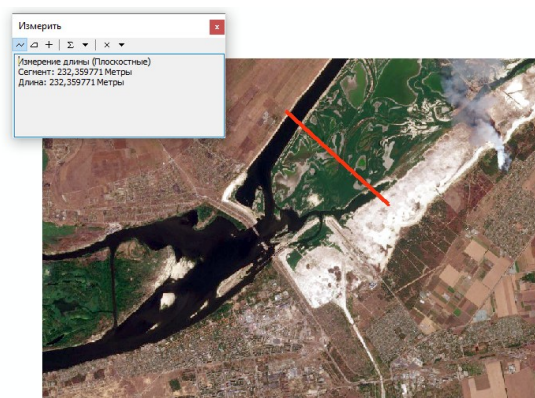


Рисунок 4.10 – Відстань між правим та лівим берегом Херсонської області після підриву ГЕС

Підтоплення територій. Підрив Каховської ГЕС призвів до значного підвищення рівня води в Дніпрі, що спричинило затоплення значних територій міста Херсон, а також багатьох населених пунктів на обох берегах річки (рис. 4.11).

Вода поширилася на прилеглі райони Херсона та інші населені пункти, затопивши житлові будинки, дороги, сільськогосподарське угіддя.



а)

б)

Рисунок 4.11 – Супутниковий знімок Landsat-8 правого та лівого берега Херсонської області а) до підриву Каховської ГЕС 09.08.2022р.; б) після підриву Каховської ГЕС 09.06.2023р.

Порівнявши два супутникових знімки, до та після, було змодельовано зону затоплення після підриву Каховської ГЕС (рис. 4.12).



а)

б)

Рисунок 4.12 – Змодельована зона затоплення на супутникових знімках Landsat-8 правого та лівого берега Херсонської області: а) до підриву Каховської ГЕС 09.08.2022р.; б) після підриву Каховської ГЕС 09.06.2023р.

За допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.04 було розраховано площу затоплення після підриву Каховської ГЕС в межах даного супутникового знімку, яка сягала 5,46 км² (рис. 4.13).

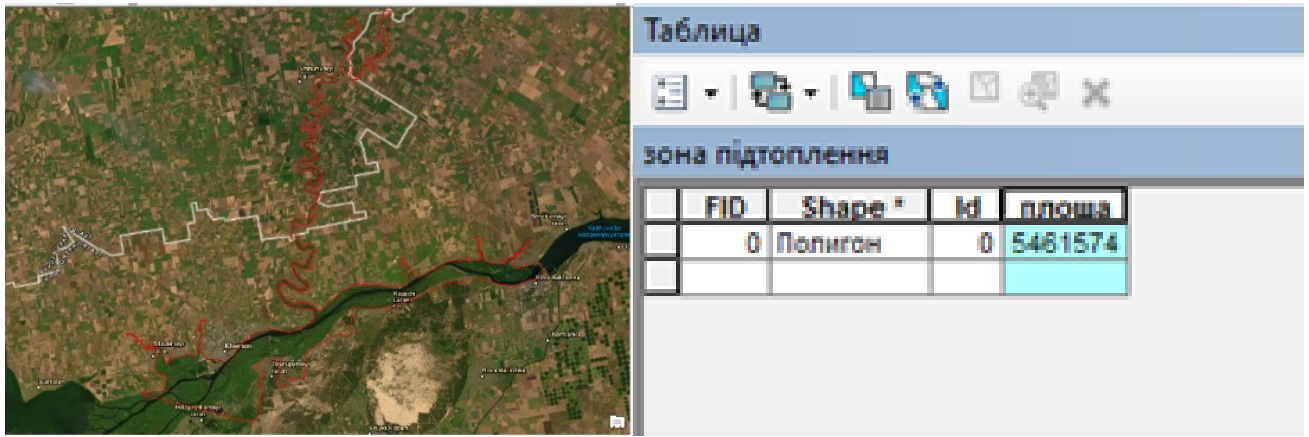


Рисунок 4.13 – Розрахунок площі затоплення після підриву Каховської ГЕС:
а) змодельована зона; б) розрахована площа в квадратних метрах

Каховське водосховище біля Нікополя Дніпропетровська область.
Каховське водосховище, розташоване неподалік міста Нікополь, зазнало значних змін після руйнування Каховської ГЕС у червні 2023 року. Це водосховище, яке є частиною Дніпра, забезпечувало водою не лише населення, але й сільське господарство та промислові підприємства в регіоні. Його територія включала значну площу в кількох, зокрема Херсонській, Запорізькій, та частково Дніпропетровській (рис. 4.14).

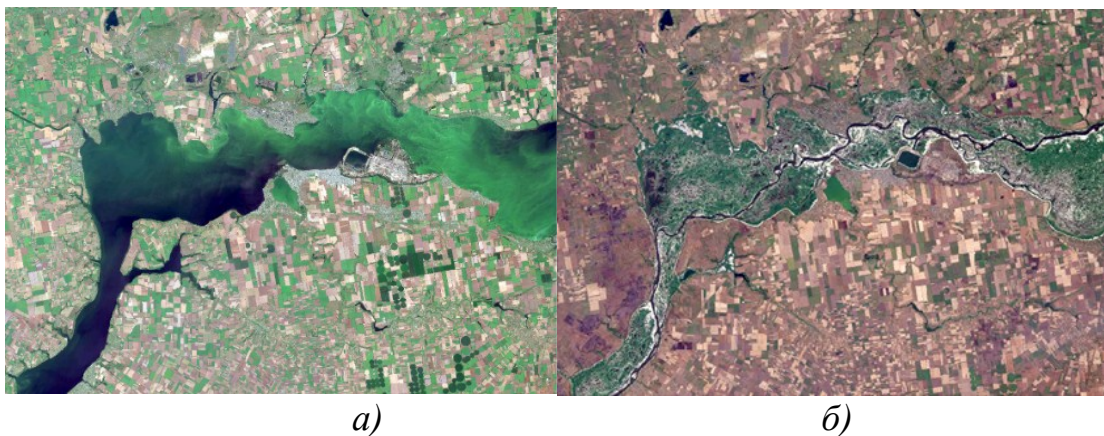


Рисунок 4.14 – Супутникові знімки Sentinel-2 Каховського водосховища поблизу міста Нікополь Дніпропетровської області:
а) 15.07.2021р.; б) 14.07.2024р.

Аналізуючи космознімки Каховського водосховища до підриву та після (рис. 4.15), можна стверджувати, що водосховище значно обміліло і тому для

розуміння, який об'єм води втрачено, розраховуємо площу через програмне забезпечення ArcGIS 10.04. До підриву площа водного об'єкта становила 222706 м², після – 20377 м².

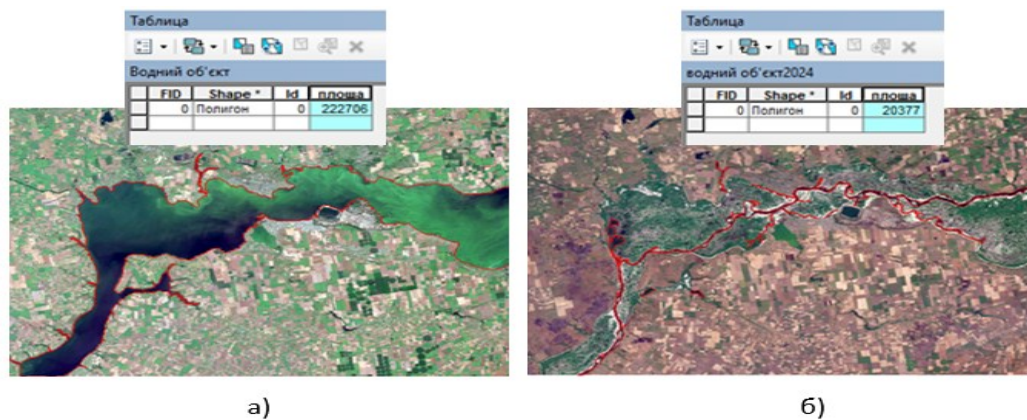


Рисунок 4.15 – Виміряні площі в м² по супутникових знімках Sentinel-2 Каховського водосховища поблизу міста Нікополь Дніпропетровської області: а) 15.07.2021р.; б) 14.07.2024р.

Руйнування греблі призвело до масового спустошення водосховища, особливо біля прибережних зон, таких як Нікополь. Після прориву рівень води різко впав, внаслідок чого велика кількість земель оголилася, утворюючи нові прибережні зони. Це спричинило серйозні екологічні наслідки, серед яких знищення водної фауни, забруднення території, а також зміни в місцевій екосистемі.

Висихання Північно-Кримського каналу. До введення військових дій Каховське водосховище, завдяки створеній греблі забезпечувало водопостачання мільйонам людей, а також використовувалось для зрошення сільськогосподарських угідь, після підриву вище за течією рівень води в Дніпрі різко знизився, що створило проблеми з водопостачанням для багатьох населених пунктів.

Після руйнування Каховської ГЕС рівень води в Каховському водосховищі значно знизився, що призвело до припинення подачі води в Північно-Кримський канал, який забезпечував до 85% водопостачання Криму, втратив своє основне джерело, що спричинило загрозу для сільськогосподарських угідь і водопостачання в регіоні (рис. 4.16).



а)

б)

Рисунок 4.16 – Супутникові знімки Sentinel-2 Північно-Кримського каналу біля Каховської ГЕС: а) 13.06.2022р.; б) 09.06.2024р.

За допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.04 на даній ділянці дослідження було розраховано площу Північно-Кримського каналу, яка сягала 2453,4 м² (рис. 4.17).

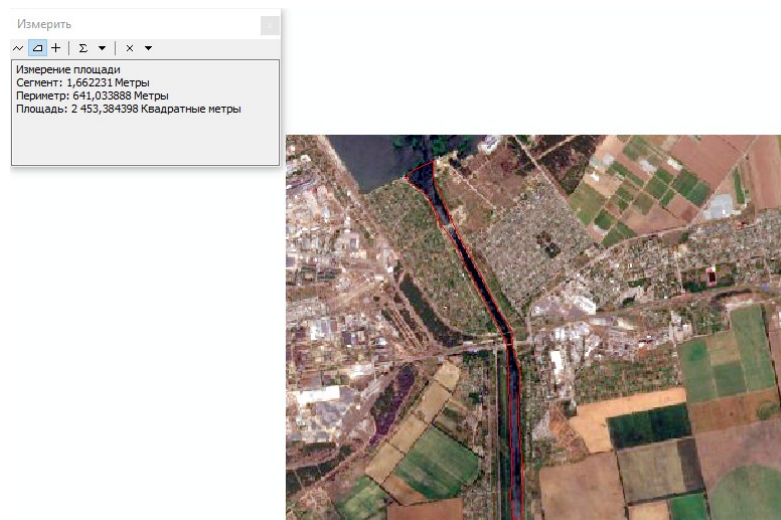


Рисунок 4.17 – Виміряна площа Північно-Кримського каналу біля Каховської ГЕС на супутниковому знімку Sentinel-2

Також, було проведено спостереження за Північно-Кримським каналом в районі села Чорнянка Херсонської області (Лівобережжя) 28.07.2021р.(до підриву ГЕС), 30.07.2023р.(після підриву) та 03.08.2024р.(1 рік після підриву) (рис. 4.18).



Рисунок 4.18 – Супутникові знімки Sentinel-2 Північно-Кримського каналу в районі села Чорнянка Херсонської області: а) 27.07.2021р.;б) 30.07.2023р.; в)03.08.2024р.

За даними знімками можна простежити за змінами Північно-Кримського каналу, площа якого в межах цих знімків становить 8972м^2 (за результатом обрахунку в ArcGIS 10.04, рис. 4.19), в 2024 році канал повністю висох та немає джерела наповнення. Також, в межах ділянки дослідження можна побачити, що зрошувальні системи почали зникати.

Зникнення озера Чорнянка, що знаходиться в Каховському районі Херсонської області(Лівобережжя), з'явилося після будівництва Каховської ГЕС у 1950-х роках, тоді коли рівень підземних вод стрімко почав підвищуватися. Площа даного озера становила 10646 м^2 (за обрахунками в ArcGIS, рис. 4.20).

Таблиця				
Північно_Кримський канал				
FID	Shape *	Id	площа	
0	Полигон	0	8972	



Таблиця				
озеро				
FID	Shape *	Id	площа	
0	Полигон	0	10646	

а)

б)

Рисунок 4.19 –площа Північно-Кримського каналу за допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.04.2021

Рисунок 4.20 – Супутниковий знімок Sentinel-2 озера Чорнянка 28.07.2021р. (а); виміряна площа водного об'єкта в м^2 (б)

В результаті руйнування Каховської ГЕС в червні 2023 р. озеро Чорнянка висохло, адже воно було пов'язане зі зрошувальними системами, які отримували воду з Каховського водосховища (рис. 4.21).

Річка Оскіл Харківська область яка є важливою водною артерією в східній частині України, протікає через Харківську область. Під час ведення бойових дій на території цієї області річка Оскіл одержала стратегічне значення через своє географічне розташування і важливу роль для логістики та водопостачання (рис. 4.22).

Мости через річку були зруйновані або пошкоджені під час бойових дій, що ускладнювало пересування військ для звільнення територій.

Восени 2022 року під час контрнаступу відбулося успішне форсування річки Оскіл (місце форсування показано на супутниковому знімку). Довжина переправи сягала 44 м (рис. 4.23).



Рисунок 4.21 – Супутниковий знімок Sentinel-2 озера Чорнянка 03.08.2024р.



а)

Таблиця			
Водний об'єкт2021			
FID	Shape *	Id	площа
0	Полигон	0	16585

б)

Рисунок 4.22 – Супутниковий знімок Sentinel-2 річки Оскіл в Харківській області 27.07.2021 р. (а); виміряна площа водного об'єкту(б)

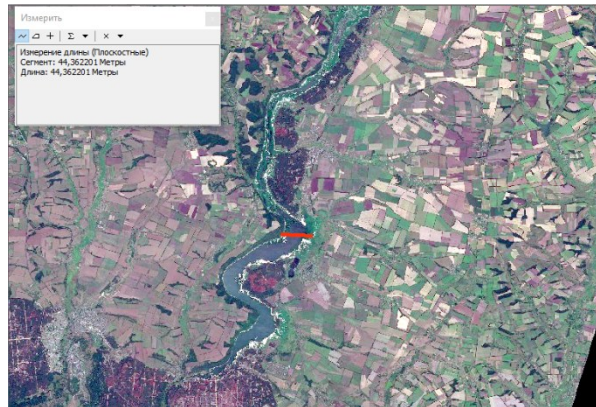
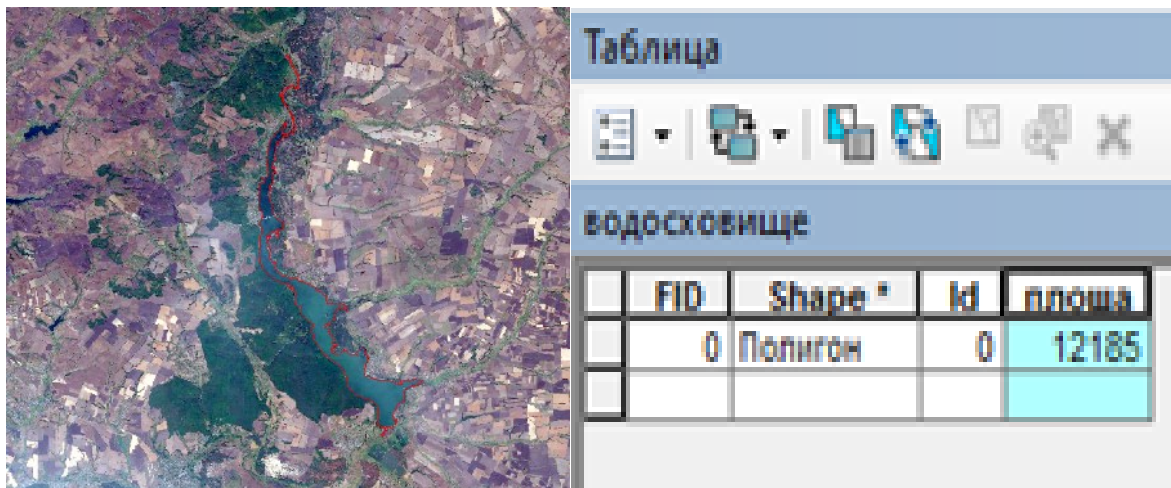


Рисунок 4.23 – Місце форсування річки Оскіл восени 2022 року на супутниковому знімку Sentinel-2

Відновлення контролю над річкою стало важливим чинником для подальшого просування на схід і звільнення тимчасово окупованих територій.

Печенізьке водосховище Харківська область – велике штучне водоймище на річці Сіверський Донець, розташоване в Харківській області України (рис. 4.24).



а)

б)

Рисунок 4.24 – Супутниковий знімок Sentinel-2 Печенізького водосховища в Харківській області 22.09.2024 р. (а); виміряна площа водного об'єкту(б)

Воно є важливим джерелом водопостачання для Харкова та навколишніх районів. Печенізьке водосховище також виконує екологічну, господарську та рекреаційну функції.

Під час бойових дій, які тривали у Харківській області в 2022 році, водосховище мало стратегічну роль. Контроль над ним забезпечує управління водопостачанням регіону, а також можливість використовувати водні ресурси для військових потреб. Руйнування або пошкодження дамби могло призвести до масштабних затоплень та втрати водопостачання для великих територій, адже неодноразово була спроба атак на даний водний об'єкт, але їх вдавалося відбити та зміцнювати захист споруди, проводячи ремонтні роботи. Також, оборона Печенізького водосховища є важливою у разі спроб російських військ окупувати Харків [96].

Підри́в мосту через Десну. У 2022 році річка Десна, як і інші стратегічні водні об'єкти України, відігравала важливу роль під час бойових дій, зокрема в контексті російського вторгнення (рис. 4.25).

У першій половині року, особливо під час активних бойових дій у Чернігівській та Сумській областях, Десна стала частиною оборонних заходів на півночі України. На цій ділянці річка Десна слугувала природним захисним рубежем між Сумською та Чернігівською областями. Природні особливості річки – широкі заплави, густі лісові масиви на її берегах – створювали складні умови для ворожого просування.

Важливими об'єктами в цьому регіоні були автодорожні та залізничні мости через Десну. Українські військові здійснювали інженерні роботи з підризу або пошкодження мостів для стримування ворожих військ, що змусило росіян шукати альтернативні маршрути, адже на даній ділянці форсування річки Десна неможливе за її природних особливостей (рис. 4.26).

Межа Сумської та Чернігівської областей стала важливим рубежем для оборони від російського наступу. Українські військові, використовуючи природні переваги рельєфу, зокрема річку Десну та підри́в мосту через неї, зуміли організувати ефективні захисні позиції.



Рисунок 4.25 – Супутниковий знімок Sentinel-2 річки Десна на межі Сумської та Чернігівської області 08.06.2022 р.

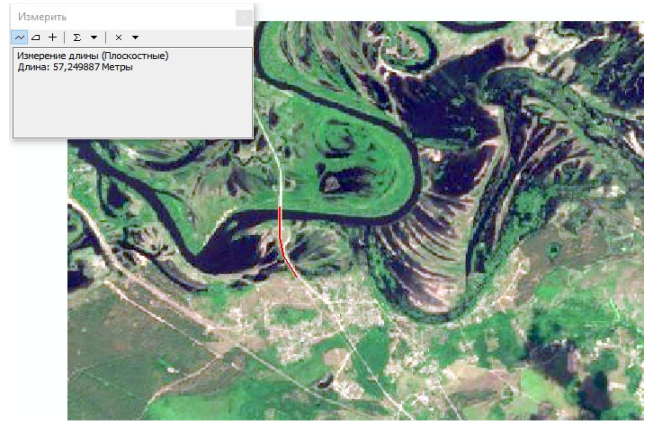


Рисунок 4.26 – Виміряна довжина мосту річки Десна на межі Сумської та Чернігівської області на супутниковий знімку Sentinel-2

Курахівське водосховище розташоване на річці Курахівка в Донецькій області України (рис. 4.27) і є важливим елементом гідрологічної системи регіону та виконує кілька функцій:

- забезпечення водою для сільського господарства;
- підтримку екологічного балансу;
- генерацію електроенергії (частково) [95].



Рисунок 4.27 – Супутниковий знімок Sentinel-2 Курахівського водосховища в Донецькій області 20.08.2024 р.

У зв'язку наступальними діями в Донецькій області, Курахівське водосховище може стати об'єктом оборони, адже саме воно забезпечує

водопостачання прилеглих територій і звідти відкривається шлях забезпечення військових підтримкою (рис. 4.28).

Вода та важкопрохідні території обмежують пересування ворога, що надає нашим військовим можливість створювати більш ефективні оборонні рубежі на берегах водосховища.

Площа водного об'єкту за розрахунками програмного забезпечення ArcGIS 10.04 становить 34 117 м² (рис. 4.29), що може стримувати просування ворога по самому водосховищу, також, підбрано правильні тактики та стратегія може зупинити ворога на даному напрямку.

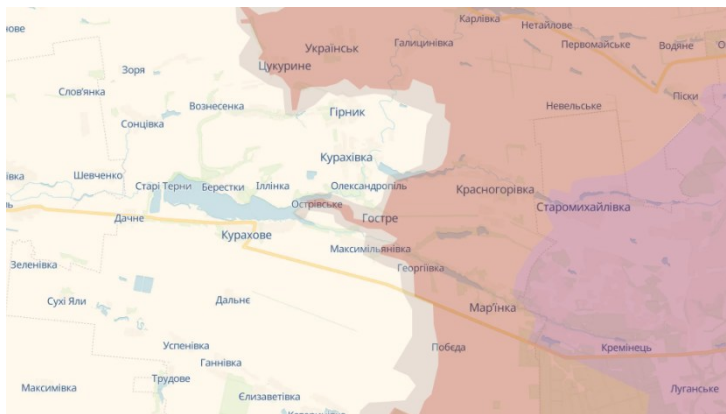


Рисунок 4.28 – Карта DeepStateMap з електронного ресурсу [91]

Таблиця			
Курахівське водосховище			
FID	Shape *	Id	площа
0	Полигон	0	34117

Рисунок 4.29 – Виміряна площа Курахівського водосховища в ArcGIS

4.3 Застосування геоінформаційних технологій для візуалізації та аналізу пошкоджень об'єктів територій внаслідок військових дій агресора

Застосування ГІТ для візуалізації та аналізу пошкоджень внаслідок військових дій агресора представлено на прикладі м. Луч Миколаївської області.

На початку повномасштабного вторгнення РФ в Україну, в місті Луч літаки РФ обстріляли житлові будинки, церкву ракетами на низькій висоті, незважаючи на те, що в цьому населеному пункті немає жодних військових частин, складів та об'єктів стратегічного значення. Тим не менше, агресор знищив тут майже всі ключові будівлі адміністративної інфраструктури та завдав суттєвої шкоди

житловому фонду. Внаслідок цього центральна вулиця міста перетворилася на руїни – знищені багатоповерхівки, дорожнє покриття, повалені дерева тощо.

За допомогою матеріалів ДЗЗ та програмного забезпечення ArcGis, ArcGis Pro, ArcScene, ArcGis Online та Pix4Dmapper створимо 3D модель місцевості. Це комплексне рішення, що складається з картографічної підложки (ортофоплану) та розміщених на ній 3D-моделей об'єктів та споруд з візуалізацією за допомогою програмного комплексу.

Ортофотоплани отримують за допомогою аерофотозйомки або зйомки з супутника. Враховуючи високу вартість супутникових знімків, ортофотоплани для генеральних планів міст і сіл набагато частіше створюються на основі даних, отриманих за допомогою легких або безпілотних літальних апаратів. Це найбільш дешевий, найшвидший і найпрактичніший метод топозйомки для населеного пункту, оскільки:

- використання БПЛА дозволяє швидко створити ортофотоплани для генерального плану міста чи села з потрібним масштабом та ступенем деталізації;
- обробка картографічних даних на комп'ютері, отриманих за допомогою БПЛА дає можливість мінімізувати можливі дефекти зображень для отримання максимально точної карти;
- невисока вартість експлуатації БПЛА зробила створення ортофотоплану для міста чи села недорогою послугою, яку можуть замовити навіть приватні особи.

Подання об'єктів в тривимірному вигляді дозволяє здійснювати просторові вимірювання відстані, об'єму, висоти та будуть відповідати сучасним вимогам щодо для створення архітектурних проєктів.

За допомогою програмного забезпечення Pix4Dmapper зробимо комплексну ортотрансформацію знімків з безпілотного дрона (рис. 4.30).

Далі обираємо шаблон параметрів обробки, як зображено на рис. 4.31, у нашому випадку це – 3D Maps.

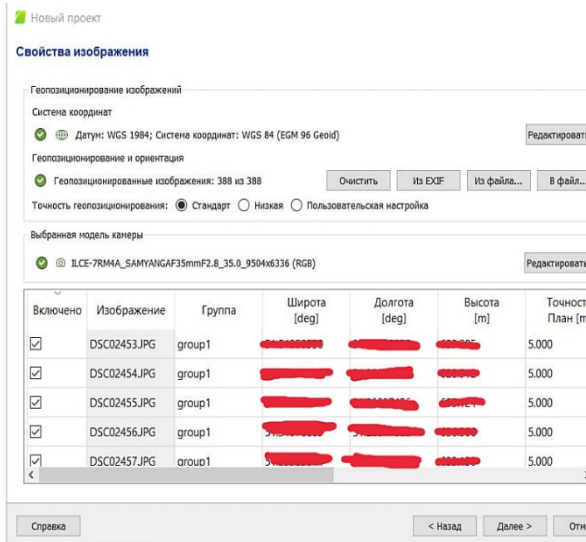


Рисунок 4.30 – Проверка
властивостей знімків

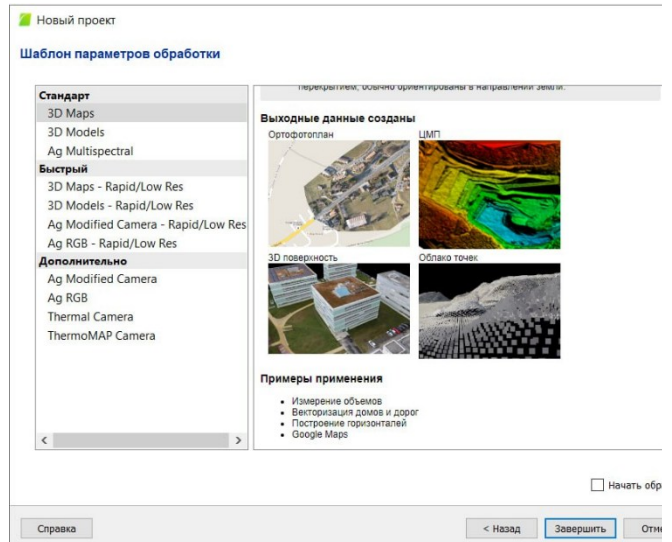


Рисунок 4.31 – Выбор шаблону
параметров обработки

Після створення проекту отримуємо карту (рис. 4.32).

Створення ортофотоплану в загальному випадку поділяється на три етапи:

- першочергова обробка;
- створення хмари точок та поверхні;
- створення ЦММ, ортофотоплану та індексів.

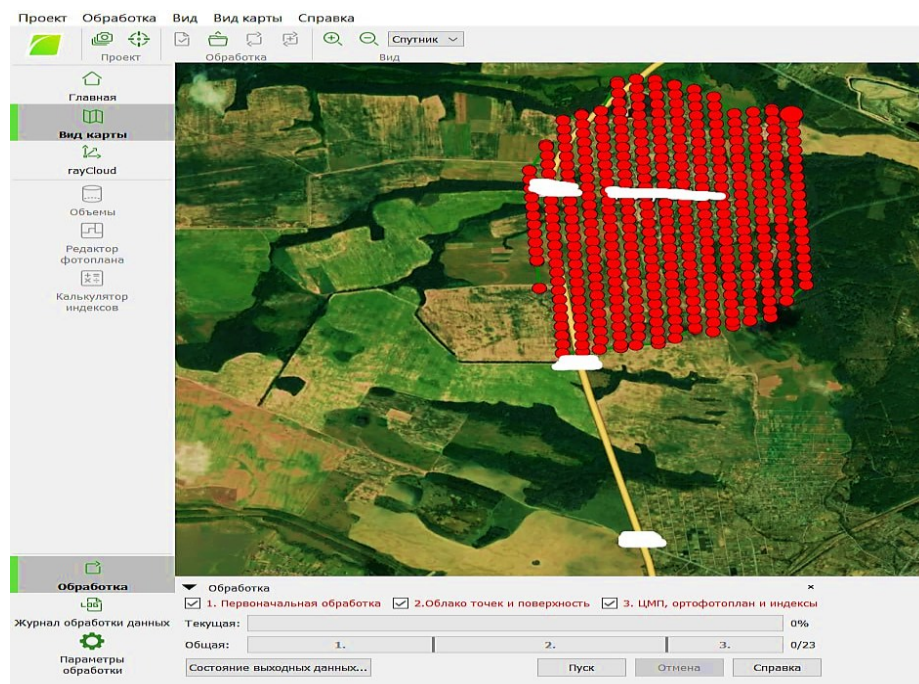


Рисунок 4.32 – Одержання карти

Для того щоб отримати тривимірну карту, необхідно перейти до вкладки візуалізації та навігації і відмітити потрібні нам шари (рис. 4.33).

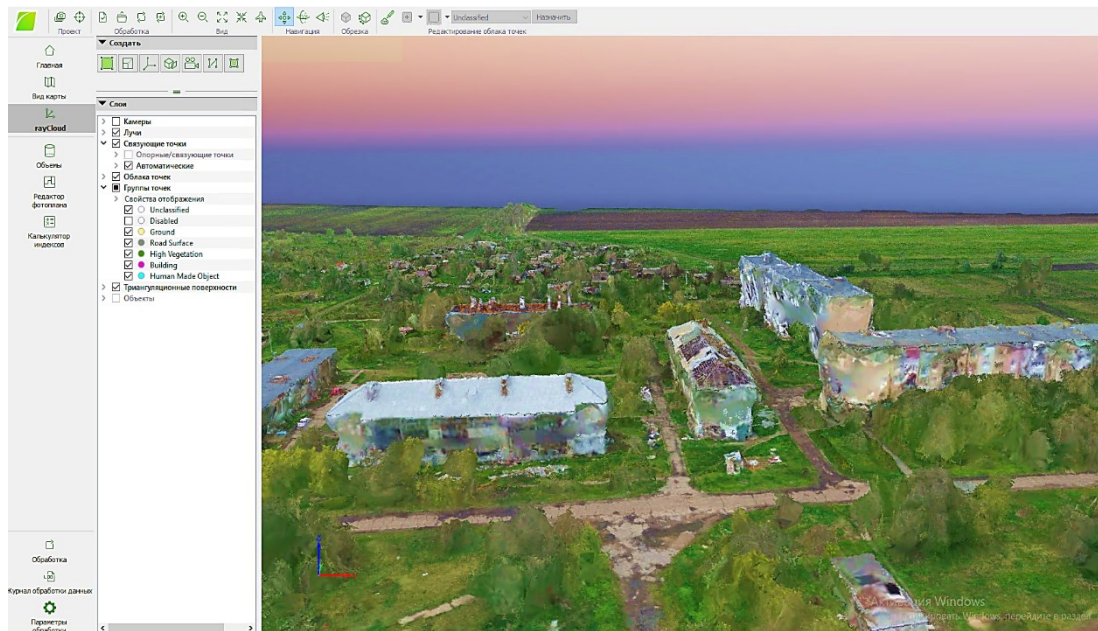


Рисунок 4.33 – Інтерпретація 3D ортофотоплану

За допомогою програмного забезпечення ArcScene відкриємо ортофотоплан для візуалізації 3D місцевості. Необхідно виконати згладження та триангуляцію поверхні (рис. 4.34).

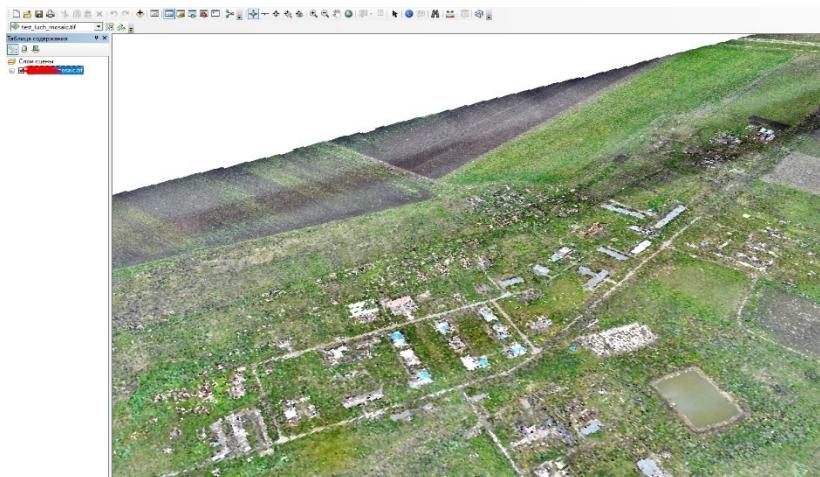


Рисунок 4.34 – Використання ортофотоплану програмним комплексом ArcGis

Розроблена процедура оброблення аерофотознімків із БПЛА та їх інтеграції в геоінформаційне середовище відповідає удосконаленій моделі геоінформаційної

підтримки прийняття рішень, яка реалізує адаптивний замкнений цикл «дані – аналіз – прогноз – уточнення даних».

Використання програмного комплексу Pix4Dmapper для побудови ортофотопланів та тривимірних моделей місцевості демонструє синергетичний ефект мультимодальної обробки інформації, що виникає при інтеграції даних дистанційного зондування Землі, матеріалів аерофотозйомки з БПЛА та геоінформаційних технологій. Такий підхід дозволяє підвищити точність просторового аналізу руйнувань та оперативність формування ситуаційної обізнаності.

Для подання ортофотоплану на публічній карті можна скористатися безкоштовним онлайн сервісом через веб-платформу ArcGIS Online. Приклад використання платформи для моніторингу та аналізу руйнувань на місцевості представлено на рис. 4.35.



Рисунок 4.35 – Відображення місцевості руйнування та пошкодження на місцевості

На жаль, доступ до платформи, де можна скористатися інструментами та побачити картину в цілому, на сьогодні не представляється можливим.

Вищезгадані системи сприяють оперативності в управлінні військовими діями, забезпечуючи достовірною, наочною та актуальною інформацією про пошкодження об'єктів для прийняття ефективних управлінських рішень на різних щаблях управління ЗС України.

4.4 Застосування геоінформаційних технологій для створення планів на відбудування руйнувань об'єктів населеного пункту

Для створення плану відбудування населеного пункту необхідно створити відцифровку будівель, за різним ступенем руйнації, а також створити тривимірну (3D) модель для більш точного аналізу та оцінки територій.

У більшості сучасних програм векторної графіки є вбудована можливість автоматичного трасування векторного зображення, але найчастіше кращим буде результат при ручному відмалюванні з підбором шрифтів. На думку автора, доцільно використовувати процес векторизації, незважаючи на його складність на відміну від растрезації, яка практично завжди може бути виконана повністю в автоматичному режимі [97].

Для цього потрібно правильно дешифрувати типи будівель, не виходити за межі споруд, коректно заповнювати базу атрибутів тощо (рис. 4.36, рис. 4.37).



Рисунок 4.36 – Процес векторизації ортофотоплану

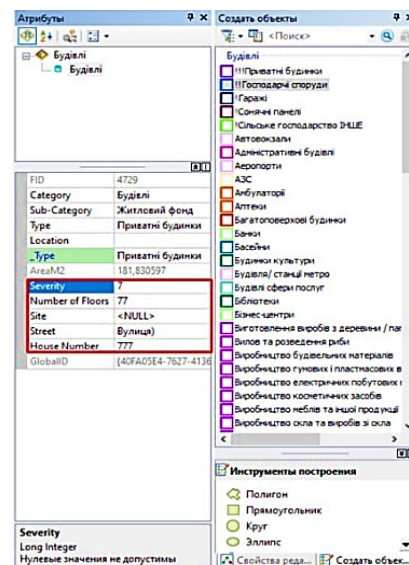


Рисунок 4.37 – Процес заповнення таблиці атрибутів

Процес векторизації будівель та формування атрибутивних таблиць (рис. 4.36, 4.37) реалізується відповідно до розроблених у дисертації алгоритмів оптимізації структури геоінформаційних систем, формуючи векторну геопросторову базу даних як ключовий елемент інфраструктури геопросторових даних у задачах відбудови територій.

Застосування таких алгоритмів дозволяє визначити раціональний склад компонентів геоінформаційної системи, зокрема структуру баз даних, тематичних шарів та аналітичних модулів, що забезпечує ефективну обробку геопросторових даних у задачах відбудови територій.

Певні категорії, такі як кількість поверхів, стан будівлі, назва вулиці та номер будинку, потребують ручного введення, тоді як інші категорії, такі як категорія, підкатегорія будівлі і її тип, автоматично вносяться залежно від обраного підшару, що був налаштований раніше. Інші дані для атрибутивної таблиці будуть додані в подальшому.

Далі необхідно виконати перевірку класів просторових об'єктів. Процес перевірки передбачає такі завдання:

- розбиття і кластеризацію вершин просторових об'єктів для пошуку об'єктів із загальними кордонами (з координатами, що збігаються);
- вставка загальних координат вершин для об'єктів із загальною геометрією;
- виконання набору перевірок цілісності, за допомогою якого визначаються порушення правил, заданих для топології, тобто необхідно перевірити об'єднання будівель, гострі кути споруд, мультиполігони, дуже маленькі об'єкти за площею та здійснити генералізацію круглих об'єктів.

Наступним кроком є відкриття проекту в середовищі ArcGIS Pro за допомогою інструменту «Геобробка» для експорту даних у формат .geojson (рис. 4.38). Отримані результати векторизації та тривимірної візуалізації об'єктів представлено на рис. 4.39.

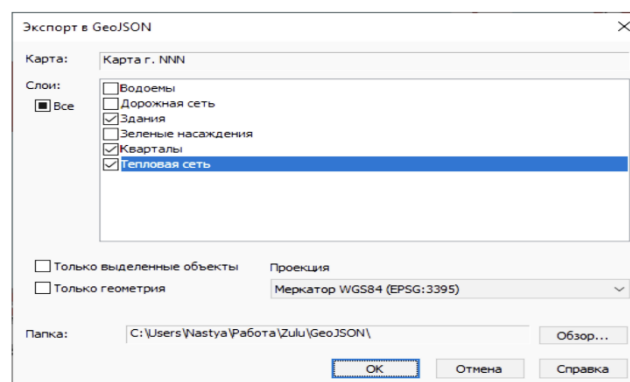


Рисунок 4.38 – Экспорт проекта в формате .geojson

Візуалізація руйнації дитячого садочка (рис. 4.40) є практичною апробацією запропонованого в дисертації алгоритму аналізу відеоданих з безпілотних літальних апаратів у режимі реального часу. Застосування цього алгоритму дозволяє забезпечити автоматизоване виявлення пошкоджених об'єктів та їх точну просторову прив'язку до електронної карти в геоінформаційному середовищі системи управління військами.

Інтеграція результатів обробки відеоданих БПЛА у геоінформаційну систему сприяє підвищенню рівня ситуаційної обізнаності органів управління та зменшенню часової складової невизначеності під час оцінювання стану об'єктів інфраструктури в умовах ведення бойових дій.



Рисунок 4.39 – Результат векторизації та 3D візуалізації об'єктів



Рисунок 4.40 – Інтерпретація 3D об'єкту зруйнованого дитячого садка

Отже, проведена практична апробація підтвердила ефективність застосування розроблених у дисертації моделей, методів та алгоритмів у задачах моніторингу територій бойових дій. Використання геоінформаційних технологій дозволило не лише зафіксувати наслідки руйнування критичних інфраструктурних об'єктів, зокрема Каховської гідроелектростанції та Антонівського мосту, але й перетворити розрізнені дані дистанційного зондування Землі на структурований інформаційний ресурс для аналізу оперативної обстановки.

Реалізований у межах дослідження комплексний підхід підтвердив можливість використання образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу, що забезпечує структуровану передачу та інтерпретацію просторово-часових даних для осіб, які приймають рішення. Кількісні розрахунки площ затоплення та обміління водойм, виконані на основі супутникових знімків Sentinel-2 та Landsat-8, стали емпіричним підтвердженням ефективності методу оцінювання приросту інформації, який базується на аналізі зменшення ентропії інформаційного середовища.

Поєднання геоінформаційних технологій та аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів, реалізоване у вигляді адаптивного замкненого циклу «дані – аналіз – прогноз», дозволило оперативно формувати ортофотоплани та тривимірні моделі зруйнованої інфраструктури. Це має важливе значення для оцінювання наслідків бойових дій та планування відбудови населених пунктів. Таким чином, результати, отримані у четвертому розділі, підтверджують, що впровадження запропонованих алгоритмів і моделей сприяє зменшенню часової складової невизначеності та підвищенню рівня ситуаційної обізнаності органів управління у динамічних умовах ведення бойових дій.

Висновки до четвертого розділу

1. Показано, що геоінформаційні системи є ефективним інструментом збору, аналізу та візуалізації геопросторових даних про обсяги і просторовий розподіл руйнувань, спричинених бойовими діями. Практичне застосування геоінформаційних порталів (на прикладі м. Миколаїв) підтверджує ефективність запропонованого методу оцінювання приросту інформації, що дозволяє кількісно визначати зменшення ентропії інформаційного середовища та підвищувати інформативність системи управління військами.

2. Встановлено, що розроблені карти територій бойових дій та окупованих територій України є практичною реалізацією образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу. Такий підхід забезпечує семантичне структурування та інтерпретацію просторово-часових даних для осіб, що приймають рішення, і дозволяє формалізувати інформаційні потоки у системі управління військами.

3. Показано, що комплексне використання даних дистанційного зондування Землі (Sentinel-2, Landsat 8) та геоінформаційних технологій дозволяє розв'язувати задачі просторового аналізу об'єктів критичної інфраструктури. За допомогою програмного комплексу ArcGIS визначено геометричні характеристики важливих інфраструктурних об'єктів (Антонівський міст — 85 м, міст Каховської ГЕС — 159,9 м) та площі водних перешкод (річка Дніпро — 29 897,3 м²), що має важливе значення для оцінювання можливостей маневру військ та подолання водних перешкод.

4. Аналіз наслідків руйнування Каховської гідроелектростанції, кваліфікованого як масштабна екологічна катастрофа техногенного характеру, продемонстрував можливості геоінформаційної підтримки прийняття рішень. Моделювання змін водної поверхні дозволило визначити площу затоплення (5,46 км²) та зафіксувати значне зменшення площі водного об'єкта (з 160 936,2 м² до 52 745,9 м²), а також висихання окремих ділянок Північно-Кримського каналу.

5. Доведено, що інтеграція даних дистанційного зондування Землі, матеріалів аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів та геоінформаційних технологій дозволяє реалізувати адаптивний цикл підтримки прийняття рішень

«дані – аналіз – прогноз». Побудова ортофотопланів і тривимірних моделей місцевості (на прикладі м. Луч) підтвердила синергетичний ефект мультимодальної обробки геопросторових даних, що підвищує точність просторового аналізу та оперативність формування ситуаційної обізнаності.

6. Встановлено, що процес векторизації об'єктів та формування атрибутивних баз даних для планування відбудови населених пунктів реалізується відповідно до запропонованих алгоритмів оптимізації структури геоінформаційних систем. Це забезпечує формування раціональної структури геопросторових баз даних і тематичних шарів для ефективної обробки інформації у задачах відновлення інфраструктури.

7. Практична апробація алгоритму аналізу відеоданих з БПЛА в реальному часі підтвердила можливість автоматизованого виявлення пошкоджених об'єктів та їх точної просторової прив'язки до електронної карти. Це дозволяє істотно зменшити часову складову невизначеності під час оцінювання стану об'єктів інфраструктури в умовах ведення бойових дій та підвищує ефективність інформаційного забезпечення системи управління військами.

Висновки

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності інформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень у геоінформаційних системах військового призначення шляхом розроблення моделей, методів та алгоритмів обробки просторово-часових даних.

1. Розроблено образно-знакову модель електронної карти як інформаційного каналу, що забезпечує формалізовану передачу просторово-часових даних у системі управління військами. На відміну від традиційного використання електронних карт як засобу візуалізації, запропонований підхід дозволяє розглядати карту як інформаційний канал, який забезпечує семантичне структурування даних та їх інтеграцію у процес прийняття управлінських рішень.

2. Запропоновано та математично обґрунтовано метод оцінювання приросту інформації в геоінформаційних системах військового призначення, який базується на аналізі зменшення ентропії інформаційного середовища. Встановлено, що використання спеціалізованих ГІС військового призначення дозволяє зменшити інформаційну невизначеність на 35–45 %, що забезпечує підвищення інформативності системи управління військами в середньому на 40 %.

3. Отримали подальший розвиток функціонально-статистичні моделі та алгоритми оптимізації структури геоінформаційних систем, які дозволяють формувати динамічно адаптовану архітектуру ГІС залежно від інтенсивності інформаційних потоків і стохастичного характеру бойових дій. Це забезпечує підвищення ефективності обробки та інтеграції геопросторових даних у системах підтримки прийняття рішень.

4. Удосконалено модель геоінформаційної підтримки прийняття рішень, яка реалізує адаптивний замкнений цикл «дані – аналіз – прогноз – рекомендація». Запропонована модель базується на представленні території бойових дій у вигляді багатовимірного вектору стану та забезпечує інтеграцію різнорідних джерел інформації (даних дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів, сенсорних систем) у єдине цифрове середовище оперативної обстановки.

5. Розроблено інтелектуальні алгоритми обробки просторово-часових даних, зокрема алгоритм аналізу відео з безпілотних літальних апаратів у реальному часі на базі архітектури YOLOv8. Визначено оптимальні параметри детекції ($\tau = 0,7$), що забезпечують автоматизоване виявлення об'єктів противника та їх просторову прив'язку до електронної карти, скорочуючи тривалість розвідувального циклу та підвищуючи рівень ситуаційної обізнаності.

6. Доведено ефективність застосування технологій Big Data та методів машинного навчання для аналізу і прогнозування бойової обстановки. Використання алгоритмів кластеризації DBSCAN та методів ансамблевого навчання Random Forest дозволяє автоматизовано виявляти зони підвищеної активності бойових дій, формувати прогнозні карти небезпечних територій та визначати оптимальні маршрути евакуації.

7. Практична апробація запропонованих моделей, методів та алгоритмів на прикладах аналізу руйнувань Антонівського мосту та Каховської гідроелектростанції підтвердила їх адекватність і ефективність. Показано, що використання мультимодальних даних дистанційного зондування Землі, аерофотозйомки з БПЛА та геоінформаційних технологій дозволяє з високою точністю визначати параметри об'єктів, оцінювати масштаби руйнувань та аналізувати динаміку змін в зоні бойових дій.

Реалізація запропонованих моделей, методів і алгоритмів геоінформаційного забезпечення систем підтримки прийняття рішень дозволяє підвищити ефективність інформаційного забезпечення органів військового управління, зменшити часову складову невизначеності під час оцінювання обстановки та сприяє досягненню інформаційної переваги Збройних Сил України в умовах сучасних високодинамічних бойових дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бовда Е. М. Особливості систем управління тактичної ланки країн НАТО. 2016.
2. Воробйов О. М. Сучасний етап автоматизації управління в країнах НАТО // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2022 р.
3. Бурачек В. Г. Геоінформаційна підтримка прийняття рішень : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2011.
4. Варакута І. О. Мережецентричні автоматизовані системи управління в сучасних бойових умовах // Наука і оборона. 2023. № 1. С. 34–40.
5. Бортник К. Я., Ольшевський О. В., Кирилюк А. Л. Методи побудови алгоритмів машинного навчання. 2017.
6. Біляєва Є. І. Глибоке навчання: особливості та інструменти. 2023.
7. Дерлоу Д. Ключові управлінські рішення: технологія прийняття рішень. Київ : Наук. думка, 2001. 242 с.
8. Дехтяр А. Системний підхід до прийняття державно-управлінських рішень // Вісн. Нац. ун-ту внутр. справ. 2002. Вип. 20. С. 192–196.
9. U.S. Department of Defense. *Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Architecture Framework*. Washington (DC), 1997.
10. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. *Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority*. Washington (DC): CCRP, 1999.
11. Department of the Army. *Field Manual FM 6-0: Commander and Staff Organization and Operations*. Washington (DC), 2014.
12. Defense Information Systems Agency. *Global Command and Control System–Joint (GCCS-J)*. Washington (DC), 2020.
13. Бовда Е. М. Автоматизована система управління військами Збройних сил США // Зб. доповідей та тез VII НТП. Київ, 2014. С. 11–15.
14. NATO Standardization Office. *AJP-3.2 Allied Joint Doctrine for Land Operations*. Brussels, 2016.

15. Microsoft. *Digital Transformation in Government*. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/industry/government> (дата звернення: 27.02.2023).
16. Як створювали систему управління військом «Дзвін-АС» // DOU.ua. 2021. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/developing-dzvin-control-system-for-army/> (дата звернення: 25.02.2023).
17. Дружинін С. В., Климович О. К., Саєнко О. Г. Сучасний стан автоматизації управління в Збройних Силах України // Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 1 (21). С. 60–62.
18. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 травня 2016 року «Про Стратегічний оборонний бюлетень України» : Указ Президента України № 240/2016 від 6 червня 2016 р.
19. Про Стратегію воєнної безпеки України : Указ Президента України № 121/2021 від 25 березня 2021 р.
20. Автоматизація за наказом. Космічна розвідка // Defence-ua. 2021. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/avtomatizatsija_za_nakazom-239.html (дата звернення: 12.03.2023).
21. Концепція галузевих програм створення ЄАСУ ЗСУ на період до 2020 року : затв. Міністром оборони України від 12.05.2018 р.
22. Морозов А. О., Косс В. А. Управління розробкою Єдиної АСУ Збройних Сил // *Mathematical Machines and Systems*. 2007. № 2. С. 1–11.
23. ISO/IEC/IEEE 29148:2018 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering. 2018. 105 p.
24. Беляченко В. В. та ін. Обґрунтування функціональних вимог до програмної компоненти системи управління життєвим циклом автоматизованих систем у ЗСУ // Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ. 2021. № 2(72). С. 97–106.
25. Пропозиції щодо формування вимог до програмної компоненти системи управління ЖЦ АСУ. 2020.
26. Визначення технологічних рішень щодо створення системи управління ЖЦ АСУ. 2019.

27. Кірпічніков Ю. А. Проблеми інформатизації та створення єдиного інформаційного простору Збройних Сил України. 2017.
28. AJP-06(A). Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems. NATO Standard.
29. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 Системна та програмна інженерія. Процеси життєвого циклу систем.
30. ДСТУ ISO/IEC 12207:2018 Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу програмного забезпечення.
31. ДСТУ ISO/IEC TR 16326:2015 Системна та програмна інженерія. Настанови щодо управління проектами.
32. STANAG 4107:2018 NATO Quality Assurance Requirements for Design, Development and Production. Ed. 10 / AQAP-2110.
33. STANAG 4107:2019 NATO Policy on an Integrated Systems Approach to Quality through the Life Cycle. Ed. 11 / AQAP-2000.
34. STANAG 2190. NATO Interoperability of Intelligence and Reconnaissance Systems.
35. STANAG 2191. Intelligence Reports.
36. STANAG 4728. System Life Cycle Management.
37. STANAG 6514. Cyber Security Operations. NATO Standard.
38. AJP-2. Allied Joint Doctrine for Intelligence, Counter-Intelligence and Security.
39. AJP-2.1. Allied Joint Doctrine for Intelligence Procedures.
40. AJP-3.20. Allied Joint Doctrine for Cyberspace Operations.
41. AAP-20. NATO Programme Management Framework.
42. AAP-48. NATO System Life Cycle Management.
43. AQAP-160. NATO Integrated Quality Requirements for Software throughout the Life Cycle.
44. AQAP-169. Guidance on the use of AQAP-160.
45. Поліщук Л. І., Багуцький С. М. Значення і вплив системи зв'язку на ефективність управління військами та зброєю // VII НТК. Київ, 2014. С. 42–46.

46. Стужук П. І. та ін. Світові тенденції створення автоматизованих систем управління військами // Збірник наукових праць ЦВСД. 2012. № 1 (45). С. 68–76.
47. Лучук В. В. Особливості побудови ієрархічних систем управління у військових застосуваннях. 2014.
48. Ткаченко І. О., Кравченко В. В. Точність і швидкість інформації як фактор успішності управління військами. 2024.
49. Кучеренко Ю. Ф. Мережецентричні модель управління в сучасних конфліктах. 2024.
50. Руснак І. С. Формування єдиного інформаційного простору сил оборони. 2024.
51. Зацерковний В. І. ДЗЗ. Фізичні основи : навч. посіб. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. 380 с.
52. Esri. GIS for National Security and Defence. Official Data. 2024. URL: <https://www.esri.com/> (дата звернення: 03.04.2024).
53. Литвиненко Н. І. Рекомендації щодо створення та впровадження геоінформаційної системи Сухопутних військ ЗСУ // Системи обробки інформації. 2015. Вип. 8 (133). С. 73–76.
54. Shannon C. E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
55. Cover T. M., Thomas J. A. *Elements of Information Theory*. 2nd ed. New York: Wiley, 2006.
56. Бялий М. О. Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення // Технічні науки та технології. Чернігів, 2024. № 3 (37). С. 132–142.
57. Бялий М. О., Савков П. А. Образно-знакова модель карти як «інформаційного каналу» // Технічні науки та технології. Чернігів, 2025. № 4 (42). С. 169–175.
58. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. *Geographic Information Systems and Science*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2015.

59. Burrough P. A., McDonnell R. A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
60. Кравців С. С. та ін. Картографія : навчальний посібник. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. 191 с.
61. Зацерковний В. І. та ін. Оптимізація геоінформаційних систем для задач моніторингу акустичного забруднення // Наукоємні технології. 2016. № 4 (32). С. 425–433.
62. Бялий М. О., Пампуха І. В. Аналіз підходів щодо пошуку оптимальної структури ГІС ВП // Технічні науки та технології. Чернігів, 2025. № 4 (42). С. 132–142.
63. Roberts J. B., Spanos P. D. *Random Vibration and Statistical Linearization*. New York: Dover Publications, 2003.
64. Кушлик-Дивульська О. І. та ін. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 212 с.
65. Штіфзон О. Й., Новіков П. В. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 98 с.
66. Gelb A., Vander Velde W. E. *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design*. New York: McGraw-Hill, 1968.
67. Pugachev V. S. *Theory of Random Functions and Its Applications to Control Problems*. Oxford: Pergamon Press, 1965.
68. Malczewski J. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: Wiley, 1999.
69. Розвідка за знімками ICEYE // Wing.com.ua. 2024. URL: <https://www.wing.com.ua/content/view/36243/91/> (дата звернення: 16.08.2024).
70. Google Maps. 23-й арсеналу ГРАУ. Супутникові знімки. URL: <https://www.google.com/maps> (дата звернення: 25.07.2025).
71. Згортьова нейронна мережа — просте пояснення CNN та її застосування // Evergreens. 2019. URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/cnn.html> (дата звернення: 13.09.2025).
72. Шеремет О.І., Запорожець В.С. Застосування рекурентних нейронних мереж для машинного рерайту // Науковий вісник ДДМА. 2018. № 1 (25Е). С. 62–68.

73. Long Short-Term Memory // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/13853244_Long_Short-Term_Memory (дата звернення: 17.08.2024).
74. Bao F. et al. Heat-assisted detection and ranging (HADAR) // Nature. 2023. Vol. 619. pp. 743–748.
75. Maxar Technologies. Satellite Imagery of Military Convoy. URL: <https://www.maxar.com/> (дата звернення: 09.05.2023).
76. Bayraktar TB2 strike analysis // The Spectator. 2022. URL: <https://www.spectator.co.uk/> (дата звернення: 28.11.2022).
77. MQ-9 Reaper drone in Ukraine // The New York Times. 2023. URL: <https://www.nytimes.com/> (дата звернення: 07.03.2023).
78. MQ-9 Reaper UAV characteristics // Designation-Systems. URL: <http://www.designation-systems.net/> (дата звернення: 07.03.2023).
79. FPV Drones in Ukraine // Army Recognition. 2023. URL: <https://armyrecognition.com/> (дата звернення: 07.03.2023).
80. Shahed and Lancet Drones analysis // Molfar. 2023. URL: <https://molfar.com/> (дата звернення: 07.03.2023).
81. Technological innovation in UAVs // Media.inti.asia. 2024. URL: <https://media.inti.asia/> (дата звернення: 04.08.2024).
82. YOLOv8: Real-Time Object Detection Models // Github Ultralytics. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата звернення: 22.07.2023).
83. Eldho Thomas та ін. Big Data and its Role in Military Operations. 2022. URL: <https://www.ijnrd.org/> (дата звернення: 16.11.2022).
84. Future Now. Що таке Big Data (великі дані). 2021. URL: <https://futurenow.com.ua/> (дата звернення: 11.01.2025).
85. Kott A. та ін. Cyber Resilience for the Internet of Things and Big Data Analytics. Springer, 2019.
86. Приймак І. В., Сидоренко О. М. Використання супутникових знімків в умовах військових конфліктів // Геоінформаційні технології та ДЗЗ. 2022. 10(2).

87. NATO Communications and Information Agency. *Big Data Analytics in Military Operations*. Brussels, 2021.
88. Маценко О. В. Використання технологій Big Data у військовій справі // Збірник наукових праць ВІКНУ. 2021. 74(1). С. 112–121.
89. Геопортал м. Миколаїв. Моніторинг пошкоджень та руйнувань. URL: <http://mykolayiv.local.softpro.ua> (дата звернення: 26.03.2025).
90. Міністерство з питань реінтеграції. Перелік територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. 2024. URL: <https://minre.gov.ua/> (дата звернення: 02.09.2025).
91. DeepStateMap. War in Ukraine. 2024–2025. URL: <https://deepstatemap.live/> (дата звернення: 14.09.2025).
92. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 Data Access. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 23.08.2025).
93. U.S. Geological Survey. Landsat Data Access. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-data-access> (дата звернення: 10.09.2025).
94. Укргідроенерго. Каховська ГЕС: що ми втратили. 2023. URL: <https://uhe.gov.ua/> (дата звернення: 05.09.2025).
95. Курахівське водосховище / Ю. О. Кисельов // Енциклопедія Сучасної України. 2016. URL: <https://esu.com.ua/> (дата звернення: 12.09.2025).
96. Окупанти намагалися зруйнувати дамбу Печенізького водосховища // Факти. 2022. URL: <https://fakty.com.ua/> (дата звернення: 06.10.2025).
97. ESRI. *Vector Data in GIS*. URL: <https://www.esri.com/> (дата звернення: 18.10.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А

Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових фахових виданнях України:
(які входять до переліку МОН України)*

4. М.О. Бялий. «Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка», Чернігів 2024, випуск №3(37) с. 132-142. DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142

5. М.О. Бялий, І.В. Пампуха. «Аналіз підходів щодо пошуку оптимальної структури геоінформаційної системи військового призначення», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка, Чернігів 2026, випуск №4(42) с. 277-285. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-618-626](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-618-626)

6. М.О. Бялий, П.А. Савков. «Образно-знакова модель карти як «інформаційного каналу»», «Науковий журнал технічні науки та технології національного університету Чернігівська політехніка», Чернігів 2025, випуск №4(42) с. 169-175. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-169-175](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-169-175)

Відомості про апробацію дослідження:

3. XIX Міжнародна науково-практична конференція «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», м. Київ, 10 листопада 2023 року (доповідь: «Геоінформаційні системи військового призначення як засіб підвищення бойової ефективності Збройних Сил України»).

4. Всеукраїнська науково-практична конференції молодих вчених, ад'юнктів, слухачів, курсантів і студентів «Молодіжна військова наука у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка», м. Київ, 27 квітня 2023 року (доповідь: «Інформаційна складова ГІС військового призначення»).

Акт впровадження результатів роботи
Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
Інституту прикладних систем
управління Національної академії
наук України



Олег Копійка

2026 року

АКТ

про реалізацію результатів дисертаційної роботи здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії БЯЛОГО Миколи Олеговича на тему: «Моделі, методи інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем військового призначення»

Комісія у складі: голови комісії - заступника директора з наукової роботи, доктора технічних наук Єгорова Віктора Богдановича, та членів комісії – провідного наукового співробітника, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Сємко Віктора Володимировича, вченого секретаря, доктора філософії Стрижак Алли Євгенівни, склала цей акт про те, що наукові результати, які отримані та запропоновані Бялим Миколою Олеговичем у дисертаційному дослідженні, а саме:

- образно-знакова модель карти як інформаційного каналу для геоінформаційних систем військового призначення;
- метод оцінювання приросту інформації, що отримується за рахунок впровадження ГІС військового призначення у систему управління військами;
- алгоритми пошуку оптимальної структури ГІС військового призначення для систем управління військами.

Використані під час виконання роботи «Розроблення інформаційної платформи для інтеграції інформаційно-комунікаційних систем Збройних сил України».

Голова комісії
д.т.н.

Члени комісії:
д.т.н., доцент

доктор філософії

Віктор ЄГОРОВ

Віктор СЕМКО

Алла СТРИЖАК

Акт впровадження результатів роботи
115-го картографічного центру (військова частина А3796)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Командир військової частини А3796
Полковник

Олександр МАТЮЩЕНКО
"20" "05" 2026 року



АКТ

про реалізацію результатів дисертаційної роботи здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії БЯЛОГО Миколи Олеговича на тему:
«Моделі, методи інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для геоінформаційних систем військового призначення»

Комісія у складі: голови комісії – тимчасово виконуючої обов'язки заступника командира частини - головного технолога підполковника Пустової Любові Григорівни, та членів комісії: начальника відділу обробки та аналізу інформації підполковника Зикова Олександра Миколайовича, тимчасово виконуючого обов'язки начальника відділу застосування геоінформаційних систем майора Музичина Олександра Вікторовича склала цей акт про те, що наукові результати, які отримані та запропоновані Бялим Миколою Олеговичем у дисертаційному дослідженні, а саме:

- образно-знакова модель карти як інформаційного каналу для геоінформаційних систем військового призначення;
- метод оцінювання приросту інформації, що отримується за рахунок впровадження ГІС військового призначення у систему управління військами;

використані під час розробки проекту опису Інформаційно-комунікаційної системи «Геоінформаційна система Міністерства оборони України».

Голова комісії
підполковник



Любов ПУСТОВА

Члени комісії:
підполковник



Олександр ЗИКОВ

майор



Олександр МУЗИЧИН