

Н. М. Куссуль<sup>1</sup>, А. Ю. Шелестов<sup>1,2</sup>, Б. Я. Яйлимов<sup>1</sup>, Л. Л. Шуміло<sup>1</sup>,  
Г. О. Яйлимова<sup>3</sup>, М. С. Лавренюк<sup>1,2</sup>, Л. М. Колос<sup>1</sup>, Л. В. Підгородецька<sup>1</sup>, Ю. В. Білоконська<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
та Державного космічного агентства України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>3</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## URBAN ATLAS ДЛЯ МІСТ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ВИСОКОГО РОЗРІЗНЕННЯ

*Статтю присвячено розробці сучасної технології на основі відкритих даних, сумісної з сервісом Urban Atlas програми Copernicus. У рамках проекту програми H2020 ERA-PLANET SMURBS (SMart URBan Solutions for air quality, disasters and city growth) було розроблено міський атлас Києва, що став першим містом за межами ЄС, для якого створено такий продукт. Дана технологія базується на використанні безкоштовних супутникових даних спостережень Землі та класифікації земного покриття із використанням методів машинного навчання власної розробки та геостатистичного аналізу щільності забудови за векторною картою міста з відкритих джерел, зокрема даних OSM (Open Street Map). Особливостями запропонованого рішення є використання лише відкритих джерел даних і щорічне оновлення інформації про земний покрив / землекористування в місті. Надалі розроблену технологію можна буде застосувати і до інших міст.*

**Ключові слова:** Urban Atlas, міський атлас, ріст міських агломерацій, супутниковий моніторинг, класифікація земного покриття.

### СТАН ПРОБЛЕМИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

Для вироблення ефективної політики управління ростом міських агломерацій, екологічного моніторингу, безпечної експлуатації інфраструктури, підвищення стандартів якості життя в Європейському Союзі протягом останніх десятиліть здійснюються різноманітні проекти з моніторингу міських територій.

Європейською комісією було реалізовано проект Європейський міський атлас (European Urban Atlas) [1], який є частиною локального

компонента сервісів моніторингу земель Copernicus. Він використовує супутникові зображення для створення точних карт земного покриття з високим просторовим розрізненням для більш ніж 300 великих міських зон та їхніх околиць (понад 100 000 жителів) на 2006 рік у державах-членах ЄС і для більш ніж 800 функціональних міських зон (ФМЗ) і їхніх околиць (понад 50 000 жителів) на 2012 рік. Для 2012 року було створено ще два додаткових шари:

1) шар вуличних дерев (Street Tree Layer) в обраних ФМЗ (в залежності від наявності та придатності супутникових знімків);

2) висота будівель для основних міських районів обраних міст.

© Н. М. КУССУЛЬ, А. Ю. ШЕЛЕСТОВ, Б. Я. ЯЙЛИМОВ,  
Л. Л. ШУМІЛО, Г. О. ЯЙЛИМОВА, М. С. ЛАВРЕНЮК,  
Л. М. КОЛОС, Л. В. ПІДГОРОДЕЦЬКА, Ю. В. БІЛОКОНСЬКА, 2019

Змінені шари було створено у 2012 р. для всіх ФМЗ, охоплених як в 2006 р., так і в 2012 р.

Необхідність відображення шару вуличних дерев пов'язана з тим, що зелена інфраструктура відіграє ключову роль в досягненні цілей політики ЄС у різних взаємопов'язаних екологічних сферах, зокрема сприяє адаптації до зміни клімату та пом'якшенню його наслідків, покращує здоров'я та якість життя, а також сприяє збереженню біорізноманіття. Серед екосистемних послуг, що надаються міськими зеленими насадженнями, — покращення температури, зменшення стоку дощової води і захист від повеней, зберігання вуглецю та контроль забруднення, а також естетичні та рекреаційні послуги [10].

Таким чином, міський атлас призначений для порівняння міст в різних частинах Європи, надає дані для здійснення аналізу транспортної інфраструктури, навколишнього середовища та землекористування. Геопросторові дані можуть бути завантажені разом з картою для кожної покритої ФМЗ разом зі звітом, що містить метадані для відповідної області інтересу. Легенда атласу охоплює міське землекористування, включаючи міську структуру низької щільності, і передбачає розрізнення, яке в 100 разів вище, ніж у покриття CORINE [2]. Більш високе розрізнення у поєднанні з геопросторовою векторною інформацією дозволяє проводити широкий спектр додаткових аналізів, таких як близькість зелених зон або залізничних станцій. Атлас дає точну картину розростання міст за рахунок приміських територій.

Номенклатура атласу 2012 р. включає 27 класів з мінімальною одиницею картографування (Minimum Mapping Unit) 0.25 та 1 га [19].

Європейський міський атлас головним чином базується на комбінації класифікації зображень і візуальної інтерпретації супутникових зображень з високим просторовим розрізненням. Як вхідні дані використовуються багатоспектральні зображення SPOT-5, SPOT-6 та «Formosat-2» з просторовим розрізненням від 2 до 2.5 м. Класи забудови об'єднуються з інформацією про ступінь ущільнення ґрунту, отриманою з шару непроникності високого розрізнення, для більш детального уявлення про щільність міської

структури. На останньому етапі підготовки продукт міського атласу доповнюється і збагачується функціональною інформацією (дорожня мережа, послуги, комунальні послуги тощо) з використанням допоміжних джерел даних, таких як місцеві карти міст або онлайнів картографічні сервіси.

На сьогоднішній день міський атлас охоплює міста 39 країн Європи і створення такого сервісу для міста Києва, а в подальшому — і для інших міст України, сприятиме не лише інтеграції України у міжнародне європейське співтовариство, а й дозволить забезпечити якісно новий рівень інформаційного забезпечення для моніторингу росту міських територій (структури, форми тощо) та навколишнього середовища (якості повітря) з унікальними характеристиками за масштабністю, повторюваністю і оперативністю, що на практиці зможуть використовувати як державні органи управління з метою прийняття обґрунтованих управлінських рішень, так і широка громадськість.

## ВХІДНІ ДАНІ

Як вхідні дані пропонується використовувати безкоштовні і відкриті дані супутників «Sentinel-1/2» [12], призначені спеціально для оперативних потреб програми Copernicus, європейської програми спостереження Землі, яка розпочалася у 2014 р. Програма забезпечує формування величезної кількості даних, а також інформації про підсистеми Землі (земну поверхню, атмосферу, океани) і пов'язані з нею процеси (зміна клімату, надзвичайні ситуації та безпека).

На основі одного знімка неможливо отримати достовірну карту, оскільки оптичні та радарні дані мають свої недоліки. Оптичні знімки часто бувають захмареними, а радарні містять певну зашумленість. Тому як вхідні дані для класифікації пропонується використовувати часовий ряд даних, отриманих з вказаних двох супутників, що зменшує імовірність похибок:

- продукт «Sentinel-1» Level-1 Ground Range Detected (GRD) з просторовим розрізненням  $20 \times 22$  м;
- продукт «Sentinel-2» Level-2 MultiSpectral Instrument (MSI), що містить червоний, зеле-

ний, синій і ближній ІЧ-діапазони з просторовим розрізненням 10 м.

Метадані продукту «Sentinel-1» Level-1 Ground Range Detected (GRD) наведено в табл. 1 [13], а метадані продукту «Sentinel-2» Level-2A MultiSpectral Instrument (MSI) — у табл. 2 [3].

В якості додаткових джерел даних пропонується використовувати дані супутника «Landsat-5», «Landsat-7», «Landsat-8» (просторове розрізнення 30 м).

Для ідентифікації об'єктів рослинного покриву / землекористування пропонується використовувати «Google Earth» [4] та оптичні супутникові дані «Sentinel-2». Для уточнення дорожньої мережі, даних землекористування, рослинного покриву, ідентифікації акваторій використовуються дані OSM [11].

## МЕТОДОЛОГІЯ

Для вирішення завдання побудови міського атласу пропонується виконати такі етапи попередньої обробки даних.

**1. Збір і попередня обробка супутникових та наземних даних.** Для побудови карти класифікації використовувався часовий ряд як радарних («Sentinel-1»), так і оптичних («Sentinel-2») супутникових даних. Оскільки ці супутники ма-

ють різне просторове розрізнення та різну природу (фізику зйомки), вони потребують різної попередньої обробки. Для радарних даних виконуються такі кроки попередньої обробки: корекція координат по орбіті, видалення крайових шумів, радіометричне калібрування з приведенням сигналу до значень коефіцієнта зворотного розсіювання, фільтрація (методом Refined Lee з вікном  $3 \times 3$ ), процедура Range-Doppler Terrain Correction з використанням заданої цифрової моделі рельєфу (SRTM 90 м) і збереження результатів у форматі GeoTIFF. Для оптичних даних виконуються такі кроки попередньої обробки: атмосферна корекція, маскування хмар, збереження результатів у форматі GeoTIFF. Обробка та аналіз супутникових даних проводяться у середовищі Sentinel Application Platform (SNAP) [18].

Ще одним, не менш важливим кроком для побудови карти земного покриву, є формування навчальної та тестової вибірки. Навчальна вибірка використовувалася для навчання нейромережевої моделі та побудови карти земного покриву, а тестова — для визначення достовірності отриманого результату. Одним із шляхів створення достовірної вибірки є проведення наземних досліджень. У випадку, якщо наземні дослідження неможливі, то вибірка формується шляхом фотоінтерпретації (наприклад, по ретроспективних

Таблиця 1. Метадані продукту «Sentinel-1»

Режим зйомки	Тип продукту	Клас розрізнення	Розрізнення дальність $\times$ азимут, м	Крок пікселя дальність $\times$ азимут, м	Кількість спостережень	Еквівалентна кількість незалежних спостережень
IW	GRD	HR	$20 \times 22$	$10 \times 10$	$5 \times 1$	4.4

Примечание: IW — Interferometric Wide-swath mode, GRD — Ground Range Detected, HR — High Resolution

Таблиця 2. Метадані продукту «Sentinel-2»

Тип продукту	Клас розрізнення	Просторове розрізнення, м	Канали	Ширина зображення, км	Формат продукту
MSI	HR	$10 \times 10$	B02 (490 нм) B03 (560 нм) B04 (665 нм) B08 (842 нм)	290	JPEG2000

Примечание: MSI — MultiSpectral Instrument, HR — High Resolution.

даних за попередні роки). Зібрані навчальні та тестові дані зберігаються у вигляді полігонів у векторному форматі.

**2. Класифікація і побудова карти земного покриття.** Наступним етапом є побудова карти земного покриття шляхом класифікації супутникових даних із використанням зібраних навчальних даних. На вхід класифікатора подаються супутникові дані після попередньої обробки та формування навчальної вибірки. Для класифікації пропонується застосовувати ансамбль нейронних мереж прямого поширення, який добре себе зарекомендував у дослідженнях при побудові карт земного покриття [5–9, 14, 15, 17]. Під час навчання нейронної мережі з використанням багатопередповерхового перцептрона функція помилок крос-ентропії зводиться до мінімуму:

$$E(w) = -\ln p(T|w) = -\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_{nk} \ln y_{nk} \rightarrow \min ,$$

де  $w$  — вектор вагових коефіцієнтів,  $T$  — множина, яка складається з вектора спектральних каналів для кожного пікселя та відповідного йому класу  $k$  у навчальній вибірці,  $N$  — кількість полігонів у вибірці,  $K$  — число класів,  $t_{nk}$  — цільові виходи,  $y_{nk}$  — виходи MLP,  $p(\cdot)$  — умовна ймовірність.

На виході кожного класифікатора отримуємо апостеріорну ймовірність приналежності вхідного образу до певного класу. Виходи окремих класифікаторів об'єднуються додаванням, після чого обчислюється середня ймовірність приналежності вхідного образу конкретному класу. Вхідний образ відносять до класу з максимальною апостеріорною ймовірністю:

$$k^* = \arg \max_{k=1, K} p_k^e, \quad p_i^e = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_i^l ,$$

де  $k^*$  — клас, до якого належить вхідний образ ансамблю класифікаторів,  $p_i^e$  — апостеріорна ймовірність належності класу для ансамблю,  $p_i^l$  — апостеріорна ймовірність належності класу для кожного класифікатора MLP,  $L$  — кількість класифікаторів у ансамблі,  $K$  — кількість класів.

Запропонована методологія забезпечує великомасштабну класифікацію земного покриття:

штучні об'єкти, високі зелені насадження, низькі зелені насадження, водні об'єкти.

Після того як карту класифікації вже побудовано, її перевіряють на тестових даних шляхом побудови матриці невідповідності. При цьому кожен з класів має три точності: точність користувача, точність виробника та точність рівня F1.

**3. Створення векторного шару з кварталами міста.** Для створення векторного шару із кварталами міста за основу були взяті відкриті дані з OSM для міста Києва, які були удосконалені, деталізовані та відредаговані за допомогою ГІС-систем та додаткових відкритих джерел, таких як Google Earth та ін.

**4. Створення векторної карти з відсотком забудов і відсотком озеленення міста.** Наступний етап обробки даних передбачає процедуру визначення відсотка забудови та озеленення кожного з кварталів міста. Для цього використовується карта земного покриття та векторний шар із кварталами міста, що були отримані на попередніх етапах обробки.

Для визначення відсотка заповнення кожного кварталу певним класом земного покриття використовуємо формулу

$$\forall k = \overline{1, QN}, n = \overline{1, CN}: \quad P_n^k = \frac{\sum_{i,j} \{ \overline{p_{ij}} | \overline{p_{ij}} = n \wedge p_{ij} \in Q_k \}}{n \cdot \sum_{i,j} \{ p_{ij} | p_{ij} \in Q_k \}} \cdot 100,$$

де  $QN$  — кількість кварталів,  $CN$  — кількість класів земного покриття на карті, отримана в результаті навчання нейронної мережі (у нашому випадку чотири класи: штучні об'єкти, водні об'єкти, високі та низькі зелені насадження),  $P_n^k$  — відсоток заповнення класом  $n$  кварталу  $k$ ,  $p_{ij}$  — піксель, що лежить на перетині  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпчика,  $\overline{p_{ij}}$  — значення класу у пікселі, що лежить на перетині  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпчика,  $Q_k$  — множина всіх пікселів у  $k$ -му кварталі.

З використанням даної формули для такого класу земного покриття, як штучні об'єкти, обчислюється відсоток забудов по кожному з кварталів міста Києва. Поєднавши класи високих та низьких зелених насаджень в один клас та використавши цю саму формулу, отримаємо відсоток озеленення для кожного з обраних кварталів.



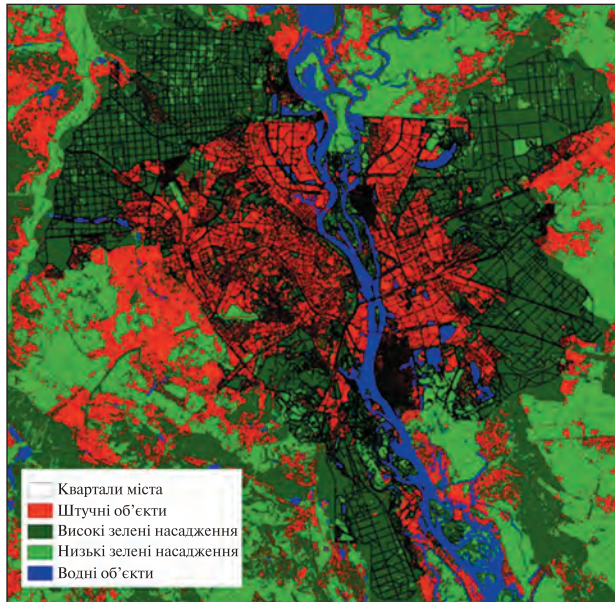


Рис. 1. Карта класифікації для м. Києва на основі супутникових даних «Sentinel-1», «Sentinel-2», 2018 р.

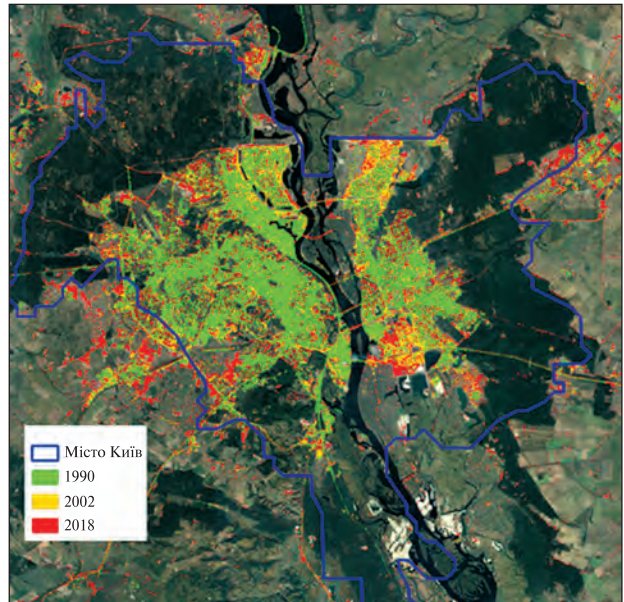


Рис. 2. Ріст агломерації м. Києва з 1990 по 2018 рр.

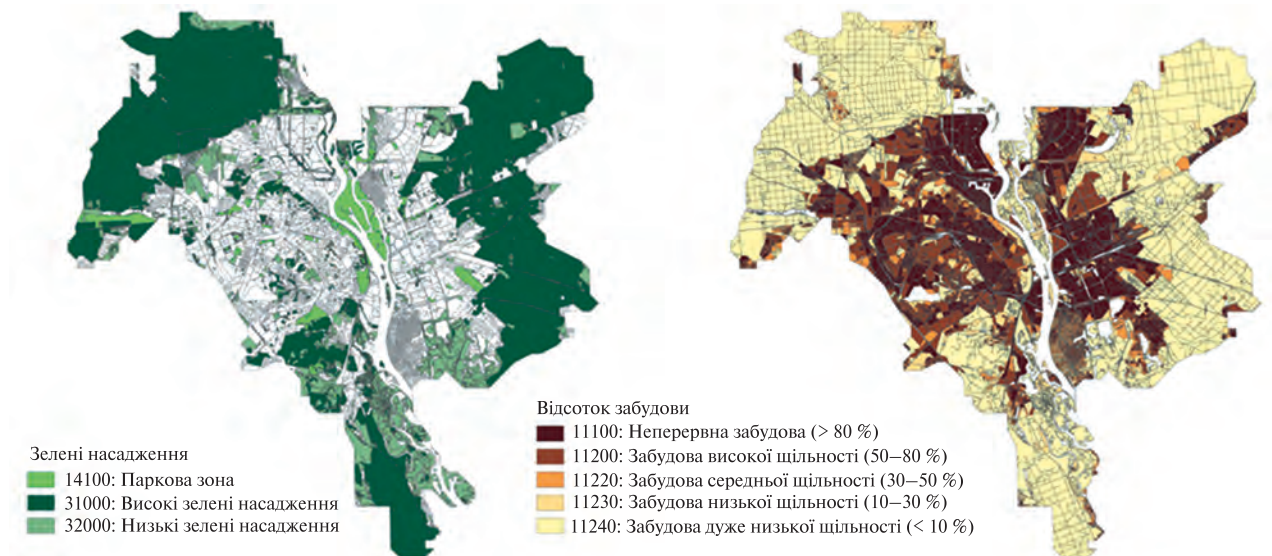


Рис. 3. Відсоток забудови міських кварталів м. Києва, 2018 р.

Запропоновану методологію було застосовано для створення векторних карт міського атласу для території міста Києва.

### АПРОБАЦІЯ МЕТОДОЛОГІЇ

В рамках міжнародного проекту SMURBS Київ є одним з пілотних міст, для яких ведеться роз-

робка відповідних інструментів та інтелектуальних рішень для реалізації основної концепції «Розумного міста» шляхом використання даних дистанційного моніторингу земної поверхні та вирішення таких важливих завдань, як моніторинг забруднення повітря (оцінювання якості повітря), росту міських агломерацій і моніто-



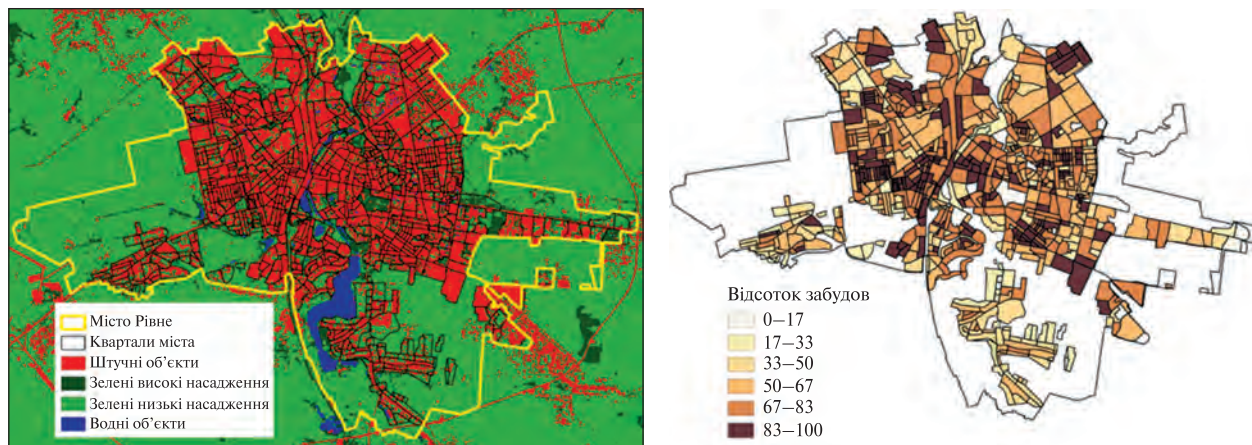


Рис. 4. Карта земного покриття для м. Рівне (зліва), відсоток забудови кварталів м. Рівне (справа); 2018 р.

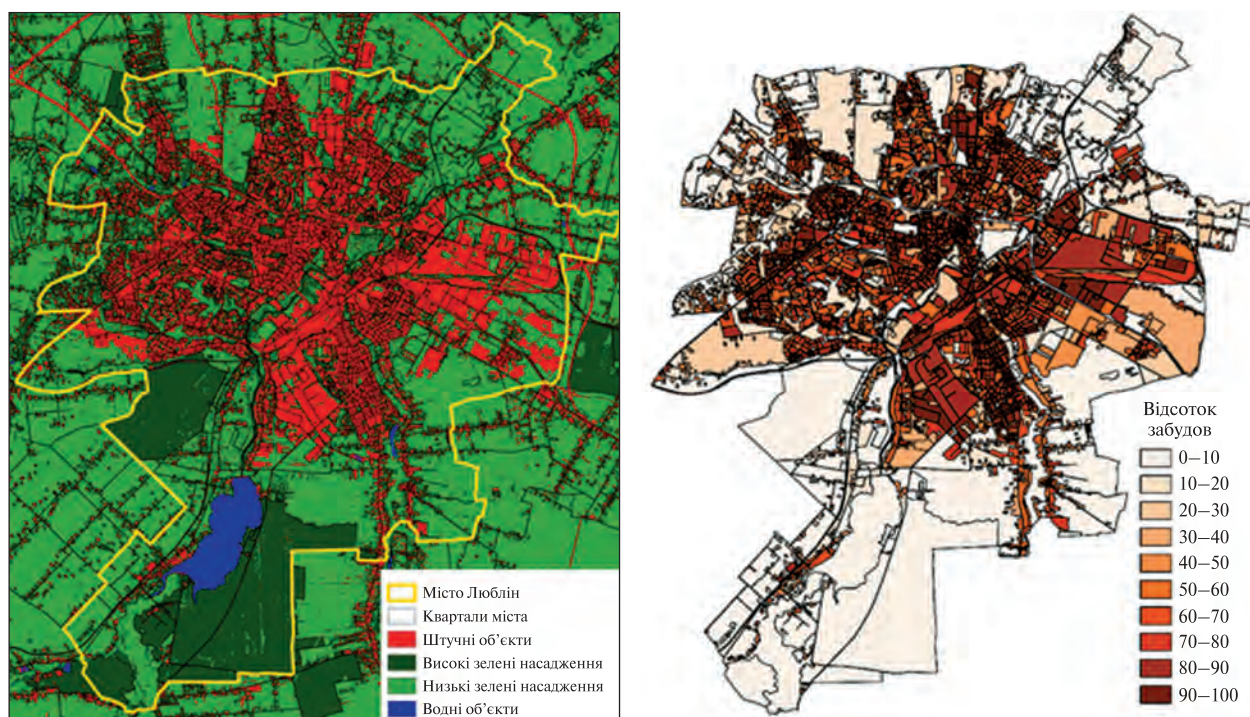


Рис. 5. Карта земного покриття для м. Люблін (зліва), відсоток забудови кварталів м. Люблін (справа); 2018 р.

рингу надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру. Авторами були проведені роботи з дослідження зростання агломерацій на основі супутникових даних «Sentinel-2» та «Sentinel-1».

З використанням часового ряду супутникових даних і запропонованої методології для території міста Києва було створено карти класифікації з

10-м просторовим розрізненням (рис. 1) з 2015 по 2018 рр. Точність цих карт становить близько 95 %. Для 2018 р. точність штучних об'єктів становить 97.3 %, високих зелених насаджень — 98.3 %, низьких зелених насаджень — 95.4 %, водних об'єктів — 99.5 %. Виникнення похибок пов'язане із просторовим розрізненням супутників, оскільки багато об'єктів у містах можуть

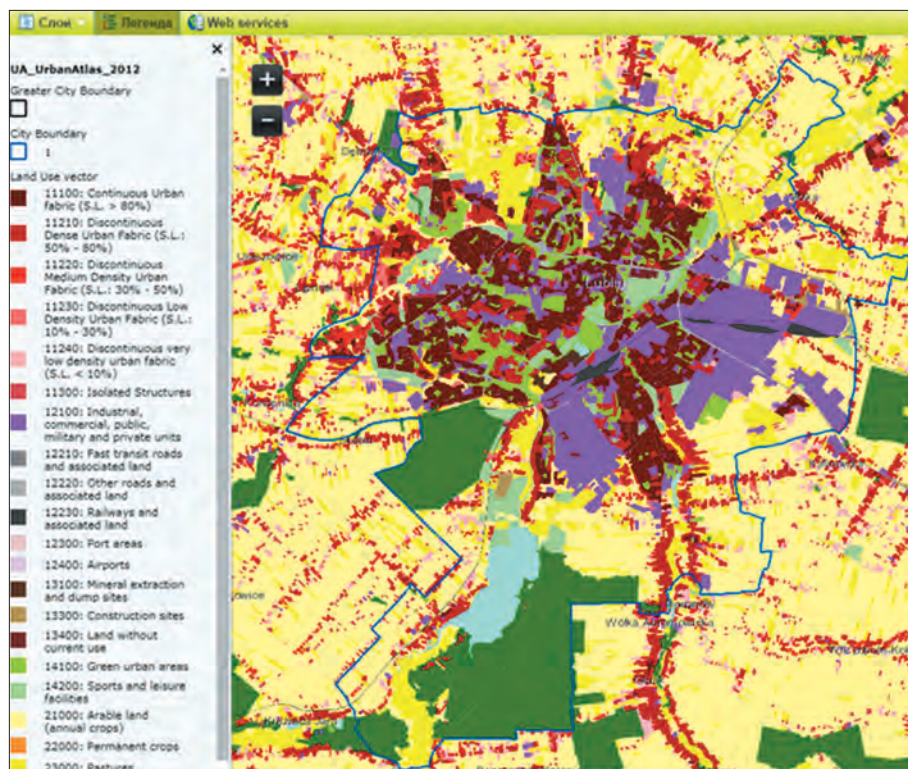


Рис. 6. Відсоток забудови кварталів м. Люблін, 2012 р., Urban Atlas [1]

мати менші розміри відносно пікселя, звідки і виникає певна похибка.

На основі ретроспективних супутникових даних «Landsat-5», «Landsat-6», «Landsat-7» створені карти земного покриття для 1990 і 2002 рр., за допомогою яких було побудовано карту росту агломерації м. Києва з 1990 по 2018 рр. (рис. 2). За допомогою векторного шару кварталів міста, отриманого на основі OSM і відредагованого для більшої деталізації, у поєднанні з картою класифікації було створено інформаційні продукти, що містять дані про відсоток озеленення та забудови для кожного з міських кварталів (рис. 3) [16].

Створені карти є сумісними з сервісом Copernicus Urban Atlas, що містить інформацію лише за 2006 і 2012 рр. Перевагою запропонованої технології моніторингу росту міста є використання безкоштовних супутникових даних з частою періодичністю зйомки. Це дозволяє протягом кожного року створювати нові продукти і здійснювати моніторинг основних змін з урахуванням екологічних аспектів.

Ще одним із пілотних міст, на яких була випробувана дана технологія стало м. Рівне. На рис. 4 зображена карта земного покриття та карта з відсотками забудови у кварталах м. Рівне.

З метою порівняння розроблену методологію також було апробовано при створенні карти земного покриття м. Люблін (Польща). Як і для м. Київ, було створено продукт з відсотком забудови кожного з кварталів (рис. 5). Векторні дані з межами кварталів були отримані з сервісу Urban Atlas [1]. Якщо порівняти отриманий результат з продуктом Urban Atlas, стає очевидним, що в 2018 р. щільність забудови в центральній частині збільшилася порівняно з 2012 р. (рис. 6).

## ВИСНОВКИ

Запропонована технологія створення продуктів для моніторингу росту міських агломерацій має значні переваги в порівнянні з наявними. Зокрема, вона базується на використанні безкоштовних даних з відкритих джерел і дозволяє кожного року оновлювати геопросторові продукти.



Впровадження розробленої технології Urban Atlas для міст України, що є сумісною з сервісом Copernicus та випробувана на пілотному місті Київ та інших містах (м. Рівне, м. Люблін), дозволить державним адміністраціям різних рівнів використовувати карти землекористування міських районів для аналізу стану міста в цілому та його окремих частин. Відкриються нові можливості планування подальшого розвитку міста з точки зору росту агломерації, розміщення зелених зон, оцінки та планування ступеня комфортності проживання у різних районах тощо.

Розроблений продукт було впроваджено в громадській організації Kyiv Smart City в межах угоди про співпрацю між Департаментом ІКТ Київської міської державної адміністрації, Інститутом космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України та громадською організацією «Смарт Сіті Хаб». На наступних етапах робіт планується розробити та впровадити даний продукт також для інших міст України.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Copernicus Land Monitoring Service — Urban Atlas. *European Environment Agency*. URL: [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas) (Last accessed 18 July 2018).
2. CORINE Land Cover nomenclature conversion to Land Cover Classification system. URL: [https://land.copernicus.eu/eagle/files/eagle-related-projects/pt\\_clc-conversion-to-fao-lccs3\\_dec2010](https://land.copernicus.eu/eagle/files/eagle-related-projects/pt_clc-conversion-to-fao-lccs3_dec2010) (Last accessed 18 July 2018).
3. Earth.esa.int. Sentinel-2 MSI — *Technical Guide — Sentinel Online*. URL: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi> (Last accessed 18 July 2019).
4. Google Earth. URL: <https://www.google.com/earth/> (Last accessed 18 July 2019).
5. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017. **14**(5). P. 778—782. doi:10.1109/lgrs.2017.2681128.
6. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Butko I., Skakun S. Deep learning approach for large scale land cover mapping based on remote sensing data fusion. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2016.7729043.
7. Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A. Deep Learning Crop Classification Approach Based on Sparse Coding of Time Series of Satellite Data. *IGARSS 2018 — 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/igarss.2018.8518263.
8. Lavreniuk M., Kussul N., Shelestov A., Dubovyk O., Low F. Object-Based Postprocessing Method for Crop Classification MAPS. *IGARSS 2018 — 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/igarss.2018.8519199.
9. Lavreniuk M., Kussul N., Shelestov A., Yailymov B., Oliinyk T., Kostecky A. Validation methods for regional retrospective high resolution land cover for Ukraine. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2016.7730174.
10. Ong B. L. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2003. **63**, No 4. P. 197—211.
11. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (Last accessed 18 July 2019).
12. Scihub.copernicus.eu. *Open Access Hub*. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Last accessed 18 July 2019).
13. Sentinel.esa.int. *IW GRD Resolutions — Sentinel-1 SAR Technical Guide — Sentinel Online*. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected/iw> (Last accessed 18 July 2019).
14. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Large scale crop classification using Google earth engine platform. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2017.8127801.
15. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*. 5. doi:10.3389/feart.2017.00017.
16. Shelestov A., Raudner A., Kolotii A., Marinosci I., Attanasio A., Munaf M., Lavreniuk M., Speyer O., Yailymov B., Kussul N. Urban Growth Services Within ERA-PLANET SMURBS Project. *Living Planet Symposium*. Milan, Italy. 2019.
17. Skakun S. V., Basarab R. M. Reconstruction of Missing Data in Time-Series of Optical Satellite Images Using Self-Organizing Kohonen Maps. *J. Automation and Information Sciences*. 2014. **46**(12). P. 19—26. doi:10.1615/jautomatinfscien.v46.i12.30.
18. SNAP. STEP. (n.d.). URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (Last accessed 18 July 2019).
19. “Urban Atlas.” *Urban Atlas — Copernicus Land Monitoring Service*. URL: [land.copernicus.eu/local/urban-atlas/view](http://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/view) (Last accessed 26 Mar. 2019).

Стаття надійшла до редакції 10.07.2019



## REFERENCES

1. Copernicus Land Monitoring Service — Urban Atlas. *European Environment Agency*. URL: [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas) (Last accessed 18 July 2018).
2. CORINE Land Cover nomenclature conversion to Land Cover Classification system (2018). URL: [https://land.copernicus.eu/eagle/files/eagle-related-projects/pt\\_clc-conversion-to-fao-lccs3\\_dec2010](https://land.copernicus.eu/eagle/files/eagle-related-projects/pt_clc-conversion-to-fao-lccs3_dec2010) (Last accessed 18 July 2018).
3. Earth.esa.int. Sentinel-2 MSI — *Technical Guide* — *Sentinel Online*. URL: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi> (Last accessed 18 July 2019).
4. Google Earth. URL: <https://www.google.com/earth/> (Last accessed 18 July 2019).
5. Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. (2017). Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **14**(5), 778–782. doi:10.1109/lgrs.2017.2681128.
6. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Butko I., Skakun S. (2016). Deep learning approach for large scale land cover mapping based on remote sensing data fusion. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2016.7729043.
7. Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A. (2018). Deep Learning Crop Classification Approach Based on Sparse Coding of Time Series of Satellite Data. *IGARSS 2018 — 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/igarss.2018.8518263.
8. Lavreniuk M., Kussul N., Shelestov A., Dubovyk O., Low F. (2018). Object-Based Postprocessing Method for Crop Classification MAPS. *IGARSS 2018 — 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/igarss.2018.8519199.
9. Lavreniuk M., Kussul N., Shelestov A., Yailymov B., Oliynyk T., Kostetskyi A. (2016). Validation methods for regional retrospective high resolution land cover for Ukraine. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2016.7730174.
10. Ong B. L. (2002). Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning*, **63** (4), 197–211.
11. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (Last accessed 18 July 2019).
12. SciHub.copernicus.eu. *Open Access Hub*. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Last accessed 18 July 2019).
13. Sentinel.esa.int. *IW GRD Resolutions* — *Sentinel-1 SAR Technical Guide* — *Sentinel Online*. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected/iw> (Last accessed 18 July 2019).
14. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. (2017). Large scale crop classification using Google earth engine platform. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2017.8127801.
15. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, **5**. doi:10.3389/feart.2017.00017.
16. Shelestov A., Raudner A., Kolotii A., Marinosci I., Attanasio A., Munafo M., Lavreniuk M., Speyer O., Yailymov B., Kussul N. (2019). Urban Growth Services Within ERA-PLANET SMURBS Project. *Living Planet Symposium*. Milan, Italy.
17. Skakun S. V., Basarab R. M. (2014). Reconstruction of Missing Data in Time-Series of Optical Satellite Images Using Self-Organizing Kohonen Maps. *J. Automation and Information Sciences*, **46**(12), 19–26. doi:10.1615/jautomatinfscien.v46.i12.30.
18. SNAP. STEP. (n.d.). URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (Last accessed 18 July 2019).
19. “Urban Atlas”. *Urban Atlas — Copernicus Land Monitoring Service*. URL: [land.copernicus.eu/local/urban-atlas/view](http://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/view) (Last accessed 26 Mar. 2019).

Received 10.07.2019

Н. Н. Куссуль<sup>1</sup>, А. Ю. Шелестов<sup>1,2</sup>, Б. Я. Яйлимов<sup>1</sup>,  
Л. Л. Шумило<sup>1</sup>, А. А. Яйлимова<sup>3</sup>, Н. С. Лавренюк<sup>1,2</sup>,  
Л. Н. Колос<sup>1</sup>, Л. В. Підгородецька<sup>1</sup>, Ю. В. Білоконська<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

<sup>3</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

#### URBAN ATLAS ДЛЯ ГОРОДОВ УКРАИНЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Статья посвящена разработке современной технологии на основании открытых данных, совместимой с сервисом Urban Atlas программы Copernicus. В рамках выполнения проекта программы H2020 ERA-PLANET SMURBS (SMart URBan Solutions for air quality, disasters and city growth) был разработан городской атлас Киева, который стал первым городом за пределами ЕС, для которого создан такой продукт. Данная технология базируется на использовании бесплатных спутниковых данных наблюдения Земли и классификации земного покрова с использованием методов машинного обучения собственной разработки и геостатистического анализа плотности застройки по векторной карте города из открытых источников, в частности данных OSM (Open Street Map). Особенности предлагаемого решения являются использование только открытых источников данных и ежегодное обновление информации о земном покрове / землепользовании в городе. В дальнейшем разработанная технология может быть применена и для других городов.

**Ключевые слова:** Urban Atlas, городской атлас, рост городских агломераций, спутниковый мониторинг, классификация земного покрова.

N. M. Kussul<sup>1</sup>, A. Yu. Shelestov<sup>1,2</sup>, B. Ya. Yailymov<sup>1</sup>,  
L. L. Shumilo<sup>1</sup>, H. O. Yailymova<sup>3</sup>, M. S. Lavreniuk<sup>1,2</sup>,  
L. M. Kolos<sup>1</sup>, L. V. Pidgorodetska<sup>1</sup>, Y. V. Bilokonska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

#### URBAN ATLAS FOR UKRAINIAN CITIES ON THE BASIS OF HIGH-RESOLUTION SATELLITE DATA

The issues addressed in the article relate to the development of modern technology based on open source data compatible with the Copernicus Urban Atlas service. The city atlas of Kyiv was developed within the framework of the project H2020 ERA-PLANET SMURBS (SMART URBan Solutions for air quality, disasters, and city growth). Kyiv became the first city outside the EU for which such a product was created. This technology is based on free satellite data of Earth observations and land cover classification using in-house machine learning methods and geostatistical analysis of building density from open-source vector city maps, including OSM (Open Street Map) data. The distinctive features of the proposed solution are the use of open-source data only and the annual updating of city land cover / land use information. In the future, the developed technology can be applied to other cities.

**Keywords:** Urban Atlas, city atlas, growth of urban agglomerations, satellite monitoring, land cover classification.