

УДК 004.8:528

ІННОВАЦІЙНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВОЇ КАРТОГРАФІЇ

І. М. Лях, М. П. Кляп, Я. О. Чухрай, М. М. Садварі

*Ужгородський національний університет, факультет інформаційних технологій,
пл. Народна, 3, Ужгород, 88000, Україна*

В основі формування інноваційної архітектурної моделі цифрової картографії з інтеграцією штучного інтелекту лежить багаторівневий підхід, що включає збір і обробку геопросторових даних, їх глибокий аналіз за допомогою нейронних мереж та когнітивну інтерпретацію з візуалізацією у доповненій реальності. Перший рівень передбачає агрегування інформації з різних джерел, її нормалізацію й сегментацію з використанням алгоритмів машинного навчання. Другий рівень концентрується на глибинному аналізі даних за допомогою зорткових нейронних мереж (CNN), що забезпечують автоматичне виявлення та класифікацію об'єктів. Третій рівень зосереджений на когнітивній обробці результатів і створенні інтуїтивних графічних шарів, де застосовуються технології доповненої реальності для підвищення зручності користувача і функціональності картографічних продуктів.

Концептуально інноваційна модель базується на взаємодії між рівнями, яка детально відображена у схематичному зображенні, і дає можливість системі бути високопродуктивною у широкому спектрі задач – від моніторингу довкілля та управління міською територією до реагування у надзвичайних ситуаціях. Такий підхід вирізняється мобільністю, масштабованістю та здатністю до самонавчання, що створює умови для створення сучасних інтелектуальних картографічних платформ, здатних оперативно реагувати на зміни і підтримувати прийняття обґрунтованих рішень на різних рівнях управління. Окрім того, інтеграція інтелектуальних технологій у цифрову картографію забезпечує покращення якості просторових даних через автоматизовані процеси виявлення і корекції помилок, що позитивно впливає на достовірність і точність картографічних продуктів. Це створює передумови для їх широкого використання в різноманітних наукових та прикладних сферах, таких як екологія, урбаністика, транспорт і безпека.

Ключові слова: *цифрова картографія, ШІ, CNN, когнітивна інтерпретація, доповнена реальність.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку геоінформаційних технологій і нарощування обсягів просторових даних гостро постає проблема забезпечення їх ефективної обробки, аналізу та візуалізації. Традиційні методи цифрової картографії, які базуються переважно на ручному або напівавтоматичному

опрацюванні географічної інформації, втрачають свою актуальність у зв'язку з масштабом та складністю сучасних даних. Зростає потреба у впровадженні інтелектуальних технологій, здатних автоматизувати процеси обробки та забезпечити гнучку адаптацію до постійно змінних умов.

Застосування штучного інтелекту в цифровій картографії відкриває нові перспективи для інтеграції алгоритмів глибинного машинного навчання з класичними геоаналітичними методами. Проте, існують суттєві виклики, пов'язані з необхідністю розробки багаторівневих інтелектуальних систем, які здатні не лише ефективно агрегувати та аналізувати великі обсяги різнорідних геоданих, але й генерувати інтуїтивно зрозумілі візуалізації, що відповідають сучасним вимогам користувачів. Ця проблема потребує системного підходу до розробки архітектурних моделей, які будуть адаптивними, масштабованими та забезпечують високу точність і достовірність картографічної інформації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні роки ознаменувалися стрімкою трансформацією картографії, що поступово переходить від цифрових до інтелектуальних методів роботи з просторовими даними [1]. Тенденції розвитку зосереджуються на інтеграції штучного інтелекту в усі етапи картографічного процесу – від збору та аналізу даних до генерації картографічного зображення і його адаптації до потреб користувача [2]. У цьому контексті формується нова наукова парадигма, відома як «інтелектуальна картографія» або «GeoAI», у межах якої машинне навчання та глибокі нейронні мережі поєднуються з класичними принципами просторового моделювання та візуалізації [3].

Узагальнення сучасних методологічних підходів свідчить, що найбільшого поширення набули алгоритми глибокого навчання, генеративні нейромережі, графові моделі та підходи на основі знань. Вони дозволяють автоматизувати процес розпізнавання об'єктів на супутникових знімках, створення тематичних шарів, картографічне узагальнення, а також синтез художніх стилів карт [4]. Застосування подібних методів уможливорює оптимізацію складних процедур і підвищує точність отриманих результатів, але водночас породжує нові виклики, пов'язані з інтерпретацією машинних рішень і контролем якості автоматично створеного контенту.

Зростання ролі штучного інтелекту в освітньому процесі картографії та геоінформатики також набуває помітного значення. У вітчизняному контексті відзначається активне впровадження інтелектуальних систем у підготовку майбутніх фахівців [5]. Дослідження показують, що поєднання мультимодальних навчальних середовищ, здатних працювати з растровими, текстовими та числовими даними, створює умови для формування нових компетентностей. При цьому особлива увага приділяється розвитку критичного мислення, умінню оцінювати похибки й адекватно тлумачити результати роботи автоматизованих систем, що формує у фахівця здатність діяти не лише як користувач, а й як контролер машинних процесів.

З історичної перспективи простежується логічна еволюція – від паперової до цифрової, а далі до інтелектуальної картографії. Розвиток технологій поступово змінює роль картографа, який з виконавця перетворюється на аналітика й системного дизайнера. Попри це, фундаментальні засади дисципліни залишаються незмінними:

зберігається важливість композиції, читабельності, точності та узгодженості відображення простору. Штучний інтелект лише розширює межі застосування цих принципів, надаючи нові засоби їх реалізації у динамічних цифрових середовищах.

Поряд із технічними досягненнями активно обговорюються етичні та правові аспекти впровадження інтелектуальних технологій. У центрі уваги перебувають питання прозорості алгоритмів, захисту приватності, відповідальності за помилки автоматичних систем і проблеми упередженості даних. Вирішення цих питань вимагає створення нормативної бази, що передбачатиме документування походження даних, забезпечення пояснюваності рішень і запровадження моделей взаємодії «людина в контурі». Такі підходи дають змогу зберегти баланс між ефективністю автоматизації та етичними нормами професійної діяльності.

Прикладні дослідження демонструють високий потенціал інтелектуальних систем у картографічній практиці. Використання моделей типу YOLO для розпізнавання об'єктів, генеративних нейромереж для стилізації карт чи модульних фреймворків для автоматичного створення шарів із супутникових зображень свідчить про значне скорочення часу виробництва карт і підвищення якості кінцевого результату. Водночас наголошується на необхідності ретельної перевірки точності, оскільки будь-яке автоматичне рішення має бути підкріплене експертною оцінкою.

Серед актуальних напрямів подальших досліджень визначається потреба у стандартизації критеріїв оцінювання карт, створених за допомогою штучного інтелекту, у розробленні пояснюваних моделей для картографічних процесів, у вдосконаленні методів боротьби з упередженістю даних та у формуванні навчальних програм, орієнтованих на інтеграцію інтелектуальних інструментів у професійну підготовку. Такий підхід дозволяє створити цілісну систему, у якій машинні методи не замінюють фахівця, а стають продовженням його аналітичних можливостей.

Підсумовуючи сучасний стан наукових досліджень, можна стверджувати, що інтеграція штучного інтелекту в цифрову картографію є не просто технологічною тенденцією, а закономірним етапом розвитку геопросторової науки. Вона сприяє появі нових форм представлення простору, підвищує ефективність аналітичних процесів і водночас вимагає глибшого осмислення етичних, методологічних та освітніх засад, без яких інтелектуальна картографія не зможе стати зрілою науковою дисципліною.

Мета статті. Метою дослідження є розробити та теоретично обґрунтувати інноваційну архітектурну модель цифрової картографії з інтеграцією сучасних технологій штучного інтелекту. Акцент робиться на формуванні багаторівневої системи обробки геопросторових даних, що охоплює агрегування, нейромережевий глибинний аналіз та когнітивну інтерпретацію результатів із використанням доповненої реальності для підвищення точності, ефективності й гнучкості прийняття рішень у геоаналітичних дослідженнях і практичних застосуваннях.

Вклад основного матеріалу дослідження. Підґрунтям застосування штучного інтелекту в сучасній цифровій картографії є комплекс інтегрованих аналітичних підходів, що включають попередню обробку географічних даних, нейронну класифікацію просторової інформації та багаторівневу когнітивну інтерпретацію

картографічних результатів. Особливу увагу приділено алгоритмам згорткових нейронних мереж, які забезпечують високоефективну сегментацію супутникових знімків, що є передумовою для автоматизації побудови цифрових карт об'єктів місцевості. В академічному контексті підкреслюється значущість поєднання автоматизованих інструментів аналізу з класичними методами геоінформаційного моделювання, оскільки взаємодія між нейронними контурами та традиційними структурованими базами даних підвищує точність і валідність отриманих результатів.

У сучасних наукових студіях детально аналізуються переваги застосування таких платформ, як: Google Earth Engine, ArcGIS AI, TensorFlow та QGIS з інтегрованими модулями машинного навчання [6-9]. Дослідницькі й інженерні задачі вирішуються за допомогою спеціалізованих бібліотек та шин даних, що дозволяють автоматизувати моніторинг територій, міських агломерацій і природних комплексів шляхом глибокого аналізу геоспціальних даних. Кожен з інструментів має свою область застосування: Google Earth Engine орієнтований на масове оброблення багатоспектральних супутникових знімків, що особливо корисно для моніторингу екосистем; ArcGIS AI використовується для професійної геоаналітики з можливістю розпізнавання окремих типів об'єктів міської інфраструктури; TensorFlow дозволяє гнучко будувати та навчати глибокі нейронні мережі для класифікації земних поверхонь і урбаністичних структур; QGIS підтримує вбудовані Python-плагіни для швидкої інтеграції алгоритмів кластеризації та регресійного аналізу у відкритих геоінформаційних процесах.

Таблиця 1

Характеристика основних інструментів ШІ для цифрової картографії

Інструмент	Основне призначення	Модулі ШІ	Типові сценарії використання
Google Earth Engine	Масштабований аналіз супутникових даних	TensorFlow API	Моніторинг лісових площ, динаміки NDVI
ArcGIS AI	Професійна ГІС-інтерпретація	Deep Learning, Raster AI	Виявлення міської інфраструктури
TensorFlow + Keras	Глибоке навчання (CNN, GAN, U-Net)	Згорткові мережі	Автосегментація супутникових знімків
QGIS + AI plugins	Відкрита ГІС з Python-інтеграцією	PyTorch, Scikit-learn	Прогнозування змін рослинності

Розробка інноваційної архітектурної моделі для цифрової картографії з інтеграцією штучного інтелекту базується на багаторівневому підході, що поєднує збір та попередню обробку геоданих, інтелектуальний нейромережевий аналіз і когнітивну інтерпретацію результатів з візуалізацією у доповненій реальності [10].

На першому рівні відбувається агрегування геопросторових даних із різних джерел, яке включає нормалізацію та сегментацію інформації з використанням методів машинного навчання [11].

Другий рівень забезпечує глибинний аналіз цих даних за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN), що здійснюють автоматизоване виявлення й класифікацію характерних ознак картографічної інформації [12].

Третій рівень відповідає за когнітивний аналіз і інтегровану візуалізацію, де отримані результати обробляються в інтуїтивно зрозумілі графічні шари з застосуванням доповненої реальності для покращення сприйняття та функціональності картографічних продуктів [13].

Кінцевим результатом є побудова цифрових картографічних шарів і їх інтеграція у єдине візуалізаційне середовище, що забезпечує високу точність і гнучкість у геоаналітичних дослідженнях та практичних застосуваннях. Структура взаємодії між рівнями опрацювання даних представлена у вигляді схеми, яка зображена на рисунку 1, де кожен етап процесу чітко розмежований відповідно до профілю аналітичного і візуалізаційного навантаження в системі.



Рис. 1 Інноваційна модель для цифрової картографії

Архітектура запропонованої інноваційної моделі для цифрової картографії базується на концепції багаторівневої інтелектуальної системи, що інтегрує сучасні технології штучного інтелекту, геоінформаційні бази даних та динамічні візуалізаційні модулі.

На рівні агрегації геоданих розміщується модуль збору і попередньої обробки геоданих, отриманих із відкритих джерел, таких як: супутникові знімки, краудсорсингові сервіси та сенсорні мережі. Цей рівень забезпечує нормалізацію, сегментацію і підготовку даних за допомогою нейронних мереж, що поєднують елементи згорткового аналізу та автоматичного виділення ознак. Важливою характеристикою є застосування алгоритмів глибокого навчання, наприклад, CNN, для виділення специфічних об'єктів і структур у просторі.

Наступний рівень – інтелектуальний аналіз – базується на моделях глибинного навчання та когнітивної обробки. Тут застосовуються нейронні мережі для класифікації та виявлення закономірностей у великих масивах геоданих. Результатом роботи є формування окремих картографічних шарів, що окремо й у поєднанні відображають процеси та об'єкти досліджуваної території [14].

На найвищому – когнітивному – рівні здійснюється інтеграція отриманих у попередніх рівнях даних у багатовимірні візуалізовані продукти. Використовуються сучасні методи інтерактивної та доповненої реальності для створення орієнтованих користувачу карт, що включають не тільки традиційні зображення, а й багатовимірні об'ємні моделі, що в реальному часі піддаються аналізу й коригуванню.

Перехід від концептуальної частини опису архітектури до формального математичного моделювання дозволяє детальніше розкрити механізми обробки та аналізу геопросторових даних у рамках інноваційної моделі. Математичний формалізм дає змогу не тільки визначити функціональні залежності між різними рівнями моделі, але й оптимізувати параметри для досягнення високої точності та адаптивності у процесі цифрового картографування.

Математичне формалізування інтегрованої моделі штучного інтелекту для цифрової картографії здійснюється за допомогою композиції функцій обробки, представлених рівняннями виду:

$$M(x, y, t) = f_s(G(x, y, t)) + f_n(I(x, y)) + f_c(V), \quad (1)$$

де $G(x, y, t)$ – просторово-часовий розподіл геоданих, f_s – спектральний аналіз зображень, f_n – нейронне перетворення просторових ознак $I(x, y)$, $f_c(V)$ – когнітивна оцінка візуалізації на основі вагових коефіцієнтів V [15].

Як приклад, для задачі сегментації картографічних даних використовується операція згортки:

$$O_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{i+m,j+n} \cdot K_{m,n} + b, \quad (2)$$

де $K_{m,n}$ – ядро згортки, b – константа зсуву, а $O_{i,j}$ – отриманий фрагмент ознак, що передається до наступного шару глибокої моделі.

Параметри моделі оптимізуються шляхом мінімізації функції втрат:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3)$$

де y_i – істинні значення, \hat{y}_i – передбачені інтелектуальною системою.

Наступним важливим напрямом розвитку цифрової картографії з інтеграцією штучного інтелекту є глибший аналіз потенційних можливостей майбутніх досліджень, які дозволять розширити межі сучасних моделей та удосконалити їх функціонал. Зокрема, поступове накопичення великих обсягів геопросторових даних у поєднанні з удосконаленням алгоритмів глибинного навчання може забезпечити більш комплексне розуміння просторово-часових процесів – від динаміки природних екосистем до соціоекономічних змін в урбанізованому середовищі.

Одним із перспективних напрямів є інтеграція адаптивних моделей на базі нейромереж із можливістю автономного коригування своїх параметрів у реальному часі. Це дозволить системам не лише підлаштовуватись під змінні умови збирання даних (наприклад, зміни освітленості чи сезонності), але й прогнозувати критичні точки зміни, що має велике значення для екологічного моніторингу та управління територіями.

Крім того, розвиток когнітивних компонентів у моделі відкриває важливі перспективи щодо розширення інтерпретативних можливостей картографічних

продуктів. Майбутні дослідження можуть показати, що за допомогою штучного інтелекту можливо вбудувати модельну логіку оцінки ризиків та рекомендаційних систем, які будуть допомагати приймати ефективні рішення в масштабах регіонального планування або надзвичайних ситуацій.

Варто також зауважити, що подальша інтеграція з системами доповненої та віртуальної реальності сприятиме формуванню нових парадигм у представленні та використанні просторової інформації, що так само підвищить її доступність і функціональність для широкого кола користувачів з різних галузей.

Узагальнюючи, рекомендацією для майбутніх досліджень є акцент на розвиток адаптивних, самонавчальних систем, синтез яких дозволить створити картографічні рішення нового покоління, які здатні не лише відтворювати реальний стан об'єктів простору, а й формувати прогнози та управляти складними динамічними процесами.

Для ілюстрації потенційних напрямків застосування інноваційних технологій у цифровій картографії представлено порівняльну таблицю 2.

Таблиця 2

Сфери застосування інноваційних технологій у цифровій картографії

Сфера застосування	Основні можливості	Очікувані результати
Екологічний моніторинг	Реальний час, прогнозні моделі	Підвищена точність виявлення змін, підтримка сталого управління
Урбаністичне планування	Аналіз великих даних, моделювання розвитку	Оптимізація просторової організації, зниження ризиків урбанізації
Надзвичайні ситуації	Інтелектуальний аналіз ризиків	Швидке реагування, зниження наслідків катастроф
Навчання та підвищення кваліфікації	Інтерактивні візуалізації, адаптивні курси	Підвищення компетентності фахівців, краща підготовка спеціалістів

У перспективі, поєднання цих напрямів в одній інтегрованій архітектурі відкриває широкі можливості для розвитку цифрової картографії як науки і практики, що робить її потужним інструментом у багатьох міждисциплінарних середовищах.

Висновки. За результатами дослідження підтверджується, що інтеграція штучного інтелекту в цифрову картографію відкриває нові горизонти для розвитку геоінформаційних систем. Впровадження глибокого машинного навчання, когнітивних підходів та технологій доповненої реальності забезпечує високу точність, ефективність і гнучкість в обробці та аналізі геопросторових даних. Цей комплексний підхід суттєво розширює функціональні можливості картографічних платформ, розглядаючи картографа не лише як виконавця, а як аналітика і системного дизайнера.

Подальші дослідження мають зосереджуватись на розвитку адаптивних, самонавчальних систем з високим рівнем автономії, що зможуть більш ефективно

опрацьовувати великі масиви даних із мінливими характеристиками. Важливим напрямом стане удосконалення моделей пояснюваності і контролю якості автоматично сформованої інформації. Акцент також варто робити на етичних аспектах, підвищенні прозорості алгоритмів та забезпеченні балансування між автоматизацією і роллю людини в процесі обробки даних.

Перспективи цифрової картографії, що засновані на штучному інтелекті, включають створення інтегрованих систем, які комбінують аналітику, просторове моделювання та адаптивні візуалізації з доповненою реальністю. Це відкриває широкі можливості для міждисциплінарного застосування – від екологічного моніторингу до планування міст і управління надзвичайними ситуаціями. Впровадження таких систем сприятиме підвищенню якості геоаналітичних досліджень і ефективності прийняття рішень у різних сферах діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang J. Cartography: From digital to intelligent. *Geomatics and information science of Wuhan university*. 2022. Т. 47, № 12. С. 1963–1977. DOI: 10.13203/j.whugis20220780.
2. Kang Y., Gao S., Roth R. E. Artificial intelligence studies in cartography: a review and synthesis of methods, applications, and ethics. *Cartography and Geographic Information Science*. 2024. Т. 51, № 4. С. 599–630. DOI: 10.1080/15230406.2023.2295943.
3. Yonov N. Map of Tomorrow: How AI is Transforming Modern Cartography. In: *9th International Conference on Cartography and GIS*. 2024. Т. 20. С. 52.
4. Cramer N. C. From paper maps to artificial intelligence: a historical analysis of cartography and geospatial science. 2025.
5. Дудун Т., Бондаренко Е. Застосування систем штучного інтелекту у підготовці фахівців з картографії та геоінформатики в Україні. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2025. Т. 106, № 2. С. 192–210. DOI: 10.33407/itlt.v106i2.6008.
6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Т. 202. С. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
7. ESRI. Unlocking GeoAI: Smarter spatial analysis with ArcGIS. ESRI Resource Hub. 2024. URL: <https://resource.esriuk.com/blog/geoai-smarter-spatial-analysis-with-arcgis/>.
8. TensorFlow. TensorFlow. TensorFlow API Documentation. 2024. URL: <https://www.tensorflow.org>.
9. Machine Learning for QGIS - Machine Learning for Image Classification in QGIS. *QGIS Plugins*. URL: <https://plugins.qgis.org/plugins/ml4qgis/>.
10. He D., Si X. Image processing design and algorithm research based on cloud computing. *Journal of Sensors*. 2021. С. 1–10. DOI: 10.1155/2021/9198884.
11. Baig M. M. J., Wang Y. L., Chung S. H., Stepanyants A. Normalized level set model for segmentation of low-contrast objects in 2- and 3-dimensional images. *bioRxiv : the preprint server for biology*. 2024. 2024.01.12.574651. DOI: 10.1101/2024.01.12.574651.
12. Brownlee J. Crash course in convolutional neural networks for deep learning. Machine Learning Mastery. 2022. URL: <https://machinelearningmastery.com/crash-course-convolutional-neural-networks/>.

13. Jamil F., Kashif A., Alharbi O., Zafar S., Aljaedi A., Qasaymeh Y. Cognitive Analysis of Neural Networks using Fractional Metric Dimension and Applications. *IEEE Access*. 2024. DOI: 10.1109/access.2024.3370472.
14. ESRI. How to cite ArcGIS maps and data. *Resource Hub*. 2023. URL: <https://resources.esri.ca/education-and-research/how-to-cite-arcgis-maps-and-data>.
15. Tan K. S., Lam C. K., Tan W. C., Ooi H. S., Lim Z. H. A review of image processing and quantification analysis for solid oxide fuel cell. *Energy and AI*. 2024. T. 16. DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100354.

REFERENCES

1. Wang, J. (2022). Cartography: From digital to intelligent. *Geomatics and information science of Wuhan university*, 47(12), 1963-1977. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220780>.
2. Kang, Y., Gao, S., & Roth, R. E. (2024). Artificial intelligence studies in cartography: a review and synthesis of methods, applications, and ethics. *Cartography and Geographic Information Science*, 51(4), 599-630. <https://doi.org/10.1080/15230406.2023.2295943>.
3. Yonov, N. (2024). Map of Tomorrow: How AI is Transforming Modern Cartography. In *9th International Conference on Cartography and GIS*, 20, 52.
4. Cramer, N. C. (2025). From paper maps to artificial intelligence: a historical analysis of cartography and geospatial science.
5. Dudun, T. & Bondarenko E. (2025). Zastosuvannya system shtuchnoho intelektu u pidhotovtsi fakhivtsiv z kartohrafiyi ta heoinformatyky v Ukraini, *Informatsiyni tekhnolohiyi i zasoby navchannya*, 106(2), 192-210. <https://doi.org/10.33407/itlt.v106i2.6008> (in Ukrainian).
6. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
7. ESRI. (2024). Unlocking GeoAI: Smarter spatial analysis with ArcGIS. *ESRI Resource Hub*. <https://resource.esriuk.com/blog/geoai-smarter-spatial-analysis-with-arcgis/>.
8. TensorFlow. (2024). TensorFlow. *TensorFlow API Documentation*. <https://www.tensorflow.org>.
9. Machine Learning for QGIS - Machine Learning for Image Classification in QGIS. (n. d.). *QGIS Plugins*. <https://plugins.qgis.org/plugins/ml4qgis/>.
10. He, D., & Si, X. (2021). Image processing design and algorithm research based on cloud computing. *Journal of Sensors*, 2021 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/9198884>.
11. Baig, M. M. J., Wang, Y. L., Chung, S. H., & Stepanyants, A. (2024). Normalized level set model for segmentation of low-contrast objects in 2- and 3- dimensional images. *bioRxiv : the preprint server for biology*, 2024.01.12.574651. <https://doi.org/10.1101/2024.01.12.574651>.
12. Brownlee, J. (2022). Crash course in convolutional neural networks for deep learning. *Machine Learning Mastery*. <https://machinelearningmastery.com/crash-course-convolutional-neural-networks/>.
13. Jamil, F., Kashif, A., Alharbi, O., Zafar, S., Aljaedi, A., & Qasaymeh, Y. (2024). Cognitive Analysis of Neural Networks using Fractional Metric Dimension and Applications. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3370472>.
14. ESRI. (2023). How to cite ArcGIS maps and data. Resource Hub. <https://resources.esri.ca/education-and-research/how-to-cite-arcgis-maps-and-data>.

15. Tan, K. S., Lam, C. K., Tan, W. C., Ooi, H. S., & Lim, Z. H. (2024). A review of image processing and quantification analysis for solid oxide fuel cell. *Energy and AI*, 16, 100354. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100354>.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-54-63

AN INNOVATIVE MODEL FOR THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF DIGITAL CARTOGRAPHY

I. M. Liakh, M. P. Klyap, Ya. O. Chukhrai, M. M. Sadvari

*Uzhhorod National University, Faculty of Information Technology,
3 Narodna Square, Uzhhorod, 88000, Ukraine*

The formation of an innovative architectural model of digital cartography integrating artificial intelligence is based on a multi-level approach that includes the collection and processing of geospatial data, their in-depth analysis through neural networks, and cognitive interpretation with visualisation in augmented reality. The first level involves the aggregation of information from various sources, its normalisation, and segmentation using machine learning algorithms. The second level focuses on deep data analysis employing convolutional neural networks (CNNs), which enable the automatic detection and classification of objects. The third level is dedicated to the cognitive processing of results and the creation of intuitive graphical layers, where augmented reality technologies are applied to enhance user convenience and the functionality of cartographic products.

Conceptually, the innovative model is grounded in the interaction between the levels, as illustrated in the schematic representation, which enables the system to achieve high performance across a wide range of tasks – from environmental monitoring and urban management to emergency response. This approach is characterised by mobility, scalability, and self-learning capability, creating the foundation for the development of advanced intelligent cartographic platforms capable of promptly responding to changes and supporting informed decision-making at various levels of governance. Furthermore, the integration of intelligent technologies into digital cartography enhances the quality of spatial data through automated processes of error detection and correction, thereby improving the reliability and accuracy of cartographic products. This establishes favourable conditions for their extensive application across diverse scientific and practical domains, including ecology, urban studies, transport, and security.

Keywords: *Digital cartography, AI, CNN, Cognitive interpretation, Augmented reality.*

Стаття надійшла до редакції 23.09.2025.

Received 23.09.2025.