

С. ДАНШИНА, С. АНДРЕЄВ

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ РОЗУМНОГО МІСТА З ОГЛЯДУ НА ДИНАМІКУ ЗМІН МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

Мета роботи – підвищення ґрунтовності оцінок для формування рішень з інтелектуалізації міста на основі аналізу змін міської забудови. У статті розв’язано такі **завдання**: розглянуто тенденції розвитку концепцій *Smart City*; проаналізовано вимоги до розумних міст і запропоновано теоретико-множинну модель розумного міста; подальшого розвитку набув метод аналізу міської забудови за дистанційними даними, експериментально підтверджено можливість його використання. Упроваджено **методи** системного аналізу, теорії множин і глибокого навчання. **Досягнуті результати**. Створення зручного міського середовища сприяє економічному зростанню, покращує якість життя та забезпечує сталий розвиток, що можливо завдяки впровадженню концепції розумного міста. Для уніфікації кроків зі створення розумних міст запропоновано теоретико-множинну модель розумного міста, яка відповідно до вимог стандартів серії ISO 37100 поєднує показники, що забезпечують реалізацію певних напрямів інтелектуалізації. Вибір напрямку інтелектуалізації має ґрунтуватися на вивченні проблем урбанізації. Складність цього питання потребує вдосконалення процесів аналізу міської забудови, наприклад, з використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Для отримання оцінок, придатних для подальшого аналізу та формування рішень, розроблено метод аналізу міської забудови за даними ДЗЗ, що використовує глибоке навчання в обробленні структурованої інформації за допомогою інструменту *Image Analyst ArcGIS Pro 3.4*. Розроблено схему алгоритму отримання моделі *Deep Learning* для дешифрування об’єктів міської забудови, запропоновано її програмну реалізацію. Дослідження можливостей розробленого методу відбувалося в процесі розв’язання завдань актуалізації інформації про міську забудову Києва. Модель *Deep Learning* добре розпізнає об’єкти міської забудови та має добру пристосованість до об’єктів, що різняться від об’єктів навчальної вибірки. **Висновки**. Вибір напрямку інтелектуалізації має ґрунтуватися на ретельному вивченні ситуації, що виникла внаслідок урбанізації міських районів. Експериментальний аналіз динаміки змін міської забудови району м. Києва за період 2005–2021 рр. показав: збільшення кількості об’єктів житлової (на 5,4%) та комерційної забудови (на 11%), нехтування розвитком соціальної інфраструктури, нерозбудову транспортної інфраструктури, ігнорування питань озеленення території району тощо. Досягнуті результати можуть бути корисними у формуванні пріоритетних способів упровадження інтелектуальних рішень у повсякденне життя містян.

Ключові слова: теоретико-множинна модель; дистанційне зондування; глибоке навчання; актуалізація даних; напрямки інтелектуалізації міста.

Вступ

Феномен урбанізації впливає на спосіб життя людей, стимулює їхню міграцію до міських районів із сільської місцевості. Ці зміни активізують комерційний розвиток, кооперацію та економічне зростання. Водночас швидке збільшення міст загострює наявні проблеми та призводить до нових, створюючи значні складності науково-технічної та соціально-економічної спрямованості, вимагаючи від влади впровадження нових способів забезпечення безпеки громадян і покращення якості їхнього життя [1]. У цих умовах упровадження концепції *Smart City* (розумного міста) суттєво впливає на міський розвиток і планування: під тиском збільшення кількості населення за наявних обмежених ресурсів її спрямовано на підвищення стійкості міст, розвиток якісних громадських послуг і задоволення потреб мешканців [2, 3].

Розумне місто – це концепція, що використовує інформаційно-комунікаційні технології з метою підвищення ефективності функціонування та використання міських ресурсів відповідно до потреб його мешканців у забезпеченні належної якості життя в умовах прагнення до міської стійкості. Моделі *Smart City* розробляють для виконання найактуальніших завдань, що постають перед міськими районами: покращення інфраструктури та боротьба із заторами, забезпечення мобільності мешканців і підвищення адекватності громадських послуг, розвиток системи поводження з відходами та протидія засміченню територій, керування енергоспоживанням і розв’язання енергетичних питань тощо [3, 4].

Результативність подібних моделей та ефективність подолання зазначених проблем у міському середовищі щорічно оцінює *World Competitiveness Center* – Центр світової

конкурентоспроможності (<https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/>), який формує рейтинг міст за *Smart City Index*, зосереджуючи увагу на економічних, технологічних аспектах і "гуманних вимірах", реалізованих у моделях (якість життя, навколишнє середовище та інклюзивність), узгоджуючи їх зі стратегіями керування містами всього світу. Цей індекс поєднує результати аналізу статистичних показників щодо рівня охорони здоров'я, безпеки та мобільності, перспектив розвитку й зростання міст із результатами опитування мешканців, які оцінюють упровадження розумних технологій у місті. У підсумку отримують щорічний рейтинг, який станом на 2024 р. містив відомості щодо 142 найбільш технологічних міст усього світу [5]. Тут лідерами визнано столиці країн Північної Європи та Австралії, також рейтинг *Smart City* очолили азіатські мегаполіси.

Поєднання *Smart City Index* з *Global Competitiveness Index* – рейтингом країн світу за показником економічної конкурентоспроможності,

що традиційно визначає здатність країн світу забезпечувати стабільні темпи економічного зростання (за показниками Всесвітнього економічного форуму) [6], демонструє, що майже 22% найбільш технологічних міст світу розташовані в країнах з найбільшою конкурентоспроможністю національних економік (серед країн з населенням понад 20 млн). У цьому разі сильна додатна кореляція (з коефіцієнтом кореляції $r \approx 0,87$) між світовим рейтингом конкурентоспроможності країни та кількістю міст у країні з найбільшою інтеграцією в повсякденне життя високих технологій і смарт-рішень (рис. 1) свідчить про те, що сучасну конкурентоспроможність економік країни не можна оцінювати лише за економічними показниками (ВВП або продуктивністю). Політичні, соціальні та культурні показники набувають суттєвого значення, і, отже, уряди країн мають створювати зручне міське середовище з ефективною інфраструктурою, соціальними інститутами, екологією та інклюзивною політикою, які зможуть забезпечити стійкий розвиток міст і країн загалом.

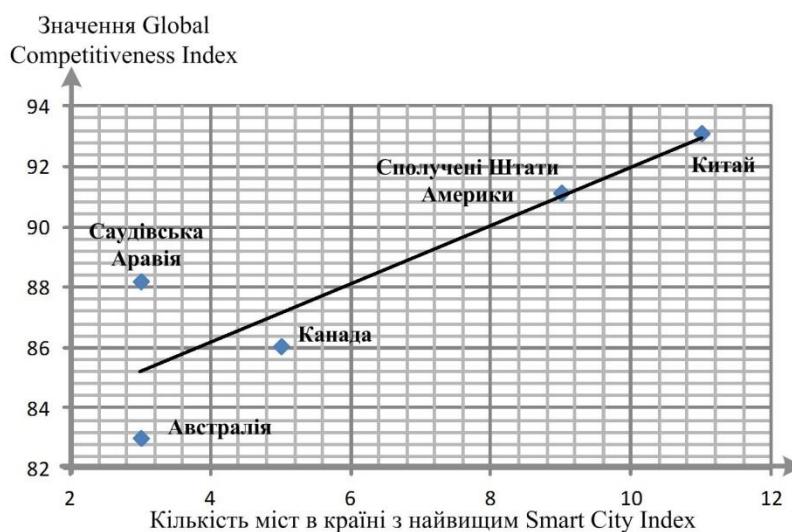


Рис. 1. Діаграма розсіювання, що демонструє статистичний взаємозв'язок між світовим рейтингом конкурентоспроможності країни та кількістю міст у країні з найбільшою інтеграцією в повсякденне життя громадян високих технологій і смарт-рішень

Дослідники зазначають, що 90% міст у всьому світі не мають офіційної стратегії розумного розвитку, віддаючи перевагу впровадженню корпоративних технологій без осмислення соціальних цілей, яким мають слугувати моделі *Smart City*. Як наслідок, питання розумної урбанізації стають найбільш актуальною темою наукової спільноти [5, 7, 8].

Аналіз проблеми та наявних методів

Стійкість міст невід'ємно пов'язана з цілями Стратегії сталого розвитку. Урбанізація змінює навколишнє середовище, значно покращує умови життя громадян, забезпечуючи незалежність та економічне зростання. Однак вона ж стає причиною багатьох проблем (крім погіршення стану довкілля, збільшується кількість викидів парникових газів,

забруднюються ґрунти та вода, зростають нерівність і міська бідність тощо), які внаслідок прискорення урбанізації, ймовірно, не лише погіршать якість життя мешканців, а й спричинять значні складнощі для майбутньої стійкості міст. Крім цього, сучасна практика міського розвитку й управління не спроможна загальмувати ці загрозливі наслідки нестійкої урбанізації: розширення багатьох міст спрямовано на досягнення короткострокової, а не тривалої вигоди, що унеможливорює підвищення якості життя міського населення в довгостроковій перспективі [9, 10].

Стійкий розвиток залежить від балансу економічного, соціального й екологічного складників. Міста – це складні системи, на які впливають зростання населення, транспортна інфраструктура, ринкова поведінка, земельна політика уряду, екологічні процеси. Це призводить до нелінійного розвитку міст: зазначені фактори взаємопов'язані, а причинно-наслідкові зв'язки стають засобом інтеграції економічних, соціальних і екологічних підсистем. Коли кінцевою метою є соціальна стійкість, економічна підсистема має забезпечувати необхідну підтримку, а екологічна – стати її основою. Крім цього, всі три підсистеми мають розвиватися одночасно. Саме розуміння окреслених проблем сприяло стрімкому розвитку технологій розумного міста, пік якого спостерігався з 2015 до 2021 рр., коли кількість міст, що ефективно впроваджували в муніципальну систему управління ці технології, збільшилася майже вдвічі – з 70 до 138 [5, 8, 9]. Але вже зараз спостерігається сповільнення темпів поширення моделей *Smart City*, хоча, за оцінками

фахівців, нині та в найближчому майбутньому альтернативи їм немає: їх визнано результативним інструментом покращення життя, розв'язання проблем з ресурсами, оптимізації інфраструктури для забезпечення стійкого та якісного проживання в умовах урбанізації [7–9]. Ці обставини вимагають вивчення суперечливого характеру розвитку розумних міст, їх всебічного дослідження та систематизації властивостей [8, 10].

Бібліографічний пошук за ключовою фразою "*Smart City*" у базі даних *Sciencedirect* (<https://www.sciencedirect.com>) показує, що близько сотні нових публікацій за 2024 р. (рис. 2) спрямовано на дослідження:

- взаємозв'язків між впровадженням моделей розумного міста й ефективністю досягнення цілей сталого розвитку (наприклад, роботи [8, 11], всього 23% від проаналізованих досліджень);
- можливостей *Smart City* та їх подальшої інтеграції до систем управління міським середовищем (наприклад, роботи [12, 13], всього 21% від проаналізованих досліджень);
- наявного досвіду реалізацій моделей розумного міста, його узагальнення, типізацію та тиражування (наприклад, роботи [3, 7], всього 16% від проаналізованих досліджень);
- питань залучення мешканців і громад у проекти розумного міста та поширення ідей *Smart City* серед населення (наприклад, роботи [1, 14], всього 15% від проаналізованих досліджень);
- проблем конфіденційності та безпеки даних у смарт-рішеннях (наприклад, роботи [2, 10], всього 16% від проаналізованих досліджень) тощо.



Рис. 2. Розподіл публікацій 2024 р. за проблемними питаннями *Smart City*

Зауважимо, що значна кількість розглянутих публікацій безпосередньо є результатом узагальнення досвіду впровадження моделей *Smart City*, містить тематичний огляд літератури, поєднаний з опитуванням експертів і зацікавлених сторін (наприклад, роботи [3, 7, 8 та ін.]), що доводить ґрунтовність отриманих висновків і пильну увагу до цього питання.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми

Отже, досвід упровадження моделей *Smart City* показує поки локальний вплив на умови життя містян [4, 7], їх спрямовано на розв'язання окремих проблем [15], вони зазвичай не зважають на динаміку зміни міського середовища [9], суттєво залежать від прийнятої практики керування містом і політичної культури управління не лише містом, але й країною [13], потребують соціальної підтримки, роз'яснення та залучення громадськості [16], а також постійного застосування передових інноваційних технологій і методів [11, 17]. Також у значній кількості моделей не береться до уваги просторовий складник міського середовища, структура розселення, доступна інфраструктура або наявний потенціал міських ресурсів [3, 10]. Усе це призводить до ускладнень, коли порівнюють моделі *Smart City* (особливо їх технічний складник), а також коли оцінюють ці моделі, визначають рівень інтелектуальності та ефективності функціонування. А отже, виникає необхідність дослідження наявної нормативної бази для формування критеріїв ефективності розумного міста, визначення його основних принципів і ознак для забезпечення доцільності функціонування.

Міське середовище – це розподілена сукупність інфраструктур, зокрема транспортної (дороги, мости, тунелі, місця паркування, пішохідні зони, велосипедна інфраструктура), водної (водопостачання, водовідведення, санітарії та зливової каналізації), енергетичної (системи постачання електроенергії, газу, централізованого теплопостачання, громадського освітлення), інфраструктура для збирання та перероблення відходів; громадські будівлі, які використовують для спорту, мистецтва, культури, освіти, охорони здоров'я, адміністрації тощо [10, 18].

Зазначимо, що найпоширенішою концепцією реалізації ідей *Smart City* є *Internet of Things* (IoT), що підтримує мережу передачі даних між фізичними

об'єктами ("речами"), оснащеними вбудованими засобами взаємодії один з одним і зовнішнім середовищем, що забезпечують збір інформації, необхідної для належного управління міськими активами, ресурсами та послугами [1, 8]. Але така мережа не дає змогу системно аналізувати міські проблеми, комплексно досліджувати об'єкти міської інфраструктури та розробляти можливі способи її вдосконалення та інтелектуалізації. У зв'язку з цим географічні інформаційні системи відкривають нові перспективи, пов'язані зі збором даних про об'єкти, їх ідентифікацією, перевіркою на відповідність законодавству тощо [18]. Розуміння динаміки змін міського середовища є важливим джерелом інформації для прийняття управлінських рішень. Але тут потенціал геоінформаційних систем (ГІС) не використовують у повному обсязі: їх не розглядають як ефективний засіб, що допомагає приймати ґрунтовні рішення з інтелектуалізації міст з огляду на вимоги до містобудування, землеустрою, охорони довкілля та ін. Це потребує розроблення методів, оснований на використанні сучасних досягнень ГІС для підтримки прийняття рішень щодо інтелектуального розвитку міст, які можуть ґрунтуватися на актуальній цифровій моделі міста з географічною прив'язкою його об'єктів за допомогою застосування дистанційних показників зондування Землі (ДЗЗ) [18].

Предмет дослідження – ГІС-методи аналізу міської забудови для формування рішень з інтелектуалізації міста.

Метою роботи є підвищення ґрунтовності оцінок для формування рішень з інтелектуалізації міста на основі аналізу змін міської забудови.

Завдання дослідження:

- вивчити тенденції розвитку концепцій *Smart City*;
- проаналізувати сучасні вимоги до розумних міст і запропонувати модель розумного міста;
- розробити метод аналізу змін міської забудови за дистанційними даними та експериментально підтвердити можливість його впровадження у визначенні напрямів інтелектуалізації міста..

Теоретико-множинна модель розумного міста

Процес трансформації міст у розумні суттєво різняться по країнах і навіть по різних містах однієї країни, що пов'язано з різними наборами контекстних

факторів (показників, що визначають середовище, в якому живуть місцеві мешканці), що беруть до уваги в моделях *Smart City* [7]. За цих обставин виникають питання, що вважати розумним містом та як оцінити ефективність його функціонування, адже наявні локальні показники найчастіше не стандартизовані, не узгоджені або не піддаються порівняльному аналізу за часом.

Аналізуючи серію міжнародних стандартів ISO 37100, спрямовану на уніфікацію кроків щодо створення стратегій з досягнення стійкості міст і громад, зазначимо, що значну частку тут становлять документи, які містять набір індикаторів для вимірювання ефективності сфер діяльності з метою отримання кращих практик з усього світу й знаходження інноваційних рішень міських проблем. Зокрема ISO 37122 "Сталі міста та громади – індикатори розумних міст" [19] містить групи показників, сформованих відповідно до цілей Сталого розвитку, а також методи їх застосування для оцінювання динаміки руху до розумного міста економічної, екологічної та соціальної сфер його діяльності. Цей стандарт використовує статистичні показники, що надходять від відповідних служб міської адміністрації та компаній, які досліджують ринок відповідних послуг.

Нехай модель розумного міста повністю визначається сукупністю показників, сформованих у ISO 37122. У теоретико-множинному вигляді цю модель подамо як

$$SC = \bigcup_{i \in I} X_i, \quad (1)$$

де X_i – множина показників розумного міста i -ї групи, визначеної ISO 37122;

$I = 1, \dots, 19$ – максимальна кількість груп показників розумного міста.

У цьому разі справедливим є таке:

– групи показників можуть поєднувати різну кількість чинників (табл. 1), необхідних для формування комплексних властивостей розумного міста, тобто

$$\exists i, j \in I, \text{ якщо } i \neq j \mid |X_i| \neq |X_j|; \quad (2)$$

– кількість показників групи може бути розширена для дотримання більш комплексного

та прикладного підходу до аналізу сталості та інтелектуальності [19], але з дотриманням умови

$$X_i \cap X_j = \emptyset, \text{ якщо } i \neq j \text{ у разі } i, j \in I; \quad (3)$$

– відповідно до стандарту ISO 37122 максимальна кількість показників, що беруть до уваги в моделі (1), сягає 80, тобто $|SC|_{\max} = 80$, але висновок щодо "розумності" міста формують за результатами аналізу їх мінімально необхідної кількості:

$$|SC|_{\min} \leq |SC|_{\max} / 2. \quad (4)$$

Зазначимо, що частина показників не залежить від упровадження інноваційних технологій, а є, ймовірно, наслідком їх поширення та популяризації. Так, наприклад, коефіцієнт виживання нових компаній в місті здебільшого залежить від сприятливого економічного клімату в країні, ніж від "розумних" ініціатив міського керівництва; частка міського населення, що професійно володіє більш ніж однією мовою спілкування, є наслідком впровадження нових стандартів освіти або поширенням нових вимог ринку праці, а частка активних користувачів публічних бібліотек пов'язана із загальними традиціями освіти, притаманними для певної країни, та є результатом залучення до неї традиційних методів навчання тощо.

Виділимо в ISO 37122 сукупність показників моделі розумного міста, які, на думку авторів, безпосередньо визначають ефективність упровадження в повсякденне життя містян високих технологій і смарт-рішень. Для зручності подамо їх у вигляді таблиці (табл. 1), де вказано назву показників, збережено їх поділ на групи за ISO 37122, а також використано позначки множин відповідно до виразу (1).

Аналізуючи табл. 1, зазначимо, що для ефективного впровадження концепції *Smart City* та розвитку міста необхідно ретельно досліджувати наявну міську інфраструктуру [20, 21], адже розвиток технологій розумних міст спрямовано на використання передових технологій та інновацій. Це неможливо без сучасної доступної інфраструктури, яка охоплює всі райони міста. Вимоги до її стану для розумного міста більш жорсткі, ніж для звичайних міст і регіонів [20]. А отже, для їх забезпечення необхідно мати актуальну інформацію про міську забудову й тенденції її розвитку, адже щільність забудови постійно збільшується внаслідок спорудження нових об'єктів.

Таблиця 1. Показники моделі розумного міста, що визначають ефективність упровадження інтелектуальних рішень у повсякденне життя містян (джерело: сформовано авторами на основі [19])

Відповідно до ISO 37122			Напря́м інтелектуаліза́ції
познака множини, її назва (назва групи), кількість показників у групі	показник, значення якого залежить від упровадження інноваційних технологій		
	познака	назва	
1	2	3	4
X ₁ – економіка, 4	x ₁ ¹	частка контрактів на надання міських послуг, основаних на політиці відкритих даних	управління цільовою інформацією, що гарантує відкрите та підзвітне керування
	x ₁ ³	частка мешканців, зайнятих у сфері інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ)	упровадження інновацій у промислову сферу міста та сферу послуг
X ₂ – освіта, 3	x ₂ ²	кількість персональних комп’ютерів, ноутбуків, планшетів та інших навчальних пристроїв на 1 000 учнів	розвиток комп’ютерної грамотності для досягнення особистих, професійних, соціальних та освітніх цілей
X ₃ – енергетика, 10	x ₃ ⁶	частка вуличного освітлення, що регулюється системою управління робочими характеристиками	підвищення енергоефективності міста
	x ₃ ⁹	частка міських будівель, обладнаних інтелектуальними датчиками електро– споживання	підвищення енергоефективності міста
X ₄ – довкілля, 3	x ₄ ²	кількість інтерактивних дистанційних станцій атмосферного моніторингу на 1 км2	отримання оперативної інформації щодо стану міського середовища
	x ₄ ³	частка міських будівель, обладнаних системами моніторингу повітря в приміщеннях	підвищення комфорту користувачів будівель, покращення їхнього здоров’я
X ₅ – фінанси, 2	x ₅ ²	кількість платежів, що надходять місту за допомогою електронних систем оплати	збільшення росту продуктивності, зменшення витрат міста, бізнесу, мешканців міста
X ₆ – керівництво, 4	x ₆ ¹	щорічна кількість online-відвідувань муніципального порталу відкритих даних	поширення доступу мешканців до інформації від керівництва міста
	x ₆ ²	частка міських послуг, що доступні в online-режимі	поширення взаємодії керівництва міста з мешканцями та бізнесом
	x ₆ ³	середній термін відповіді на неекстрені запити (у днях)	поширення взаємодії керівництва міста з мешканцями та бізнесом
	x ₆ ⁴	середня тривалість збоїв у роботі інформаційно-технічної структури міста	підвищення ефективності міської сфери послуг та інфраструктури міста
X ₇ – охорона здоров’я, 3	x ₇ ¹	частка мешканців, які мають уніфікований online-профіль стану здоров’я	підвищення ефективності постачальників медичних послуг
	x ₇ ²	щорічна кількість дистанційних консультацій медичних фахівців	підвищення доступності первинної медичної допомоги
	x ₇ ³	частка мешканців, що мають доступ до інтерактивних систем екстреного оповіщення про стан довкілля	мінімізація шкідливого впливу забруднень на здоров’я населення
X ₈ – житло, 2	x ₈ ¹	частка домогосподарств, обладнаних інтелектуальними датчиками енергоспоживання	підвищення енергоефективності міста
	x ₈ ²	частка домогосподарств, обладнаних інтелектуальними лічильниками енергоспоживання	підвищення енергоефективності міста
X ₉ – соціальні умови, 4	x ₉ ⁴	частка міського бюджету, яка спрямовується на програми з подолання цифрового бар’єра	розвиток комп’ютерної грамотності серед населення міста
X ₁₀ – відпочинок, 1	x ₁₀ ¹	частка послуг з організації відпочинку, що надаються online	підвищення доступності послуг для мешканців міста
X ₁₁ – безпека, 1	x ₁₁ ¹	частка території міста, що покривається камерами online-спостереження	підвищення безпеки міста

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
X_{12} – тверді відходи, 6	x_{12}^1	частка пунктів збору сміття, обладнаних системами телеметричного контролю	оптимізація та підвищення ефективності системи збирання сміття
	x_{12}^2	частка мешканців, які мають доступ до системи збирання відходів з індивідуальним обліком обсягів	оптимізація процесу збирання сміття та трафіку спеціалізованих транспортних засобів
	x_{12}^5	частка муніципальних контейнерів для сміття, обладнаних сенсорними вимірювальними датчиками	удосконалення системи моніторингу та збирання відходів, оптимізація маршрутів і графіків вивезення сміття
X_{13} – спорт та культура, 6	x_{13}^1	кількість online-бронювання відвідування об'єктів культури	підвищення доступності установ культури та спорту
	x_{13}^3	кількість найменувань електронних книг і книг з фондів міських публічних бібліотек	підвищення рівня культури й освіти мешканців міста, спрощення доступу до книг
X_{14} – телекомунікації, 3	x_{14}^2	частка міської території, яка розташована в "проблемних" зонах покриття телекомунікаційних мереж	покращення доступу до базових послуг міста
	x_{14}^3	частка міської території, яка розташована в зонах покриття муніципальних інтернет-мереж загального користування	покращення процесу спілкування, розв'язання завдань перспективного планування
X_{15} – транспорт, 14	x_{15}^1	частка вулиць міста, під'єднаних до online-системи попередження про ситуації на дорогах у режимі реального часу	підвищення ефективності планування розвитку транспортної інфраструктури міста
	x_{15}^5	частка ліній громадського транспорту, обладнаних загальнодоступними інформаційними системами реального часу	підвищення ефективності функціонування транспортної системи міста
	x_{15}^6	частка послуг громадського транспорту, за які сплачують за допомогою єдиної системи платежів	підвищення ефективності функціонування транспортної системи міста
	x_{15}^7	частка громадських паркувань, що оплачуються за допомогою системи електронних платежів	створення системи розумного ціноутворення, підвищення ефективності оплати міських послуг
	x_{15}^8	частка громадських паркувань, обладнаних інтерактивною системою індикації вільних місць	підвищення ефективності міських послуг, покращення стану довкілля
	x_{15}^9	частка інтелектуальних світлофорних постів	покращення стану довкілля, оптимізація маршрутів екстрених служб, підтримання мобільності
	x_{15}^{10}	відсоток території міста, охопленої інтерактивними дорожніми мапами	підтримання мобільності, оптимізація маршрутів
	x_{15}^{12}	частка маршрутів громадського транспорту, де надають послугу під'єднання до муніципальної мережі Інтернет	покращення процесу спілкування, розв'язання завдань перспективного планування
	x_{15}^{13}	частка міських доріг, які підтримують систему автономного керування	покращення транспортної інфраструктури й комунікаційної мережі міста
X_{16} – продовольча безпека, 3	x_{16}^3	частка міської території, охопленої інтерактивною системою керування постачання продуктів харчування	підвищення доступності продовольчих ресурсів міста, оптимізація запасів продуктів харчування
X_{17} – містобудування, 4	x_{17}^1	частка мешканців, яких щорічно долучають до процесів планування	підвищення ефективності планування та розроблення містобудівної політики
	x_{17}^2	частка дозволів на будівництво, отриманих за допомогою електронних систем розгляду документів	підвищення рентабельності будівництва, зменшення корупційного складника
X_{18} – стічні води, 5	x_{18}^5	частка трубопроводів каналізаційної мережі, які контролюють в реальному часі системою датчиків спостереження	підвищення ефективності каналізаційної мережі, впровадження системи моніторингу стоків
X_{19} – вода, 4	x_{19}^2	кількість станцій моніторингу якості природної води, що працюють в режимі реального часу	підвищення ефективності моніторингу стану природної води
	x_{19}^3	частка міської системи водопостачання, яку контролюють інтелектуальною системою моніторингу	підвищення ефективності керування системою водопостачання міста
	x_{19}^4	частка міських будівель, обладнаних інтелектуальними лічильниками води	підвищення ефективності системи водопостачання міста

Аналіз змін міської забудови

Зазвичай розвиток міської забудови відповідно до генерального плану регламентується національними нормативними документами, наприклад Державними будівельними нормами, які визначають організаційно-планувальну структуру міста й мають забезпечувати населення місцем для мешкання, роботи та відпочинку. На жаль, усе частіше розвиток мегаполісів України пов'язують з корупційними скандалами, він має широке коло й масштаб містобудівних проблем стратегічного генерального планування, що суттєво зменшує можливість інтелектуалізації населених пунктів. Збільшення кількості об'єктів капітального будівництва є лише метою отримання швидкого комерційного зиску, ігнорування інновацій під час створення комфортного середовища за одночасного обмеження засобів контролю в просторовому охопленні призводять до перевантажених автошляхів, шумового забруднення, погіршення екологічного стану міста тощо. Усе це потребує поєднання класичних і нових способів керування забудовою міських територій, регулювання містобудівного процесу для забезпечення комфортних умов життя та нормального функціонування інфраструктури [21]. У цьому контексті актуальним стає вдосконалення аналізу міської забудови, що склалася внаслідок урбанізації районів міст і формування ґрунтовних напрямів для смарт-рішень. Використання даних ДЗЗ дає змогу розв'язати частину проблем, пов'язаних із аналізом наявної міської забудови. Крім того, застосування цих даних має низку переваг, зокрема [18, 20, 22]:

- охоплює велику територію, що особливо актуально для дослідження забудови мегаполісів;
- немає необхідності в залученні до процесу аналізу міської забудови значної кількості виконавців;
- не створює перешкод у використанні міської інфраструктури під час аналізу;
- методи отримання даних, їх кількість та якість можуть бути визначені для конкретних завдань з огляду на особливі вимоги до збирання та подальшого аналізу наборів даних тощо.

Водночас зауважимо, що дані ДЗЗ мають значний обсяг, їх якість залежить від сукупності

факторів, які не завжди можуть бути ідеальними, а їх оброблення займає тривалий час [20, 22]. Тому виникає необхідність у створенні методу, що максимально спростить процедуру оброблення даних ДЗЗ і надасть оцінки, придатні для подальшого аналізу та формування рішень.

Нині перспективним варіантом розв'язання складних просторових завдань стає машинне навчання, зокрема глибоке навчання, або *Deep Learning*. Саме тому останнім часом ці інструменти стають основними компонентами просторового аналізу в геоінформаційних системах [23].

Спираючись на типовий алгоритм машинного навчання в процесі оброблення структурованої інформації [24], сформуємо метод аналізу міської забудови за даними ДЗЗ. Він передбачає кілька етапів.

Етап 1. Завантаження супутникового знімку міської забудови для створення навчальної вибірки.

Етап 2. Формування навчальної вибірки з типових просторових об'єктів міської забудови (рис. 3, а):

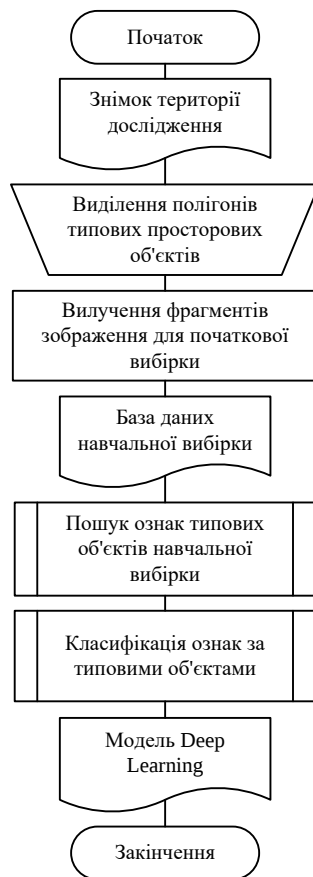
- виділення полігонів типових об'єктів;
- вилучення просторових фрагментів зображення з типовими об'єктами;
- збереження одержаних фрагментів у базу даних.

На цьому етапі створюють навчальні вибірки, обираючи з просторових даних міської забудови репрезентативні зразки об'єктів інтересу, які точно відтворюють просторові та спектральні властивості забудови, її орієнтацію, розмір і стан. У процесі виконання цієї операції необхідно пам'ятати, що чим повніше виділені об'єкти відбивають об'єкт інтересу, то кращим буде навчання моделі й точнішими будуть класифікація та виявлення логічних зв'язків на зображенні [24].

Етап 3. Отримання моделі *Deep Learning* (рис. 3, а):

- циклічний пошук ознак у зображеннях навчальної вибірки;
- класифікація ознак за типовими об'єктами зображення;
- збереження моделі *Deep Learning*.

Схема алгоритму реалізації другого та третього етапів методу дослідження міської забудови зображена на рис. 3, а. Тут передбачено, що операції третього етапу виконують за допомогою інструменту *Image Analyst ArcGIS Pro 3.4*.



а

```

from arcgis.learn import MaskRCNN, prepare_data
# Об'єкт для підготовки даних prepare_data та модель MaskRCNN

data = prepare_data(r'C:\Users\Documents\ArcGIS\Projects\Training',
# Збереження ініціалізованого об'єкта prepare_data
# Шлях до даних вибірки r'C:\Users\Documents\ArcGIS\Projects\Training'
                    batch_size=6, # Кількість навчальних вибірок, що обробляють за один раз
                                # під час навчання
                    chip_size=170 # Розмір зображення, яке використовують під час навчання
                                # моделі
                    )

```

```

data.show_batch(rows=2) # Візуалізація експортованих навчальних вибірок

```



```

model = MaskRCNN(data) # Ініціалізація моделі MaskRCNN
model.lr_find()         # Експериментальний підбір швидкості навчання на вибірці

```

б

Рис. 3. Програмно-алгоритмічна реалізація методу дослідження міської забудови за супутниковими знімками:

а – схема алгоритму отримання моделі *Deep Learning* для дешифрування об'єктів міської забудови;

б – лістинг програми циклічного аналізу ознак об'єктів навчальної вибірки

В *Image Analyst* модель *Deep Learning* формується як результат навчання на зображеннях навчальної вибірки, отриманої на другому етапі.

Стандартний уніфікований код для навчання моделі *Deep Learning*, реалізований на *Python*, зазвичай поєднує дані такого типу [24]:

```

TrainDeepLearningModel(in_folder, out_folder, {max_epochs}, {model_type}, {batch_size},
{arguments}, {learning_rate}, {backbone_model}, {pretrained_model}, {validation_percentage},
{stop_training}, {freeze}, {augmentation}, {augmentation_parameters}, {chip_size}, {resize_to},
{weight_init_scheme}, {monitor}),

```

(5)

де *in_folder* та *out_folder* – шляхи до місць, де зберігають елементи навчальної вибірки та куди після навчання завантажують навчену модель;

max_epochs – максимальна кількість періодів навчання моделі;

model_type та *arguments* – тип моделі, яку використовують для навчання, та її аргументи (за необхідністю);

batch_size – кількість навчальних вибірок, які обробляють за один крок навчання;

learning_rate – темп навчання;

backbone_model – тип нейронної мережі, що застосовують як архітектуру для навчання нової моделі;

validation_percentage – відсоток навчальних вибірок, що використовують для перевірки моделі;

stop_training та *monitor* – ознака ранньої зупинки та метрика для перевірки контрольних точок у разі її застосування;

augmentation та *augmentation_parameters* – тип збільшення навчальних даних (за необхідністю) та його значення для кожного перетворення в параметрі збільшення;

chip_size – розмір зображення, що використовують для навчання моделі (за необхідністю);

weight_init_scheme – ознака схеми, за якою визначають вагу для шару нейронної мережі (у разі застосування в навчальній вибірці мультиспектральних, а не RGB-даних).

Зазначимо, що зміст виразу (5) може суттєво розрізнятися залежно від типу моделі, обраної для навчання.

На рис. 3, б наведено лістинг програми циклічного аналізу ознак об'єктів вибірки під час навчання моделі з використанням моделі *Mask R-CNN*, яка найбільш пристосована для сегментації об'єктів з однаковими просторовими ознаками [25], властивими для контурів будівель міської забудови. Параметри *max_epochs*, *learning_rate*, *stop_training* прийнято за замовчуванням, тобто кількість періодів навчання моделі становить 20, оптимальну швидкість навчання отримують за кривою навчання в процесі, навчання моделі зупиняється в разі відсутності покращення моделі [24, 25].

Етап 4. Перевірка навченої моделі *Deep Learning*:

- на вихідному супутниковому знімку міської забудови для порівняння результатів розпізнавання з огляду на елементи навчальної вибірки;

- на довільних знімках для визначення можливості адаптації моделі до інших вихідних даних.

Етап 5. Використання моделі *Deep Learning* для виявлення об'єктів міської забудови відповідно до знімків.

Результати застосування методу дають змогу отримати кількісні та якісні властивості об'єктів будівництва, оцінити динаміку реальних змін міського середовища, актуалізувати інформацію про міську

забудову тощо. Це є необхідним кроком для формування напрямів інтелектуалізації міста [23].

Аналіз забудови міста Києва за супутниковими знімками

Фахівці зазначають, що Київ будують швидко, неконтрольовано й найчастіше непередбачувано. Чинний генеральний план міста вважають застарілим через наявність у ньому нормативів, які є наслідком радянської планувальної традиції, вони часто суперечать один одному, а рішення щодо міського планування приймаються непрозоро. Ці проблеми не може усунути новий генеральний план, адже жоден з планів Києва ніколи не виконувався через корупцію, а також незацікавленість судової влади та правоохоронних органів у розв'язанні проблем. Кількість незаконних забудов, споруджених без відповідних дозвільних документів або всупереч їм, постійно збільшується. За не завжди законно зведеними житловими масивами не встигають будувати школи, а установи соціальної інфраструктури, транспортна інфраструктура й необхідні комунікації не відповідають Державним будівельним нормам тощо [4, 21]. За цих обставин дані ДЗЗ стають майже єдиним джерелом актуальної об'єктивної інформації щодо міської забудови. Тому для дослідження можливостей запропонованого методу розглянемо супутникові знімки одного з районів м. Києва.

На першому етапі для актуалізації інформації про міську забудову Києва та оцінювання динаміки її зміни з використанням сервісу *Google Earth Pro* завантажимо два супутникових знімки району столиці за різні часові періоди – 2005 р. (рис. 4, а) і 2022 р.



а



б

Рис. 4. Об'єкт дослідження в Подільському районі м. Києва: а – супутниковий знімок території дослідження (2005 р.); б – виділення фрагментів зображення об'єктів забудови для навчальної вибірки

У програмному забезпеченні *ArcGIS Pro* визначимо полігони, створимо набір класів об'єктів навчальної вибірки (рис. 4, б), за допомогою інструменту *Export_Training_Data_for_Deep_Learning* отримаємо фрагменти зображення об'єктів для встановлених класів у форматі .TIFF. У такий спосіб сформуємо базу даних навчальної вибірки.

Модель навчалася з використанням нейронної мережі *Mask R-CNN* за допомогою циклічного аналізу ознак об'єктів вибірки. Зазначимо, що вже на п'ятій ітерації було досягнуто мінімальних втрат під час навчання ($loss_train \approx 0,483$), у цьому разі швидкість навчання в процесі руху до цього мінімуму становила $learning_rate \approx 8,32 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 5 наведено динаміку зміни втрат ($loss_train$), які є властивістю похибки навчання на навчальних даних для кожної ітерації, та втрат валідації ($loss_validation$), що вимірюють похибку в окремому перевірчому наборі даних, які модель не бачила під час її навчання. Процес змін $loss_train$ і $loss_validation$ демонструє добре навчання моделі та її рух до мінімуму втрат не лише на навчальному наборі даних. У цьому разі забезпечується узагальнення моделі на новій інформації та підтримується задовільна продуктивність на перевірчому наборі даних.

Отже, досягнення мінімального значення похибок свідчить про те, що отримано добре навчену модель *Deep Learning*.

Переходимо до етапу тестування та перевіримо її:

– на вихідному супутниковому знімку міської забудови для порівняння результатів розпізнавання на навчальній вибірці (рис. 6, а);

– на довільному супутниковому зображенні міської забудови, яке майже не має однакових із навчальною вибіркою об'єктів (рис. 6, б).

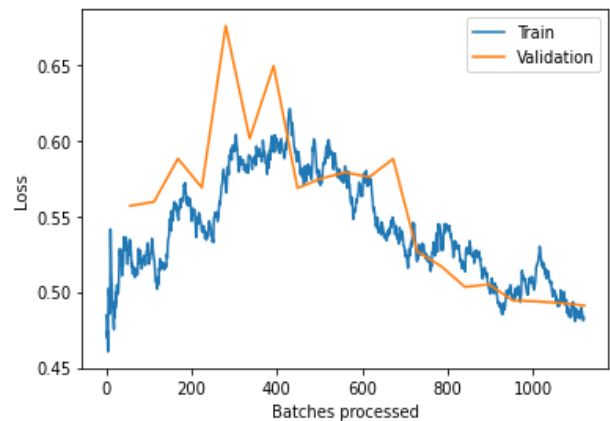


Рис. 5. Динаміка зміни похибок $loss_train$ і $loss_validation$ для кожної ітерації навчання моделі

Аналізуючи рис. 6, зазначимо, що модель дає добрі результати, розпізнає об'єкти міської забудови за межами визначеної навчальної ділянки та гарно пристосовується до інших об'єктів, на яких модель *Deep Learning* не тренувалася.

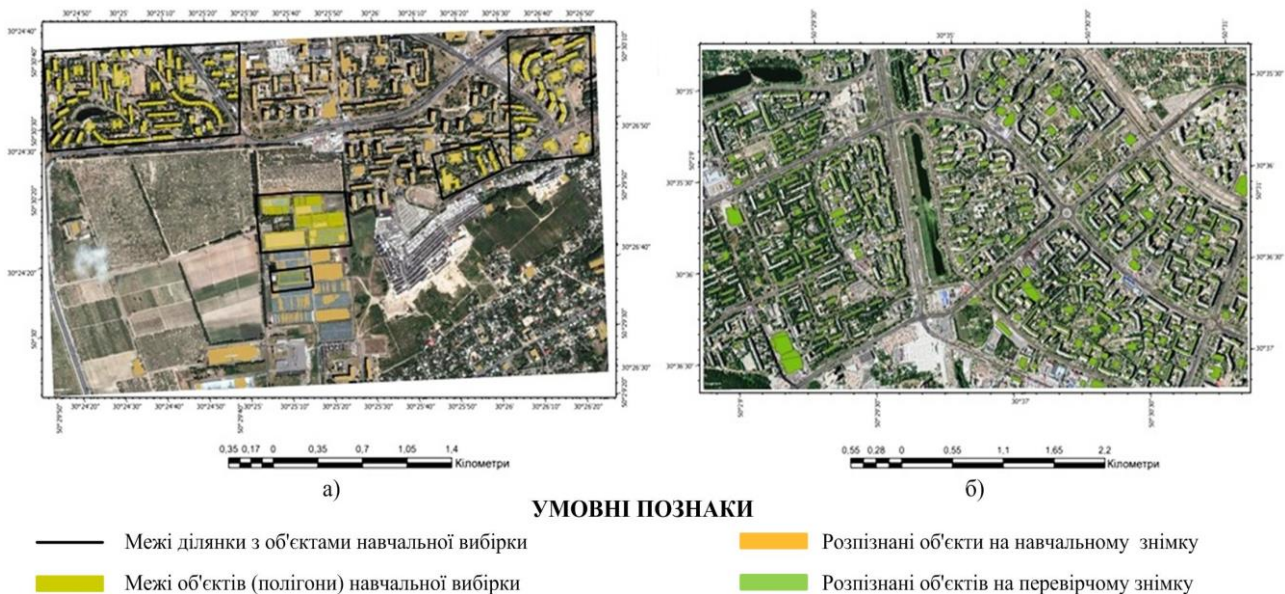


Рис. 6. Перевірка навченої моделі *Deep Learning*: а – порівняння результатів розпізнавання на навчальній вибірці; б – результати розпізнавання на довільному супутниковому знімку

Результати дослідження та їх обговорення

Аналіз міської забудови району м. Києва та її динаміки за допомогою моделі *Deep Learning* відбувався за супутниковими знімками, зробленими 2005 р. і 2022 р.

На знімку 2005 р. (рис. 7) знайдено та класифіковано 380 об'єктів міської забудови, зокрема житлову забудову (доля якої становить 68,5%), школи, лікарні, тепличний комплекс та інші об'єкти (супермаркети, аптеки, кінотеатр, автозаправні станції тощо). Біля тепличного комплексу також ідентифіковано землі сільськогосподарського призначення та сади, які займають значну площу району (ліва нижня частина знімку).

На знімку 2021 р. (рис. 8) знайдено та класифіковано 509 об'єктів міської забудови. Крім визначених раніше об'єктів, дешифровано стадіон і споруди, що будуються. Тут майже повністю зник тепличний комплекс, на його місці виявлено нові завершені розбудови (п'ять нових житлових комплексів) і житлові забудови на стадії будівництва, з'явився торговий центр. На території земель сільськогосподарського призначення ідентифіковано житловий комплекс і великий торговий комплекс.

Отже, спостерігаємо значну кількість багатоповерхової житлової забудови, частка якої стабільно збільшується (сягає приблизно 73,9%),

водночас кількість закладів освіти та лікарень, якщо порівнювати з 2005 р., не змінилася. Не розвиваються садово-паркові зони, обмежуються території озеленення та прибудинковий простір. Зростає кількість комерційної забудови – торгових центрів, супермаркетів – приблизно на 11% порівняно з 2005 р. Тому необхідно більшу увагу приділити конкретним заходам модернізації транспортної та інженерної інфраструктури, оптимізації вуличної мережі, будівництву мостів і багаторівневих транспортних розв'язок тощо.

За цих обставин можливими напрямками інтелектуалізації відповідно до моделі (1) можуть стати:

- підвищення ефективності постачальників медичних послуг, доступності первинної лікарської допомоги не лише завдяки будівництву нових закладів, але внаслідок збільшення кількості дистанційних консультацій у медичних фахівців, впровадження електронних систем ведення медичного обліку, створення online-профілів пацієнтів тощо;
- підвищення ефективності планування розвитку транспортної інфраструктури міста з пріоритизацією на розвиток електротранспортної мережі, на організацію інтелектуальних світлофорних постів тощо;
- підвищення ефективності функціонування транспортної системи міста завдяки впровадженню системи диспетчеризації на основі GPS-навігації, дотримання розкладу руху транспорту, застосування єдиної системи платежів тощо.



УМОВНІ ПОЗНАКИ

 Житлова забудова	 Тепличний комплекс
 Школи	 Інші об'єкти
 Лікарні	

Рис. 7. Класифіковані об'єкти міської забудови в Подільському районі м. Києва (2005 р.)



УМОВНІ ПОЗНАКИ

Житлова забудова	Стадіон	Інші об'єкти
Будинки, що будуються	Школи	
Тепличний комплекс	Лікарні	

Рис. 8. Класифіковані об'єкти міської забудови в Подільському районі м. Києва (2021 р.)

Висновки та перспективи подальшого розвитку

Тепер майже половина населення планети живе в містах, а в подальшому кількість містян може збільшитися до 5 млрд [1]. Узагальнення тенденцій розвитку мегаполісів підтверджує, що створення зручного міського середовища сприяє економічному зростанню та розв'язанню проблем з ресурсами, покращує якість життя, забезпечує сталий розвиток. Але, як свідчать результати бібліографічного пошуку, це можливо завдяки впровадженню концепції розумного міста, яку спрямовано на підтримку балансу його економічного, соціального та екологічного складників [3].

Для уніфікації кроків зі створення розумних міст і формування способів розв'язання міських проблем розроблено теоретико-множинну модель розумного міста, яка, ґрунтуючись на вимогах міжнародних стандартів серії ISO 37100 [19], поєднує сукупність показників, що забезпечують реалізацію певних напрямів інтелектуалізації. У цьому разі визначена група чинників, що безпосередньо характеризують ефективність упровадження інноваційних технологій у життя містян (табл. 1).

Вибір напрямку інтелектуалізації має ґрунтуватися на ретельному вивченні ситуації, що виникла внаслідок урбанізації міських районів. Складність цього питання потребує вдосконалення аналізу

міської забудови та залучення нових підходів та інформації, зокрема даних ДЗЗ, адже інтеграція цих технологій забезпечує можливості з багатовимірного моніторингу, підвищує ґрунтовність прогнозних оцінок і пом'якшує наслідки нестійкої урбанізації [20]. Для спрощення процедури оброблення цих даних та отримання оцінок, придатних для подальшого аналізу й формування рішень, запропоновано метод аналізу змін міської забудови за даними ДЗЗ. Він ґрунтується на використанні глибокого навчання в обробленні структурованої інформації за допомогою інструменту *Image Analyst ArcGIS Pro 3.4* [24]. Розроблено схему алгоритму отримання моделі *Deep Learning* для дешифрування об'єктів міської забудови, наведено її програмну реалізацію.

Експериментальне оцінювання можливостей розробленого методу відбувалося під час виконання завдань актуалізації інформації про міську забудову Києва.

Отже, отримана в процесі реалізації методу модель *Deep Learning* добре розпізнає об'єкти міської забудови та добре пристосована до об'єктів, що різняться від об'єктів навчальної вибірки. У цьому разі внаслідок аналізу динаміки змін міської забудови району м. Києва за період 2005–2021 рр. встановлено таке:

– збільшення кількості об'єктів житлової (на 5,4%) і комерційної забудови (на 11%), що підтверджує

загальносвітову тенденцію нестійкої урбанізації, коли забудова відбувається лише з метою одержання швидкого комерційного зиску [2, 8];

– нехтування розвитком соціальної інфраструктури, зокрема не зафіксовано збільшення кількості освітніх і медичних закладів;

– відсутність розбудови транспортної інфраструктури, зокрема на знімках не розпізнано нових транспортних розв'язок або мостів;

– актуальним стає питання щодо озеленення території району та створення садово-паркових зон тощо.

Отже, ґрунтуючись на отриманих оцінках міської забудови району м. Києва, формують пріоритетні напрями інтелектуалізації та визначають шляхи впровадження інтелектуальних рішень у повсякденне життя містян відповідно до табл. 1.

Зазначимо, що запропоновані підходи можуть успішно використовуватися під час воєнного стану (наприклад, для визначення обсягів руйнувань або пошкоджень внаслідок обстрілів) і в умовах післявоєнного відновлення країни (наприклад, для встановлення обсягів відшкодувань), адже модель *Deep Learning* добре пристосована до інших об'єктів, на яких вона не тренувалася.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (державні реєстраційні номери проєктів 0125U000573, 0125U001680) і Регіонального центру космічного моніторингу Землі "Слобожанщина".

Внесок авторів. Огляд та аналіз літератури – **С. Даншина, С. Андрєєв**; розроблення концептуальних положень дослідження – **С. Даншина**; практична апробація результатів статті – **С. Андрєєв**; аналіз результатів дослідження **С. Даншина, С. Андрєєв**; адміністрування проєкту – **С. Даншина**. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Висловлюємо подяку **Тарасу Ісаєнку** за практичну перевірку ефективності розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення.

Список літератури

1. Tricomi G., CV POp-CoRN: The (smart) city-vehicle participatory-opportunistic cooperative route navigation system / G. Tricomi, C. Scaffidi, A. Puliafito, S. Distefano. *Ad Hoc Networks*. 2024. Article 103604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103604>
2. Teng Q., Bai X., Apuke O. D. Modelling the factors that affect the intention to adopt emerging digital technologies for a sustainable smart world city. *Technology in Society*. 2024. Vol. 78. Article 102603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102603>
3. Yang R., Zhen F. Smart city development Models: A cross-cultural regional analysis from theory to practice. *Research in Globalization*. 2024. Vol. 8. Article 100221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2024.100221>
4. Чичкало-Кондрацька І. Б., Буряк А. А., Кондрацька Д. С. Особливості створення та перспективи розвитку Smart Cities у країнах світу. *Ефективна економіка*. 2020. № 8. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.8.9>
5. IMD Smart City Index 2024. URL: https://www.imd.org/wp-content/uploads/2024/04/20240412-SmartCityIndex-2024-Full-Report_4.pdf. (дата звернення 1.07.2024).
6. IMD World Competitiveness Booklet. URL: https://www.imd.org/wp-content/uploads/2023/06/WCY_Booklet_2023-FINAL.pdf. (дата звернення 1.07.2024).
7. Zhu J. How different can smart cities be? A typology of smart cities in China / J. Zhu et al. *Cities*. 2024. Vol. 149. Article 104992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104992>
8. Okonta D. E., Vukovic V. Smart cities software applications for sustainability and resilience. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Issue 2. Article e32654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32654>
9. Liu Y., Wen X. Sustainability assessment of cities using multicriteria decision-making combined with deep learning methods *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 115. Article 105571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105571>
10. Ішпак О., Федорка П., Пригара М. Розумні міста та Інтернет речей: вплив розробок у сфері ІТ на розвиток міст і покращення якості життя. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 3 (25). С. 114 – 128. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.114>
11. Kim J. S., Feng Y. Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*. 2024, Vol. 147, Article 104832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>

12. Han M.J.N., Kim M. J. A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology. *Cities*. 2024. Vol. 150. Article 105027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105027>
13. Abdullah Kaiser Z. R. M. Smart Governance for Smart Cities and Nations: The Case of Smart Bangladesh. *Journal of Economy and Technology*. 2024, Article 003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.07.003>
14. Makkonen T., Inkinen T. Inclusive smart cities? Technology-driven urban development and disabilities. *Cities*. 2024. Vol. 154. Article 105334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105334>
15. Ulya A. Major Dimensions of Smart City: A Systematic Literature Review / A. Ulya, T. D. Susanto, Y. S. Dharmawan, A. P. Subriadi. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 234. P. 996-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.089>
16. Florentin K. M., Onuki M., Yarime M. Facilitating citizen participation in Greenfield smart city development: The case of a human-centered approach in Kashiwanoha international campus town. *Telematics and Informatics Reports*. 2024. Vol. 15. Article 100154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.teler.2024.100154>
17. Trencher G. Towards the smart city 2.0: Empirical evidence of using smartness as a tool for tackling social challenges. *Technological Forecasting and Social Change*. 2019. Vol. 142. P. 117-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.033>
18. Даншина С. Ю., Андреев С. М. Дистанційні дані у процесі реставрації пам'яток архітектури. *Управління розвитком складних систем*. 2024. No. 59. С. 138-147. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.138-147>
19. ISO 37122:2019. Sustainable cities and communities – Indicators for smart cities. URL: <https://www.iso.org/standard/69050.html>. (дата звернення 5.07.2024).
20. Zheng Y. Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV Images for Sustainable Development of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure / Y. Zheng et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(3), Article 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17030927>
21. Дюжев С. Генеральне стратегічне містобудівне планування та проблеми планувального управління розселенням (частина друга: проблеми, перешкоди щодо їх розв'язання, актуальні завдання та технологічні вимоги до змісту містобудівної документації). *Містобудування та територіальне планування*. 2023. № 84. С. 64-131. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.64-131>
22. Danshyna S., Nechausov A. Andrieiev S. Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. No. 4 (63). P. 86–97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
23. Zhou H. Identifying influencing factors and characterizing key issues in urban sustainable development capacity through machine learning / H. Zhou et al. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2024. Vol. 22, issue 3. P. 291-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2024.09.008>
24. Deep learning using the ArcGIS Image Analyst extension. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/help/analysis/image-analyst/deep-learning-in-arcgis-pro.htm>.
25. Shaoqing R. University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, China Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / Sh. Ren, Kaiming He, R. Girshick, J. Sun. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. Vol. 39, Issue 6. P. 1137-1149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>

References

1. Tricomi, G., Scaffidi, C., Puliafito, A., Distefano, S. (2024), "CV POp-CoRN: The (smart) city-vehicle participatory-opportunistic cooperative route navigation system", *Ad Hoc Networks*, Article 103604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103604>
2. Teng, Q., Bai, X., Apuke, O. D. (2024), "Modelling the factors that affect the intention to adopt emerging digital technologies for a sustainable smart world city", *Technology in Society*, Vol. 78, Article 102603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102603>
3. Yang, R., Zhen, F. (2024), "Smart city development Models: A cross-cultural regional analysis from theory to practice", *Research in Globalization*, Vol. 8, Article 100221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2024.100221>
4. Chychkalo-Kondratska, I., Buriak, A., Kondratska, D. (2020), "Features of Creation and Prospects of Development of Smart Cities in the Countries of the World" ["Osoblyvosti stvorennia ta perspektyvy rozvytku Smart Cities u krainakh svitu"], *Effective Economy*, No. 8, DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.8.9>
5. "IMD Smart City Index 2024". available at: https://www.imd.org/wp-content/uploads/2024/04/20240412-SmartCityIndex-2024-Full-Report_4.pdf. (last accessed 1.07.2024).
6. "IMD World Competitiveness Booklet". available at: https://www.imd.org/wp-content/uploads/2023/06/WCY_Booklet_2023-FINAL.pdf. (last accessed 1.07.2024).

7. Zhu, J., Gianoli, A., Noori, N., de Jong, M., Edelenbos, J. (2024), "How different can smart cities be? A typology of smart cities in China", *Cities*, Vol. 149, Article 104992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104992>
8. Okonta, D. E., Vukovic, V. (2024), "Smart cities software applications for sustainability and resilience", *Heliyon*, Vol. 10, issue 2, Article e32654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32654>
9. Liu, Y., Wen, X. (2024), "Sustainability assessment of cities using multicriteria decision-making combined with deep learning methods", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 115, Article 105571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105571>
10. Shpak, O., Fedorka, P., Prygara, M. (2023), "Smart cities and the internet of things: the impact of its developments on the development of cities and improving the quality of life" ["Rozumni mista ta Internet rechei: vplyv rozrobok u sferi IT na rozvytok mist i pokrashchennia yakosti zhyttia"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (25), P. 114 – 128. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.114>
11. Kim, J. S., Feng, Y. (2024), "Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China", *Cities*, Vol. 147, Article 104832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>
12. Han, M.J.N., Kim, M. J. (2024), "A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology", *Cities*, Vol. 150, Article 105027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105027>
13. Abdullah Kaiser, Z. R. M. (2024), "Smart Governance for Smart Cities and Nations: The Case of Smart Bangladesh", *Journal of Economy and Technology*, Article 003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.07.003>
14. Makkonen, T., Inkinen, T. (2024), "Inclusive smart cities? Technology-driven urban development and disabilities", *Cities*, Vol. 154, Article 105334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105334>
15. Ulya, A., Susanto, T. D., Dharmawan, Y. S., Subriadi, A. P. (2024), "Major Dimensions of Smart City: A Systematic Literature Review", *Procedia Computer Science*, Vol. 234, P. 996 – 1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.089>
16. Florentin, K. M., Onuki, M., Yarime, M. (2024), "Facilitating citizen participation in Greenfield smart city development: The case of a human-centered approach in Kashiwanoha international campus town", *Telematics and Informatics Reports*, Vol. 15, Article 100154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.teler.2024.100154>
17. Trencher, G. (2019), "Towards the smart city 2.0: Empirical evidence of using smartness as a tool for tackling social challenges", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 142, P. 117 – 128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.033>
18. Danshyna, S., Andrieiev, S. (2024), "Remote data in the process of architectural monuments restoration", ["Dystantsiini dani u protsesi restavratsii pamiatok arkhitektury"], *Management of Development of Complex Systems*, No. 59. pp. 138 – 147. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.138-147>
19. "ISO 37122:2019. Sustainable cities and communities – Indicators for smart cities". available at: <https://www.iso.org/standard/69050.html>. (last accessed 5.07.2024).
20. Zheng, Y., Shcherbakova, G., Rusyn, B., Sachenko, A., Volkova, N., Kliushnikov, I., & Antoshchuk, S. (2025), "Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV Images for Sustainable Development of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure", *Sustainability*, Vol. 17(3), Article 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17030927>
21. Dyuzhev, S. (2023), "General strategic city planning designing and problems of planning management for settling (the second part: problems, hindrances concerning their solution, actual targets and technological demands to the content of city planning documentations)" ["Heneralne stratehichne mistobudivne planuvannia ta problemy planuvalnoho upravlinnia rozselenniam (chastyna druha: problemy, pereshkody shchodo yikh rozviazannia, aktualni zavdannia ta tekhnolohichni vymohy do zmistu mistobudivnoi dokumentatsii) "], *Urban Development and Spatial Planning*, No. 84, P. 64 – 131. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.64-131>
22. Danshyna, S., Nechausov, A. Andrieiev, S. (2022), "Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 4 (63). P. 86 – 97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
23. Zhou, H., Gao, L., Xu, Z., Shi, L., Lv Q. (2024), "Identifying influencing factors and characterizing key issues in urban sustainable development capacity through machine learning", *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, Vol. 22, Issue 3, P. 291 – 304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2024.09.008>.
24. "Deep learning using the ArcGIS Image Analyst extension". available at: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/help/analysis/image-analyst/deep-learning-in-arcgis-pro.htm>. (last accessed 15.01.2025).
25. Shaoqing, R., Kaiping, He., Girshick, R., Sun, J. (2017), "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, Issue 6, P. 1137 – 1149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>

Відомості про авторів / About the Authors

Даншина Світлана Юрївна – доктор технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: s.danshyna@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4146>

Андрєєв Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: s.andreev@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2637>

Danshyna Svitlana – Doctor of Sciences (Engineering), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

Andriev Sergey – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

FORMATION OF A SMART CITY MODEL BASED ON THE DYNAMICS OF CHANGES IN URBAN BUILDING

The **purpose** of the article is improving the validity of assessments for the formation of decisions on the intellectualization of the city based on analysis of urban building. **Objectives.** The trends in the development of Smart City concepts were analyzed; requirements for Smart Cities are analyzed and a set-theoretical model of a Smart City is proposed; the method of analyzing urban building using remote sensing data has been improved and the possibility of its use has been experimentally confirmed. The following **methods** used are – methods of system analysis, set theory, and deep learning. The following **results** were obtained. Creating a comfortable urban environment promotes economic growth, improves the quality of life and ensures sustainable development. This is possible through the implementation of the smart city concept. To unify the steps to create Smart Cities, a set-theoretic model of a Smart City is proposed. It generalizes the requirements of standards of the ISO 37100 series and combines a set of indicators, ensuring the implementation of certain areas of intellectualization. The choice of the intellectualization direction should be based on the study of urbanization problems. The complexity of this issue requires improvement of urban building analysis processes, for example, using remote sensing data. To obtain estimates suitable for further analysis and decision-making, a method for studying urban development based on remote sensing data is proposed. It is uses of deep learning in processing structured data using the Image Analyst ArcGIS Pro 3.4. A scheme of the algorithm for obtaining a Deep Learning model for decrypting urban building objects has been developed, and its software implementation has been proposed. The study of the capabilities of the developed method was carried out when solving the problems of updating information about the urban development of Kyiv. The resulting Deep Learning model recognizes urban building objects well and has good adaptability to objects other than the training sample. **Conclusions:** The choice of the direction of intellectualization should be based on a thorough study of the situation that has arisen as a result of the urbanization. An experimental analysis of the dynamics of changes in the urban development of the Kyiv district for the period 2005 – 2021 showed: an increase in the number of residential (by 5.4%) and commercial development (by 11%), neglect of the development of social infrastructure, non-development of transport infrastructure, ignoring issues of landscaping the territory of the district, etc. The results obtained can be useful in forming priority ways of introducing intelligent solutions into the everyday life of city residents.

Keywords: set-theoretic model; remote sensing data; deep learning, updating data; directions of city intellectualization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Даншина С. Ю., Андрєєв С. М. Формування моделі розумного міста з огляду на динаміку змін міської забудови. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 2 (32). С. 16–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.016>

Danshyna, S., Andriev, S. (2025), "Formation of a smart city model based on the dynamics of changes in urban building", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (32), P. 16–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.016>