

А. Ю. ШЕЛЕСТОВ¹, А. М. ЛАВРЕНЮК¹, Б. Я. ЯЙЛИМОВ², Г. О. ЯЙЛИМОВА¹

¹ Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна

² Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, Україна

ЦИФРОВІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ МІСТ: URBAN ATLAS НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ ДАНИХ ДЛЯ МІСТ УКРАЇНИ

Україна є асоційованим членом Європейського союзу і в найближчі роки очікується, що всі дані та сервіси, якими вже користуються країни ЄС, стануть доступними і для України. Відсутність якісних національних продуктів по оцінці розвитку та плануванню росту міст призводить до неможливості оцінювання впливу міст на екологію та здоров'я людей. Перші кроки до створення такого роду продуктів для території міст України були розпочаті в межах Європейського проєкту «Smart Urban Solutions for air quality, disasters and city growth» (SMURBS), в межах якого фахівці Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України отримали перший міський атлас для міста Києва, який був подібний до Європейського. Проте, отриманий продукт мав значно менше типів землекористування, аніж Європейський і тому постало питання покращення розробленої технології. Основною метою роботи є аналіз існуючої технології побудови європейського сервісу Urban Atlas та її покращення шляхом розробки уніфікованого алгоритму побудови міського атласу з використанням всіх наявних відкритих геопросторових та супутникових даних для міст України. Для розробки такої технології за основу взята власна технологія класифікації часових рядів супутникових даних з просторовим розрізненням 10 метрів для побудови карти земного покриву, а також алгоритм уніфікації відкритих геопросторових даних до міських атласів Copernicus. Розроблена в роботі технологія побудови міського атласу, що базується на інтелектуальній моделі класифікації земного покриву, може бути поширена і на інші міста України. В подальшому створення такого продукту на основі даних за різні роки дозволить оцінити зміни землекористування та здійснювати прогноз щодо подальшого розширення міст. Запропонована інформаційна технологія побудови міського атласу буде корисною для оцінки динаміки росту міст та тісно пов'язаних з цим соціальних та економічних показників їх розвитку. На її основі можна також оцінити індекси досягнення цілей сталого розвитку, такі як 11.3.1 «Співвідношення темпів споживання землі та темпів приросту населення». В роботі показано, що отриманий міський атлас для міста Києва має високий рівень якості та має порівнювані класи землекористування з Європейськими продуктами. Це свідчить, що такий продукт може використовуватися у державних службах з питань прийняття управлінських рішень.

Ключові слова: Urban Atlas; Smart City; розбудова міста; цілі сталого розвитку; індикатор 11.3.1; Copernicus.

Вступ

Розуміння динаміки змін земного покриву та можливість прогнозувати використання земель є важливим джерелом інформації для прийняття управлінських рішень. Тому в останні роки активно розвиваються програми і проєкти цифровізації міст. В Європі дана проблема була вирішена Європейським космічним агентством, яке спільно з французькою компанією Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) створило геопросторовий продукт Copernicus Urban Atlas [1]. На даний момент європейський сервіс Urban Atlas надає набір даних про землекористування для всіх міст Європи з населенням понад 100 000 мешканців. Використання даних Urban Atlas (міського атласу) в поєднанні із офіцій-

ними статистичними даними має великий потенціал для розуміння динаміки урбанізації землі.

Аналогічний проєкт цифровізації і оцінки росту міст розроблений Нью-Йоркським університетом у партнерстві з Програмою ООН Хабітат (United Nations Human Settlements Programme) та Інститутом земельної політики Лінкольна. Ці установи ініціювали багатозадачну наукову роботу з моніторингу кількісних та якісних аспектів глобальної міської експансії [2]. В «Atlas of Urban Expansion» представлена глобальна вибірка з 200 міст, в кожному з яких у 2010 році проживало більше 100 000 людей. Метою проєкту є формування наукового розуміння того, як збільшуються міста у світі. Із України як тестові міста потрапили Рівне та Миколаїв (Рис. 1), проте створені продукти не настільки деталізовані у порівнянні із Copernicus Urban Atlas.

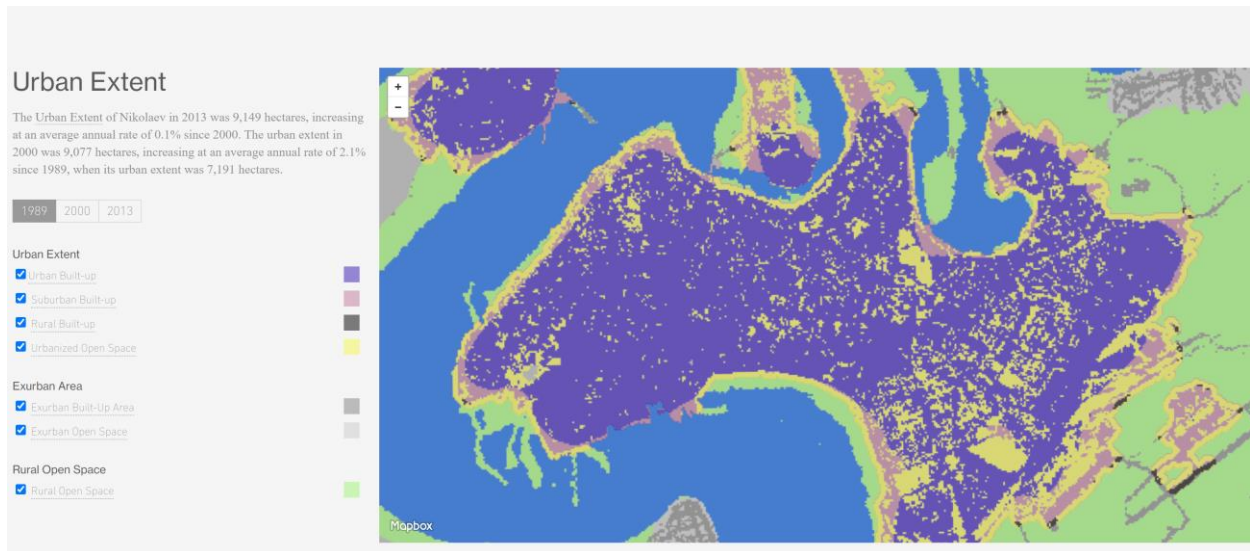


Рис. 1. Приклад м. Миколаїв (Atlas of Urban Expansion)

В країнах, що розвиваються, особливо для промислових міст зі значним ростом населення, виникає неконтрольована урбанізація, що негативно впливає на екосистему в цілому (джерела води, клімат, рослинність, ґрунт, ін.) [3]. На Рис. 2 наведено ілюстрацію країн та міст, для яких існують міські атласи за даними Copernicus, проте для міст України такого продукту поки не існувало. Наявність узгоджених наборів даних про землекористування в міських умовах для України на сьогодні є проблемою. Через відсутність оперативних геопросторових даних ускладнюється можливість моніторингу росту міст.

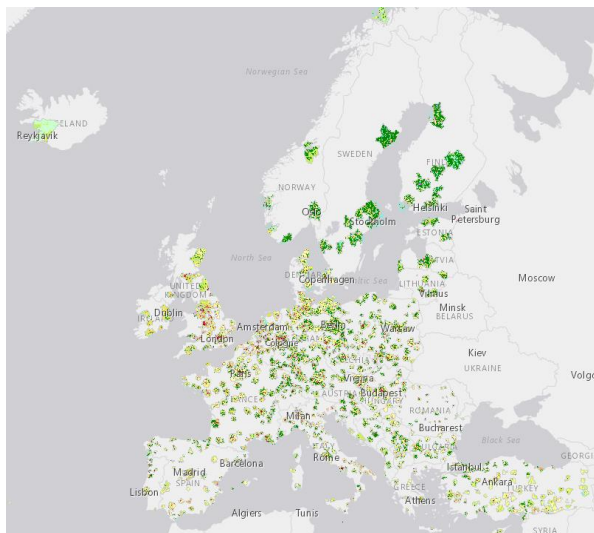


Рис. 2. Copernicus Urban Atlas для 2018 року [1]

Для систематизації і поширення найкращих практик цифровізації розвитку міст в межах програми Horizon 2020 ERA-Planet було започатковано проєкт SMURBS. Основною метою проєкту

SMURBS [4] є збір найкращих практик для просування концепції «розумного міста» та її використання для якомога більшої кількості міст шляхом інтеграції супутникових спостережень для підвищення стійкості навколишнього середовища та суспільства до антропогенного впливу. Проєкт SMURBS охоплює три основних напрямки: якість повітря, ріст міських агломерацій, природні або техногенні катастрофи та їх наслідки. До складу консорціуму проєкту входять такі країни, як Греція, Італія, Франція, Іспанія, Німеччина, Швейцарія, Словенія, Чехія, Румунія, Фінляндія, а також Україна, яку представляє Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України.

Одним із вагомих результатів зі сторони України в межах цього проєкту стало розроблення технології отримання міського атласу на основі відкритих даних, а також побудова першого міського атласу Києва [5] з номенклатурою класів земної поверхні, що відповідає Copernicus Urban Atlas [6]. В основу розробленої інформаційної технології побудови Urban Atlas покладено авторську методологію створення карт земного покриття [7], що ґрунтується на методах глибокого навчання для супутникових даних Sentinel-1 та 2 програми Copernicus, а також векторних даних про квартали міста. Для розв'язання прикладних задач на сьогодні неможливо обійтися без штучного інтелекту [8, 9]. Огляд методів класифікації, які використовуються для створення карт земного покриття наведено у роботі [10]. Враховуючи великі об'єми супутникових даних, що використовуються для класифікації типів земного покриття, цю інформаційну технологію необхідно реалізовувати на основі високопродуктивних обчислень, наприклад в хмарному середовищі, або в Grid [11].

Важливим етапом створення будь-яких продуктів на основі дистанційних даних, і цифрових моделей міст або міського атласу зокрема, є їх валідація або оцінка якості. ІКД НАНУ та ДКАУ та НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» запропонували методологію валідації існуючих карт земного покриття [5], зокрема Global Human Settlement Layer (GHSL) [12]. Показано, що глобальні сервіси, які надають карти земного покриття, є не достатньо точними, і для якісного аналізу земного покриття виникає потреба удосконалення методології визначення типів земного покриття і землекористування для міст, використовуючи дані більш високого просторового розрізнення.

Враховуючи те, що Україна потребує якісної та достовірної інформації щодо росту міських агломерацій, а існуючі інформаційні технології не застосовні для України через відсутність необхідних пропріетарних даних, необхідно розвивати і удосконалювати методологію для всієї України, ґрунтуючись на дистанційних даних з відкритих джерел, зокрема програми Copernicus.

В наступних розділах ми проаналізуємо технологію побудови європейського сервісу Urban Atlas та запропонуємо методологію її адаптації для умов України з метою отримання інформаційних продуктів, гармонізованих з Європейськими.

Copernicus Urban Atlas

Європейський міський атлас Copernicus Urban Atlas є одним із продуктів сервісу моніторингу земель, що надає надійні, взаємопорівняні карти землекористування з високим просторовим розрізненням для понад 300 великих міських зон та їх околиць станом на 2006 р. в країнах ЄС та для 800 функціональних міських зон (ФМЗ) та їх околиць станом на 2012 та 2018 рр.

Перелік типів земного покриття та землекористування міського атласу взято із типів земного покриття CORINE (Coordination of Information on the Environment). Він включає в себе 27 класів, що розподілені на 5 тематичних груп: штучні об'єкти, сільськогосподарські землі, природні на напівприродні території, заболочена місцевість та вода. Мінімальну одиницю картографування за методологією побудови Urban Atlas, розділено на два класи: «Штучні поверхні» (0,25 га) та «Не штучні поверхні» (1 га).

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 Urban Atlas доповнюється і збагачується функціональною інформацією (дорожня мережа, послуги, комунальні по-

слуги і т. д.) з використанням допоміжних джерел даних, таких як місцеві карти міст або онлайнві картографічні сервіси.

Міський атлас є інструментом порівняння землекористування найбільших європейських міст. Він використовує супутникові знімки для створення надійних та порівняних карт міської території з високим просторовим розрізненням. Високе просторове розрізнення дозволяє вирішувати широкий спектр додаткових задач, наприклад аналізувати віддаленість зелених насаджень або вокзалів до зони інтересу. Також, міський атлас дає набагато точнішу картину розростання міст на околицях міських зон, надає дані для аналізу, що стосуються транспорту, землекористування та довкілля. Зокрема, аналіз та прогнозування щільності забудови, зелених зон міських районів та температурної карти є непрямим методом оцінки якості повітря в тому чи іншому районі міста.

Для побудови Copernicus Urban Atlas застосовуються алгоритми класифікації та кластеризації супутникових даних з просторовим розрізненням не менше ніж 5 м. Для валідації отриманих карт земного покриття на основі незалежних даних використовується матриця невідповідності. Для території України такий продукт, на жаль, не надається, через відсутність даних високого розрізнення, які є платними. Тому виникає потреба в розробці технології для отримання інформаційного продукту на основі безкоштовних супутникових даних. Важливо, щоб цей продукт був гармонізований з Європейським сервісом Urban Atlas для можливості співставлення і створення на його базі інформаційних продуктів більш високого рівня.

Адаптація існуючої методології побудови міського атласу для України

Пропонується адаптувати методологію побудови Urban Atlas для Києва шляхом розширення доступних класів та повноцінного використання відкритих даних, таких як OpenStreetMap (OSM). Побудова карт Urban Atlas включає в себе послідовність дій зі збору супутникових даних, їх попередньої обробки, процесу побудови карт класифікації та поєднання геопросторових шарів між собою (Рис. 3) [7]. Перший етап полягає в побудові карти земного покриття, на основі якої рахується відсоток забудови та зелених насаджень. Навчання класифікатора відбувається до тих пір, поки не буде досягнуто задовільної точності (в нашому випадку це вище 90 % за необхідними нам класами: штучні об'єкти, ліси та необроблювані землі). Наступний крок – створення кварталів міста та уніфікація класів OSM з класами Copernicus Urban Atlas. У таблиці наведено співставлення наявних категорій даних з

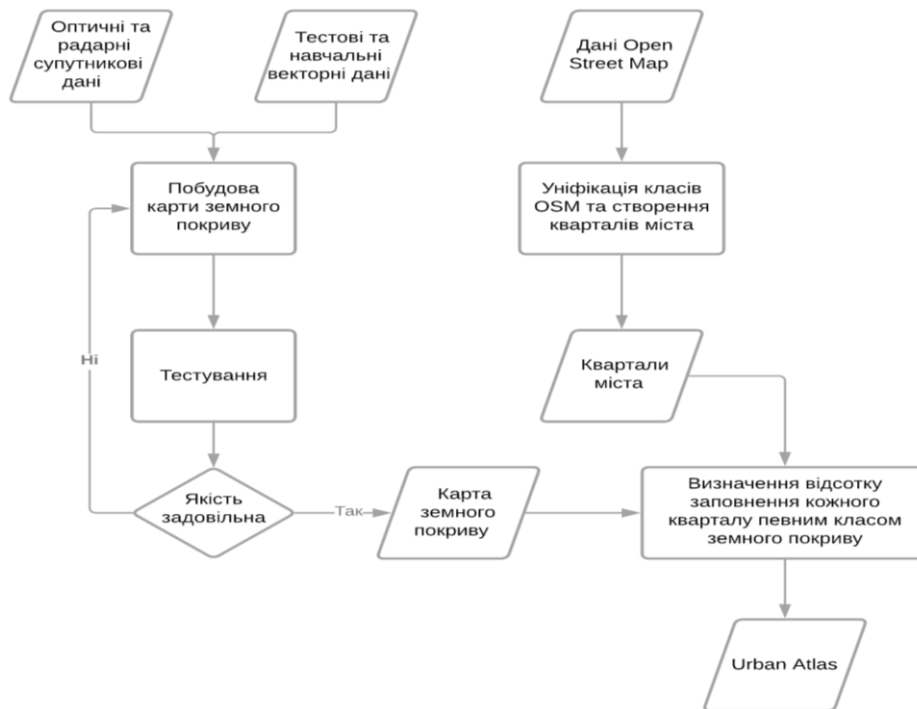


Рис. 3. Схема побудови міського атласу для України

відкритого джерела OSM із переліком класів Copernicus Urban Atlas (табл. 1). Злиття отриманих кварталів міста та карти земного покриття дає мож-

ливість визначити відсоток забудов та зелених насаджень в межах кожного з кварталів міста, і як результат отримуємо міський атлас.

Таблиця 1

Співставлення класів типів земного покриття для Києва та його околиць даних OSM з класами Copernicus Urban Atlas

Шар в OSM для України станом на 17 січня 2021	Співставлення з класом Copernicus Urban Atlas
Industrial, retail, military	12100: Промислові, комерційні, державні, військові та приватні підрозділи
Fuel, parking	12220: Інші дороги та суміжні землі (вздовж доріг motorway та trunk)
Primary, secondary	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 10 метрів)
Motorway, trunk	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 12 метрів)
Pedestrian	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 2 метрів)
Residential	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 3 метрів)
Primary_link, secondary_link, tertiary_link	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 4 метрів)
Tertiary, unclassified, trunk_link motorway_link	12220: Інші дороги та суміжні землі (з буфером 5 метрів)
Rail	12230: Залізниці та суміжні землі (з буфером 4 метрів)
Ferry_terminal	12300: Зони портів
Airport, airfield	12400: Аеропорти
Graveyard, park, cemetery	14100: Зелені міські території
Recreation_ground, golf_course, stadium, camp_site, theme_park, track, picnic_site, zoo	14200: Об'єкти спорту та відпочинку
Farmland	21000: Рілля (однорічні культури)
Wastewater_plant	24000: Складні та змішані схеми вирощування
Orchard	25000: Сади
Forest, scrub	31000: Ліси
Meadow, grass, heath	32000: Трав'яниста рослинність
Quarry, cliff, beach	33000: Відкриті землі з невеликою або відсутньою рослинністю
Wetland	40000: Болота
Water, reservoir, river, riverbank	50000: Водні об'єкти

Всі інші об'єкти, що не зазначені в цій таблиці, не використовувалися для побудови міського атласу

Створення продукту Urban Atlas для міст України

Необхідним кроком для побудови міського атласу, подібного до Copernicus Urban Atlas, є формування кварталів, в межах яких буде оцінено відсоток забудови. Оскільки цифрової карти кварталів міста Києва не існує, їх пропонується формувати з використанням векторного шару доріг в OSM. На рис. 4 наведені дані з відкритого джерела OSM, які гармонізовані до класів Copernicus Urban Atlas. Вважати мемо, що замкнена частина міста, яка з усіх сторін оточена дорогами, є кварталом міста. Для оцінки відсотку забудови будемо використовувати карту класифікації типів земного покриву і землекористування міста Києва, побудовану на основі нейромережевих моделей [13].

Для визначення відсотку забудови в межах кварталів використовуємо карту класифікації, одним

із класів якої є штучні об'єкти та забудови. Побудова карти класифікації високого просторового розрізнення, як визначено в методології Європейських міських атласів, для території України потребує доступу до комерційних джерел супутникових даних, що наразі є проблематичним. Дані аерофотозйомки з високим просторовим розрізненням для деяких міст України існують, проте питання постає про термін придатності цих даних. Адже для повноцінного якісного моніторингу росту міста потрібно оновлювати карту земного покриву для міста як мінімум раз на рік. Європейський Copernicus Urban Atlas оновлюється раз на шість років, що пов'язано із складністю створення такого продукту, використовуючи дані із високим просторовим розрізненням.

В перспективі покращення якості міського атласу можливе за використання супутникових даних більш високого просторового розрізнення, наприклад Planet з просторовим розрізненням 3 м (Рис. 5).

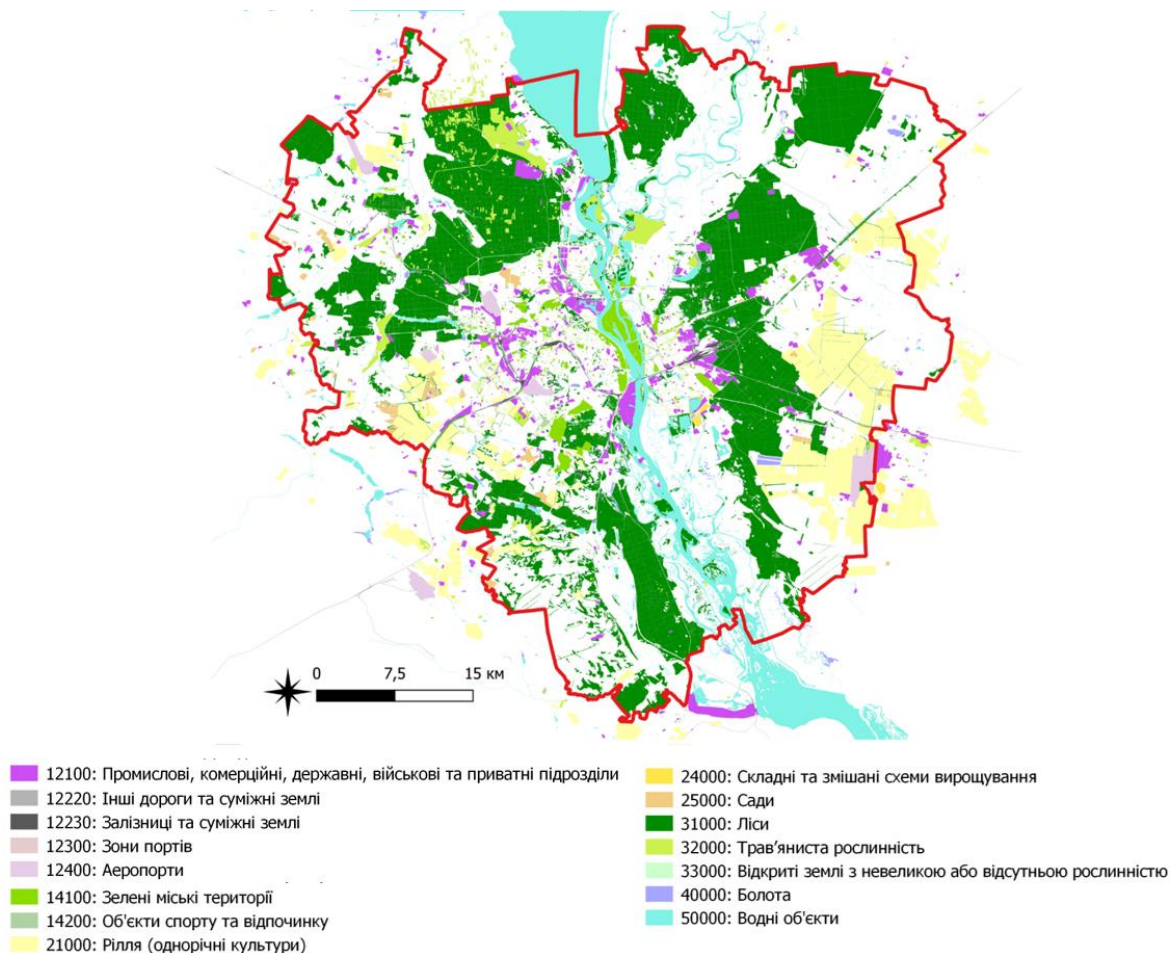


Рис. 4. Гармонізовані класи з відкритого джерела OSM з класами Copernicus Urban Atlas для ФМЗ міста Києва



Рис. 5. Клас штучних об'єктів та забудов, отриманих за супутниками Sentinel (a) та Planet (b), та їх порівняння (c)

На Рис. 5, є видно, що щільність забудов в межах кварталів за даними Sentinel буде завищена, ніж є в дійсності. Проте навіть при відсутності таких даних, для побудови міського атласу точність класифікації за даними Sentinel становить більше 90 % [7, 14].

Особливістю отриманого продукту є використання виключно відкритих джерел даних, на відміну від Copernicus Urban Atlas. Карти класифікації земного покриття мають великий потенціал для аналізу міських територій, оскільки вони забезпечують надійний набір даних, який можна використовувати для планування та оцінки показників сталого розвитку. Карти класифікації є основою для отримання продуктів, які є сумісними з сервісом Copernicus Urban Atlas, що дозволяє створити цифрову модель міста Київ для різних років і масштабувати її для будь-якого іншого міста.

Умовою створення Urban Atlas є необхідність визначення відсотку забудови кожного з кварталів міста. Для цього використовується карта земного покриття та векторний шар із кварталами міста, побудований за описаним вище принципом.

Для визначення відсотку площі певного типу землекористування (n – номер класу земного покриття) для кожного кварталу k будемо використовувати формулу:

$$\forall k \in \overline{1, QN}, n \in \overline{1, CN}: P_n^k = \frac{S_k^n}{S_k} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де QN – кількість кварталів; CN – кількість класів земного покриття на карті, отриманої в результаті навчання нейронної мережі, P_n^k – відношення площі класу n до площі кварталу k , S_k^n – площа класу n у кварталі k , S_k – площа кварталу k .

Для визначення відсотку забудови використаємо формулу (1) для класу земного покриття «штучні об'єкти» по кожному з кварталів міста Києва.

Запропоновану технологію застосовано для створення векторних карт міського атласу, гармонізованого з Copernicus Urban Atlas, для території міст Київ та Львів. На Рис. 6 векторний міський атлас для Києва та Львова, побудований на даних за 2020 рік, порівняно з Urban Atlas 2018 для міста Рим.

Із Рис. 6 видно, що створений міський атлас для Києва та Львова містить узгоджений набір класів з європейським сервісом. Відмінність полягає лише у вхідних даних, що були використані для його створення.

Валідація міського атласу для України

Для подальшого використання отриманого продукту в діяльності міських органів державної влади при плануванні росту міста необхідно оцінити його якість. Враховуючи те, що створений атлас в основному базується на використанні карт земного покриття, отриманих на основі супутникових даних високого просторового розрізнення та векторних геопросторових даних із відкритих джерел, необхідно оцінити точність карти земного покриття.

Оцінка точності карт земного покриття здійснювалась на основі незалежної валідаційної вибірки даних. Метрики, що використовувалися для оцінки точності побудованої карти описано в роботі [7].

Загальна точність карти класифікації для м. Київ становить – 96 %, а для м. Львів 95,3 %. При цьому F1-score точність класу забудов становить 92 % для обох міст.

Точність даних OpenStreetMap залежить від наявності GPS даних, на основі яких вони формуються. Загальна точність GPS даних коливається ± 7 м. Проте для великих міст точність геоприв'язки продуктів OSM достатньо висока (це можна візуально перевірити з застосуванням карт Google), що дає підстави використовувати ці продукти як одні із кращих в контексті розв'язання даної задачі.

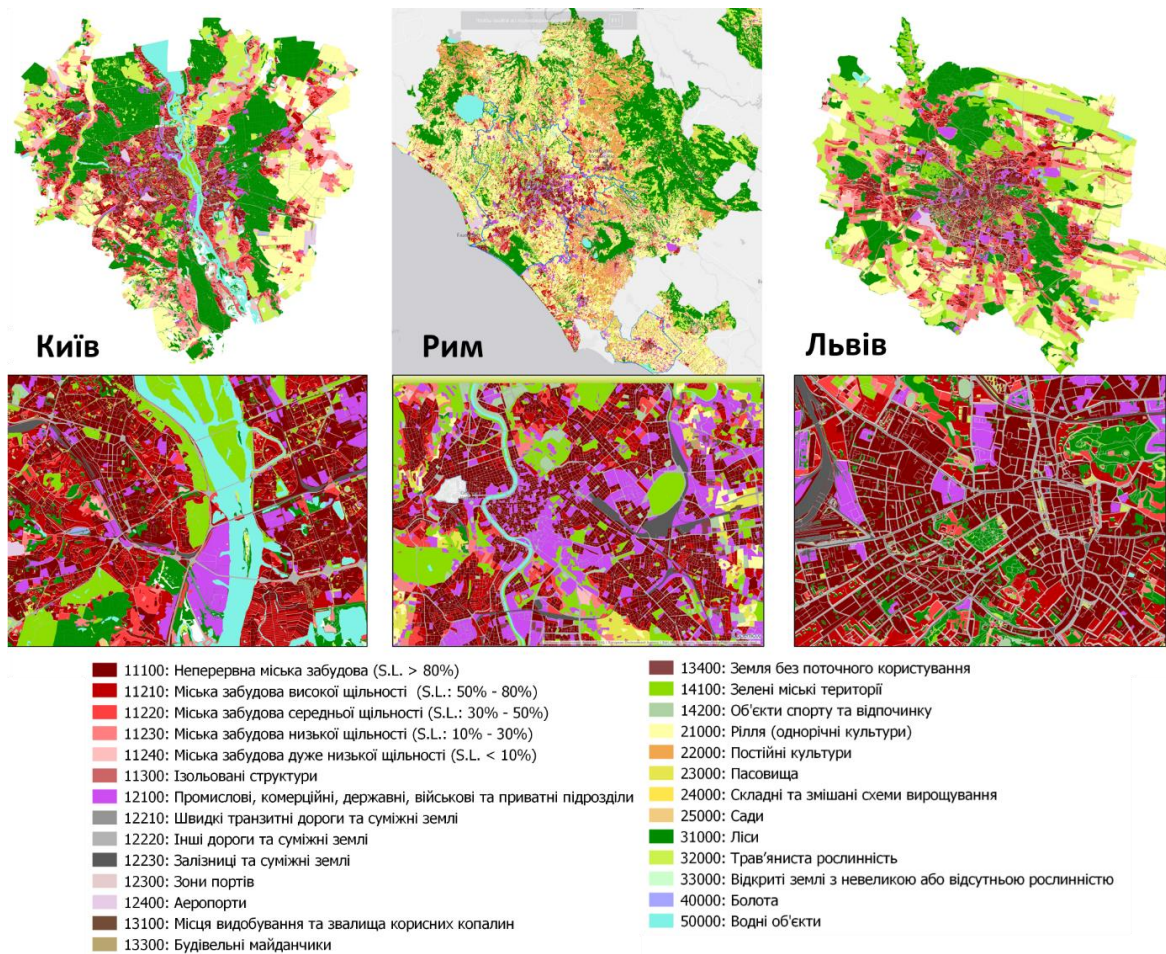


Рис. 6. Urban Atlas створений для м. Київ та Львів у порівнянні з продуктом Copernicus Urban Atlas для Риму

Висновки

Розроблена технологія побудови міського атласу, що базується на інтелектуальній моделі класифікації земного покриття, може бути поширена і на інші міста України. В подальшому створення такого продукту на основі даних за різні роки дозволить оцінити зміни землекористування та здійснювати прогноз щодо подальшого розширення міст.

Запропонована інформаційна технологія побудови міського атласу буде корисною для оцінки динаміки росту міст та тісно пов'язаних з цим соціальних та економічних показників їх розвитку. На її основі можна також оцінити індикатор досягнення цілей сталого розвитку [15, 16], такий як 11.3.1 «Співвідношення темпів споживання землі та темпів приросту населення» [17].

Перевагою запропонованої технології є те, що вона забезпечує узгоджену інформацію по всіх ФМЗ, що повністю відповідає номенклатурі класів європейського сервісу Urban Atlas. Наявність узгодженого джерела інформації про просторові структури в міських районах допоможе розвивати та кон-

тролювати політику розбудови міських агломерацій, починаючи від розвитку інфраструктури громадського транспорту, закінчуючи оцінкою ризику повеней і посух [18], а також розуміння міської екосистеми, озеленення міста та багато інших факторів впливу на місто.

Отже, створені продукти надають кількісну інформацію, яку можна і потрібно використовувати для забезпечення розвитку міст у повній відповідності з існуючими екологічними нормами та принципами побудови сучасних міст, особливо з огляду на напрямок Green Deal, що активно розвивається в Європі.

Подяка. Робота виконується в рамках проекту 2020.02/0284 «Геопросторові моделі та інформаційні технології супутникового моніторингу проблем розумного міста» за грантової підтримки Національного Фонду Досліджень України в межах конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (державний реєстраційний номер 0121U111242) та проекту SMURBS (угода про надання грантів № 689443), що фінансується в рамках програми ЄС «Горизонт 2020».

Література

1. Urban Atlas [Electronic resource]. – Access mode: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>. – 26.07.2021.

2. ATLAS OF URBAN EXPANSION [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.atlasofurbanexpansion.org>. – 26.07.2021.

3. A novel approach for dynamic population activity in urban-scale exposure estimates [Text] / M. Ramacher, M. Karl, E. Athanasopoulou, A. Kakouri, O. Speyer, and V. Matthias // EGU. – 2020 General Assembly. Online, 4–8 May 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-2576.

4. SMURBS [Electronic resource]. – Access mode: <https://smurbs.eu/the-project>. – 26.07.2021.

5. Smart City Services for Kiev City Within ERA-PLANET SMURBS Project [Text] / A. Shelestov, A. Kolotii, M. Lavreniuk, B. Yailymov, L. Shumilo, Y. Korsunskaya // In 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2019. – P. 784-788.

6. Micek, O. Land Use/Land Cover Data of the Urban Atlas and the Cadastre of Real Estate: An Evaluation Study in the Prague Metropolitan Region [Text] / O. Micek, J. Feranec, P. Stych // Land. – 2020. – Vol. 9. No. 5. – P. 1-24. DOI: 10.3390/land9050153.

7. Lavreniuk, M. Deep learning crop classification approach based on coding input satellite data into the unified hyperspace [Text] / M. Lavreniuk, N. Kussul, A. Novikov // 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2018. – P. 239-244. DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477525.

8. Модель та метод навчання для класифікаційного аналізу рівня води в стічних трубах за даними відео інспекції [Текст] / В. В. Москаленко, М. О. Зарецький, А. Г. Коробов, Я. Ю. Ковальський, А. Ф. Шасхов, В. А. Семашко, А. О. Панич // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2021. – No. 2(98). – P. 4-15. DOI: 10.32620/reks.2021.2.01.

9. Кушнір, М. Я. Використання систем штучного інтелекту у задачах прогнозування фінансових індексів: огляд наукових джерел [Текст] / М. Я. Кушнір, К. А. Токарева // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2020. – No. 3(95). – P. 108-117. DOI: 10.32620/reks.2020.3.11.

10. Лавренюк, М. С. Огляд методів машинного навчання для класифікації великих обсягів супутникових даних [Текст] / М. С. Лавренюк, О. М. Новіков // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2018. – No. 1. – P. 52-71. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2018.1.04.

11. Shelestov, A. Y. Using the fuzzy-ellipsoid method for robust estimation of the state of a grid system node [Text] / A. Yu. Shelestov and N. N. Kussul // Cybernetics and Systems Analysis. – 2008. – Vol. 44, No. 6. – P. 847-854. DOI: 10.1007/s10559-008-9057-1.

12. Global Human Settlement Layer [Electronic resource]. – Access mode: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu>. – 26.07.2021.

13. Kussul, N. Deep recurrent neural network for crop classification task based on Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery [Text] / N. Kussul, M. Lavreniuk, L. Shumilo // IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA. – P. 6914-6917. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324699.

14. Lavreniuk, M. Deep Learning Crop Classification Approach Based on Sparse Coding of Time Series of Satellite Data [Text] / M. Lavreniuk, N. Kussul, A. Novikov // In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2018. – P. 4812-4815. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518263.

15. OpenStreetMap [Electronic resource]. – Access mode: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Accuracy>. – 26.07.2021.

16. A workflow for Sustainable Development Goals indicators assessment based on high-resolution satellite data [Text] / N. Kussul, M. Lavreniuk, A. Kolotii, S. Skakun, O. Rakoid, L. Shumilo // International Journal of Digital Earth. – 2020. – Vol. 2, No. 13. – P. 309-321. DOI: 10.1080/17538947.2019.1610807.

17. Assessment of land consumption for sdg indicator 11.3.1 using global and local built-up area maps [Text] / A. Shelestov, N. Kussul, B. Yailymov, L. Shumilo, Y. Bilokonska // IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA. – P. 4971-4974. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324390.

18. Data Assimilation Technique For Flood Monitoring and Prediction [Text] / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko // Int. J. on Information Theory and Applications. – 2008. – Vol. 15, No. 1. – P. 76-84.

References

1. Urban Atlas. Available at: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas> (accessed 26.07.2021).

2. ATLAS OF URBAN EXPANSION. Available at: <http://www.atlasofurbanexpansion.org> (accessed 26.07.2021).

3. Ramacher, M., Karl, M., Athanasopoulou, E., Kakouri, A., Speyer, O., Matthias, V. A novel approach for dynamic population activity in urban-scale exposure estimates. *Air Quality, EGU, General Assembly. Online*, 2020, 4–8 May 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-2576.

4. SMURBS. Available at: <https://smurbs.eu/the-project> (accessed 26.07.2021).

5. Shelestov, A., Kolotii, A., Lavreniuk, M., Yailymov, B., Shumilo, L., Korsunskaya Y. Smart City Services for Kiev City Within ERA-PLANET SMURBS Project. *In 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2019, pp. 784-788.

6. Micek, O., Feranec, J., & Stych, P. Land use/land cover data of the urban atlas and the cadastre of

real estate: An evaluation study in the Prague Metropolitan Region. *Land*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 1-24. DOI: 10.3390/land9050153.

7. Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A. Deep learning crop classification approach based on coding input satellite data into the unified hyperspace. *38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2018, pp. 239-244. DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477525.

8. Moskalenko, V., Zaretskyi, M., Korobov, A., Kovalskiy, Y., Shaikhov, A., Semashko, V., Panyc, A. *Model' ta metod navchannya dlya klasyfikatsiyonoho analizu rivnyaya vody v stichnykh trubakh za danymi video inspektsiyi* [Model and training method for water level classification in sewer pipes based on video inspection data]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2021, no. 2(98), pp. 4-15. DOI: 10.32620/reks.2021.2.01.

9. Kushnir, M., Tokarieva, K. *Vykorystannya system shtuchnoho intelektu u zadachakh prohnouzvannya finansovykh indeksiv: ohlyad naukovykh dzherel* [Artificial intelligence systems in the financial market predictions: literature review]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2020, no. 3(95), pp. 108-117. DOI: 10.32620/reks.2020.3.11.

10. Lavreniuk, M., Novikov, A. Oglyad metodiv mashynogo navchannya dlya klasyfikatsiyi velykykh obsyagiv suputnykovykh danykh [Review of machine learning methods for Big satellite Data classification]. *Systemni doslidzhennya ta informacijni tehnologiyi – System research and information technologies*, 2018, no. 1, pp. 52-71. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2018.1.04.

11. Shelestov, A. Using the fuzzy-ellipsoid method for robust estimation of the state of a grid system node. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2008, vol. 44, no. 6,

pp. 847-854. DOI: 10.1007/s10559-008-9057-1.

12. *Global Human Settlement Layer*. Available at: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu> (accessed 26.07.2021).

13. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shumilo, L. Deep Recurrent Neural Network for Crop Classification Task Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery. *In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2020, pp. 6914-6917. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324699.

14. Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A. Deep learning crop classification approach based on sparse coding of time series of satellite data. *In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018, pp. 4812-4815. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518263.

15. *OpenStreetMap*. Available at: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Accuracy> (accessed 26.07.2021).

16. Kussul, N., Lavreniuk, M., Kolotii, A., Skakun, S., Rakoid, O., & Shumilo, L. A workflow for Sustainable Development Goals indicators assessment based on high-resolution satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 2020, vol. 2, no. 13, pp. 309-321. DOI: 10.1080/17538947.2019.1610807.

17. Shelestov, A., Kussul, N., Yailymov, B., Shumilo, L., Bilokonska, Y. Assessment of Land Consumption for SDG Indicator 11.3. 1 Using Global and Local Built-Up Area Maps. *In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2020, pp. 4971-4974. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324390.

18. Kussul, N., Shelestov, A., Skakun, S., & Kravchenko, O. Data assimilation technique for flood monitoring and prediction. *Int. J. on Information Theory and Applications*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 76-84.

Надійшла до редакції 26.07.2021, розглянута на редколегії 23.09.2021

ЦИФРОВИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ: URBAN ATLAS НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ГОРОДОВ УКРАИНЫ

А. Ю. Шелестов, А. Н. Лавренюк, Б. Я. Яйлимов, А. А. Яйлимова

Украина является ассоциированным членом Европейского союза и в ближайшие годы ожидается, что все данные и сервисы, которыми уже пользуются страны ЕС станут доступными и для Украины. Отсутствие качественных национальных продуктов по оценке развития и планированию роста городов приводит к невозможности оценивания влияния городов на экологию и здоровье людей. Первые шаги к созданию такого рода продуктов для территории городов Украины были начаты в пределах Европейского проекта «Smart Urban Solutions for air quality, disasters and city growth» (SMURBS), в рамках которого специалисты Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины получили первый городской атлас для города Киева, который был подобен европейского. Однако, полученный продукт имел значительно меньше типов землепользования, чем Европейский и потому возник вопрос улучшения разработанной технологии. Основной целью работы является анализ существующей технологии построения европейского сервиса Urban Atlas и ее улучшение путем разработки унифицированного алгоритма построения городского атласа с использованием всех имеющихся открытых геопространственных и спутниковых данных для городов Украины. Для разработки такой технологии за основу взята собственная технология классификации временных рядов спутниковых данных с пространственным разрешением 10 метров для построения карты земного покрова, а также алгоритм унификации открытых геопространственных данных в городских атласах Copernicus. Разработанная в работе технология построения городского атласа, основанный на интеллектуальной модели классификации земного покрова, может быть распространена и на другие города Украины. В дальнейшем создания такого продукта на основе данных за разные годы позволит оценить изменения землепользования и осуществлять прогноз по дальнейшему расширению городов. Предложенная информаци-

онная технология построения городского атласа будет полезной для оценки динамики роста городов и тесно связанных с этим социальных и экономических показателей их развития. На ее основе можно оценить индикаторы достижения целей устойчивого развития, такие как 11.3.1 «Соотношение темпов потребления земли и темпов прироста населения». В работе показано, что полученный городской атлас для Киева имеет высокий уровень качества и имеет сопоставимые классы землепользования с европейскими продуктами. Это свидетельствует, что такой продукт может использоваться в государственных службах по вопросам принятия управленческих решений.

Ключевые слова: Urban Atlas; Smart City; развитие города; цели устойчивого развития; индикатор 11.3.1; Copernicus.

DIGITALIZATION OF CITY DEVELOPMENT: URBAN ATLAS ON THE BASIS OF OPEN DATA FOR CITIES OF UKRAINE

A. Shelestov, A. Lavreniuk, B. Yailymov, H. Yailymova

Ukraine is an associate member of the European Union and in the coming years it is expected that all data and services already used by EU countries will be available to Ukraine. The lack of quality national products for assessing the development and planning of urban growth makes it impossible to assess the impact of cities on the environment and human health. The first steps to create such products for the cities of Ukraine were initiated within the European project "SMart URBan Solutions for air quality, disasters and city growth" (SMURBS), in which specialists from the Space Research Institute of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine received the first city atlas for the Kyiv city, which was similar to the European one. However, the resulting product had significantly fewer types of land use than the European one and therefore the question of improving the developed technology arose. The main purpose of the work is to analyze the existing technology of European service Urban Atlas creation and its improvement by developing a unified algorithm for building an urban atlas using all available open geospatial and satellite data for the cities of Ukraine. The development of such technology is based on our own technology for classifying satellite time series with a spatial resolution of 10 meters to build a land cover map, as well as an algorithm for unifying open geospatial data to urban atlases Copernicus. The technology of construction of the city atlas developed in work, based on the intellectual model of classification of a land cover, can be extended to other cities of Ukraine. In the future, the creation of such a product on the basis of data for different years will allow to assess changes in land use and make a forecast for further urban expansion. The proposed information technology for constructing the city atlas will be useful for assessing the dynamics of urban growth and closely related social and economic indicators of their development. Based on it, it is also possible to assess indicators of achieving the goals of sustainable development, such as 11.3.1 "The ratio of land consumption and population growth." The study shows that the city atlas obtained for the Kyiv city has a high level of quality and has comparable land use classes with European products. It indicates that such a product can be used in government decision-making services.

Keywords: Urban Atlas; Smart City; urban growth; sustainable development goals; indicator 11.3.1; Copernicus.

Шелестов Андрій Юрійович - д-р техн. наук, проф., проф. каф. інформаційної безпеки, Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Лавренюк Алла Миколаївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інформаційної безпеки, Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Яйлимов Богдан Ялкапович – канд. техн. наук, старш. наук. співроб., Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, Україна.

Яйлимова Ганна Олексіївна – д-р філософії з прикладної математики, наук. співроб., Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Andrii Shelestov – Dr. of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Information Security, Institute of Physics and Technology NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
e-mail: andrii.shelestov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9256-4097.

Alla Lavreniuk – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Security, Institute of Physics and Technology NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: alla.lavrenyuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5791-0377.

Bohdan Yailymov – PhD, Senior Research Scientist in the Space research Institute NAS of Ukraine and SSA of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yailymov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2635-9842.

Hanna Yailymova – PhD in Applied Math, research scientist in Institute of Physics and Technology NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: anna.yailymova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6116-8294.