

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

REMOTE SENSING MONITORING OF URBANIZED AREAS

Уль А.В., д.т.н., проф. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник О.В., к.т.н., доц. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник Ю.А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет), Мельничук М.М., аспірант (Волинський національний університет ім. Лесі Українки)

Uhl A.V., Dr.Tech in Engineering, Professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk O.V., PhD in Engineering, associate professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk Y.A., PhD in Engineering, associate professor (Lutsk National Technical University), Melnychuk M.M., PhD student (Lesya Ukrainka Volyn National University)

Зростання міст безпосередньо впливає на процеси міського розвитку як на рівні міста, так і на рівні районів, але, з іншого боку, на зростання також впливають земельна та житлова політика, поточна площа забудови, доступна територія для забудови, зміна кількості домогосподарств, населення, економіка та ін. Методи дистанційного зондування та ГІС можна використовувати для аналізу та моделювання зростання міст. Це дослідження було проведено, щоб визначити та проаналізувати зростання міста Луцька. В роботі застосовано кілька статистичних методів, щоб розпізнати та проаналізувати цю закономірність, яка показує динаміку розвитку міста в період з 2016 по 2022 роки. Окрім отриманих результатів, це дослідження також демонструє потенціал дистанційного зондування, методів ГІС та можливостей хмарних сервісів Google Earth Engine для аналізу зростання міст.

Urban growth directly affects urban development processes at both the city and district level, but on the other hand, land and housing policies, current built-up area, available land for development, changes in the number of households, population, economy also affect growth etc. Remote sensing and GIS techniques can be used to analyze and model urban growth. This study was conducted to identify and analyze the growth of the city of Lutsk. The work uses several statistical methods to recognize and analyze this regularity, which shows the dynamics of the city's development in the period from 2016 to 2022. In addition to the obtained results, this study also demonstrates the potential of remote sensing, GIS methods, and the capabilities of Google Earth Engine cloud services to analyze urban growth.

To study the expansion of the urban study area, the Dynamic World dataset, which is near-real-time (NRT) with a resolution of 10 m, was used as a basis, which includes

the distribution and information of nine classes of land use structure and land cover (Land Use/Land Cover (LULC)).

The Sentinel-2 MSI image collection is available from 06/27/2015 to the present. Sentinel-2 satellites are repeated every 2 to 5 days depending on the latitude. Dynamic world forecasts are generated for Sentinel-2 L1C images with maximum cloud cover less than 35%. Forecasts are masked to remove clouds and cloud shadows using a combination of the S2 Cloud Probability, Cloud Displacement Index, and Directional Distance Transform algorithms. In total, 615 Sentinel-2 images were used in the work for the period from March 25, 2016 to November 9, 2022.

In this study, the method of controlled classification according to the CART (Classification and Regression Tree) algorithm was used.

The results of this study demonstrated the following facts:

- *the city demonstrates stable growth over different periods of time,*
- *the maximum expansion of the built-up area was observed in the southern and southeastern directions and fragmentary construction in other directions*
- *research has established that the expansion of the outskirts is dominant in all selected periods and occurs in part of the suburban areas of the city.*

Due to the limited areas of the city and free lands, it is necessary to carry out rational control and management of urban growth and dynamics.

The proposed technique can be used to analyze not only urban areas, but also other types of land cover and land use.

Ключові слова: розвиток міст, урбанізовані території, дистанційне зондування, класифікація зображень, алгоритм CART, Google Earth Engine.

Keywords: urban development, urban areas, remote sensing, image classification, CART algorithm, Google Earth Engine.

Вступ. Швидка та незапланована урбанізація у світі викликає тривогу [1]. Оскільки міста ростуть угору та назовні, землекористування та розростання міст стали двома головними життєво важливими питаннями міських досліджень. Зі збільшенням населення та його активності межі міста починають розширюватися уздовж міських околиць, що призводить до фрагментованої міської морфології, а це впливає на місцеву екологію та навколишнє середовище [2]. Одними з найважливіших екологічних проблем, пов'язаних із швидким розширенням міст, є зміна клімату, забруднення повітря та води [3], які погіршують якість життя сільських і міських жителів. У результаті інтенсивної урбанізації в центральних регіонах розпорошене зростання або розростання відбулося у приміській зоні та на зовнішній околиці міста [4]. Приміська експансія міст або мегаполісів призводить до розширення, де сільські землекористування частково або повністю перетворюються на міські.

Аналіз останніх досліджень

Що стосується типів або форм міського зростання, деякі автори визначили три типи міського зростання, а саме: розширення краю, заповнення та розширення віддалених місць [5, 6]. Розширення країв міст

представляє собою поступову забудову вільних земельних ділянок, що поширюються від околиць старої та існуючої міської забудови. Окрім планомірного розширення урбанізованих територій, можна також розглядати стрибкоподібне розширення, розосереджене на значній відстані від розвинутих районів міст.

Традиційні методи дослідження та картографування є дорогими та трудомісткими для оцінки розширення міст. Даний тип інформації недоступний для більшості міст. На сьогодні збільшується роль використання досліджень із використанням дистанційного зондування (ДЗ) у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС). Дистанційне зондування та ГІС, незважаючи на економічну та технологічну ефективність, є надійними методами моніторингу та аналізу розширення міст [7, 8]. До сьогодні було проведено багато досліджень з цих питань, їх наслідків для землекористування/зміни земельного покриву для різних мегаполісів [2, 9], Мумбаї [10], Делі [11], Калькутта [12]. У роботі [13] особливу увагу приділено великим і середнім містам. Хоча малі/середні міста чи містечка роблять важливий внесок у міський розвиток, вони часто ігноруються у дослідженнях.

Постановка завдання

Місто Луцьк, обласний центр Волинської області, було обрано як область дослідження для кращого розуміння міської динаміки в середніх містах України, хоча природа міської динаміки та інтенсивність зростання міста залежить від різних факторів.

Це дослідження спрямоване на аналіз землекористування та зміни ґрунтового покриву, визначення та моніторинг просторового розширення міста Луцька та його околиць в радіусі 10 км від його центральної частини в період з 2016 по 2022 роки із використанням даних дистанційного зондування та алгоритмів їх обробки.

Виклад основного матеріалу

Джерела даних

Для вивчення міської території в межах об'єкта дослідження, було використано за основу набір даних Dynamic World, котрий майже в реальному часі (near-real-time (NRT)) має роздільну здатність 10 м, що включає розподіл та інформацію про дев'ять класів структури землекористування та земельного покриву (Land Use/Land Cover (LULC)).

Колекція знімків Sentinel-2 MSI доступна з 27.06.2015 по теперішній час. Частота повторного знімання супутниками Sentinel-2 становить від 2 до 5 днів, залежно від широти. Прогнози динамічного світу генеруються для зображень Sentinel-2 L1C з максимальною хмарністю менше 35%. Прогнози маскуються для видалення хмар і хмарних тіней за допомогою комбінації алгоритмів S2 Cloud Probability, Cloud Displacement Index і Directional Distance Transform. Загалом в роботі було використано 615 знімків Sentinel-2 на період з 25.03.2016 по 09.11.2022 року.

Для верифікації отриманих станів структури землекористування та земельного покриття, а також частки урбанізації було використано композитні зображення на відповідний період.

Класифікація зображень

У цьому дослідженні була застосована методика контрольованої класифікації за алгоритмом CART (Classification and Regression Tree).

Алгоритм CART призначений для побудови бінарного дерева рішень, вузол яких має при розщепленні лише двох нащадків. Для алгоритму CART «поведінка» об'єктів обраної групи означає частку модального (найчастішого) значення вихідної ознаки. До обраних груп відносяться ті, для яких ця пропорція досить висока. На кожному кроці побудови дерева сформоване в вузлі правило ділить заданий набір прикладів на дві частини: частину, в якій виконано правило (нащадок правий) і частину, в якій правило не виконується (нащадок лівий). Основною перевагою роботи алгоритму CART є впевненість у тому, що за наявності бажаних визначень у досліджуваній сукупності вони будуть виявлені. Крім того, CART дозволяє не «закриватися» на єдиному значенні функції виведення, а продовжувати пошук, допоки всі такі значення, для яких можливо віднайти відповідний пояснювальний вираз.

Для створення навчальної вибірки було випадковим чином створено 10000 точок в області інтересу, після чого кожній з них було присвоєно атрибут класу, відповідно до даних колекції Dynamic World [14]. Отриманий набір геопросторових даних був використаний для "навчання" класифікатора.

Дані дистанційного зондування були отримані та опрацьовані в середовищі Google Earth Engine [15]. Це хмарна платформа для аналізу геопросторових даних у планетарному масштабі. Вона дозволяє використовувати величезні обчислювальні потужності Google для вивчення найрізноманітніших проблем: втрати лісів та заліснення територій, посух та повеней, різноманітних стихійних лих, перебігу епідемій, продовольчої безпеки, управління водно-болотними ресурсами, захисту навколишнього середовища зміни клімату тощо. Earth Engine є унікальною платформою, оскільки дозволяє розширити спектр можливостей не тільки вчених, що займаються дистанційним зондуванням Землі, а й більш ширшої аудиторії, котрій не вистачає обчислювальних можливостей використовувати класичні геоінформаційні системи для обробки великих масивів просторово-часових даних. До появи Earth Engine аналіз великих геоданих могли робити тільки вузькопрофільні фахівці, що мають доступ до високопродуктивних обчислювальних ресурсів.

Результати дослідження

За результатами обробки даних дистанційного зондування було визначено відсотковий розподіл площ структури землекористування та

земельного покриття та його щорічну динаміку з 2016 по 2022 рік (табл. 1.), (рис. 1).

Таблиця 1

Відсотковий розподіл площ структури землекористування та земельного покриття

№	Назва класу	Роки						
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Відкритий ґрунт	0,05	0,05	0,07	0,10	0,24	0,07	0,22
2	Забудова	29,67	29,59	30,49	30,61	30,99	31,32	31,93
3	С/г угіддя	41,96	40,89	43,28	41,37	45,20	42,61	43,11
4	Заболочені території	0,09	0,07	0,06	0,13	0,12	0,02	0,08
5	Трав'яна рослинність	6,63	7,34	7,03	7,06	6,67	6,03	5,73
6	Чагарники	1,26	0,38	1,01	0,59	2,29	0,37	0,61
7	Ліси	19,48	20,83	17,21	19,30	13,45	18,54	17,53
8	Відкриті водойми	0,85	0,85	0,85	0,86	1,02	0,66	0,78

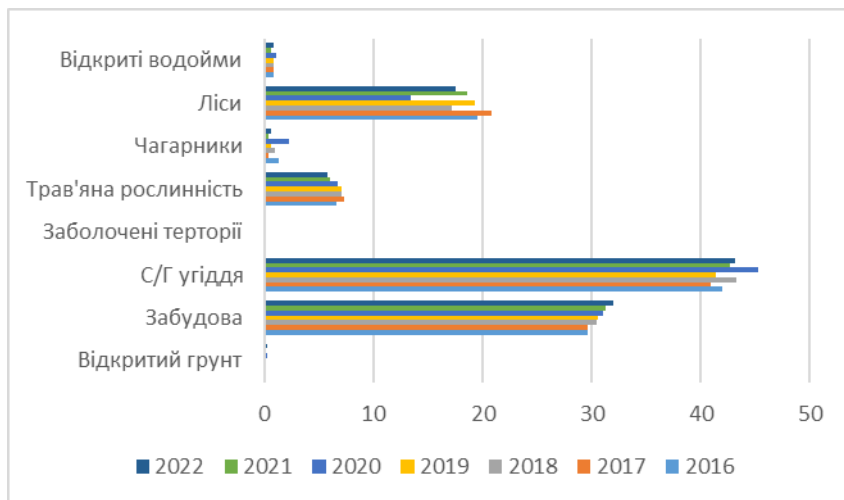


Рис. 1. Відсотковий розподіл площ структури землекористування та земельного покриття

Результат класифікації показує, що площа забудови поступово зростала з 29,67% у 2016 році до 31,93 у 2022 році. Як свідчать дані, протягом 2016–2022 років площа сільськогосподарських угідь коливалась в межах 40,89% - 45,20% із максимальним значенням у 2020 році.

Спостерігається хвилюподібне скорочення кількості лісових насаджень та збільшення площ відкритих необроблених ґрунтів.

Графічно розподіл значень класів за результатами контрольованої класифікації для кожного із 615 зображень представлений на рис. 2.

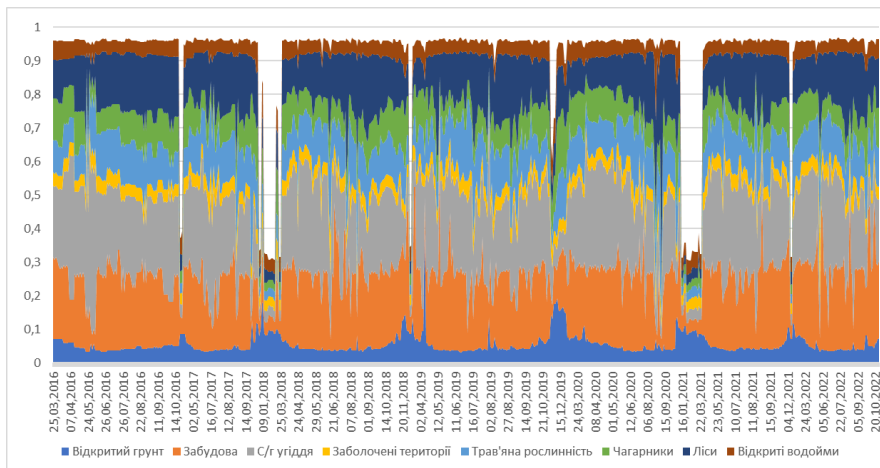


Рис. 2. Розподіл значень класів

Слід зазначити, що наявні на графіку прогалини зумовлені значним сніговим покривом на відповідні періоди, котрий не дозволив алгоритму достовірно визначити класи пікселів зображення.

Оверлей результату контрольованої класифікації для одного із зображень 2022 року на основу Google Earth Engine представлений на рис. 3.

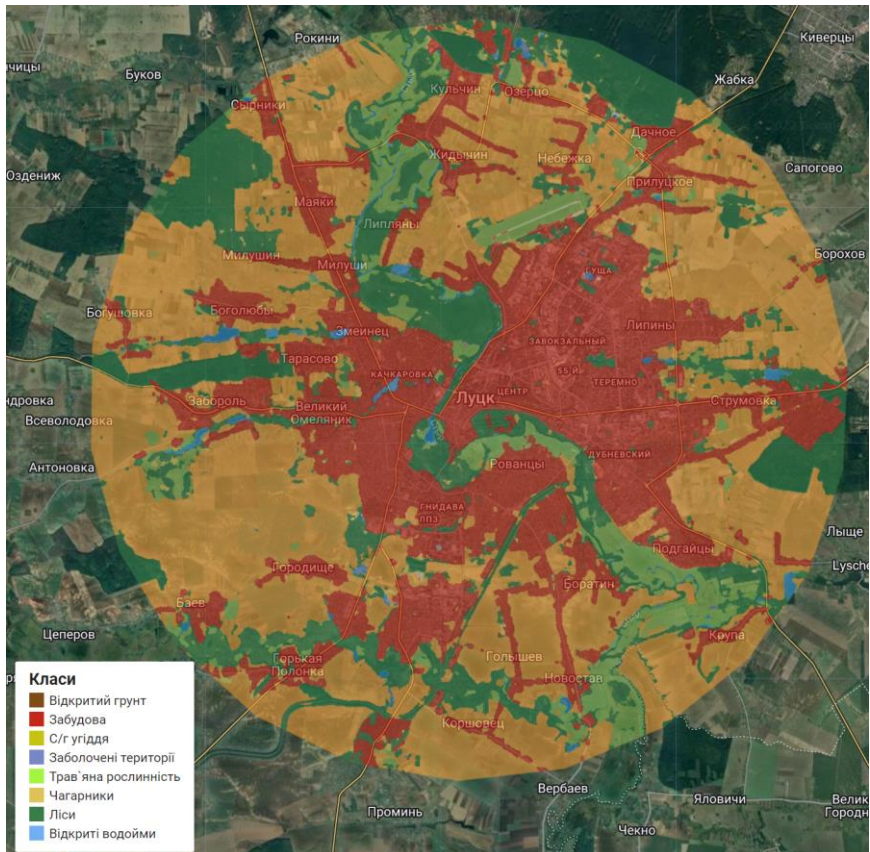


Рис. 3. Результат контрольованої класифікації

Оскільки основною метою даної роботи є аналіз урбанізованих територій, на основі класифікованих зображень було виділено урбанізовані території станом на 2016 рік та досліджено динаміку їх розвитку до 2022 року. Відповідна графічна інтерпретація представлена на рис. 4 та рис. 5.

З аналізу отриманих даних видно, що ріст площ урбанізованих територій в основному припадає на південну та південно-східну частину досліджуваної території в межах с. Рованці, с. Боратин та с. Струмівка.

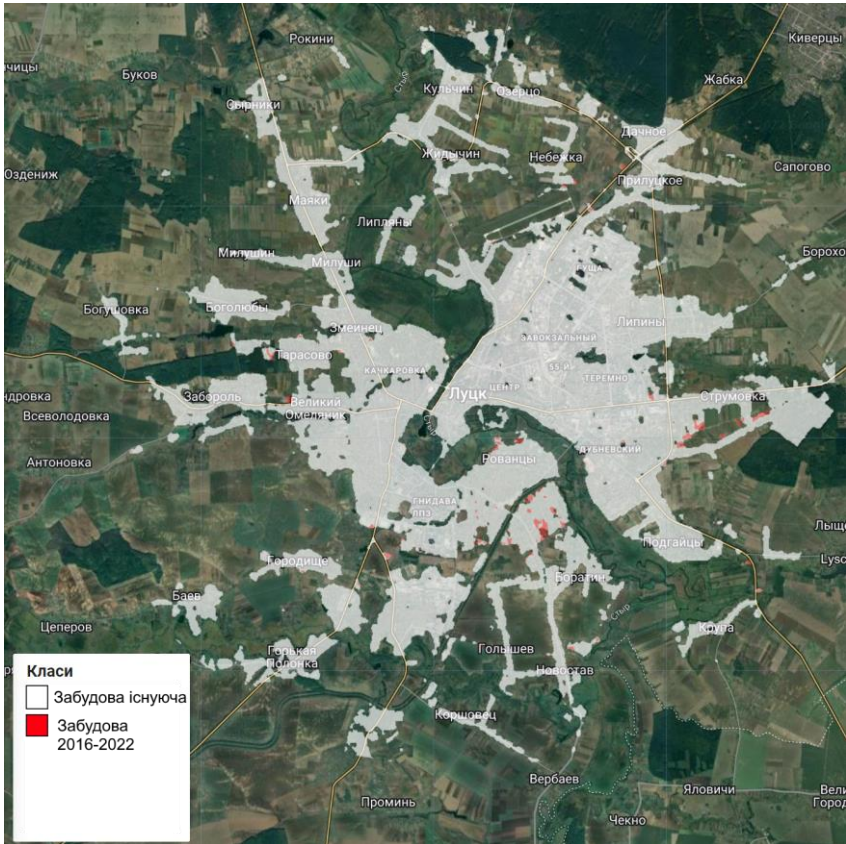


Рис. 4. Аналіз урбанізованих територій.

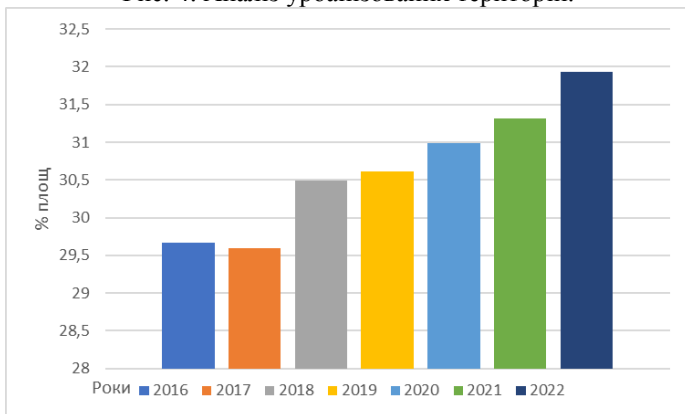


Рис. 5. Динаміка зміни площ урбанізованих територій

Оцінка точності

Під час здійснення контрольованої класифікації виникає деяка кількість помилок через спектральну подібність класів або помилки користувача під час визначення завіркових ділянок. Для цього здійснено оцінку точності класифікації земельного покриття для визначення і вимірювання значень похибок отриманого зображення. Найпоширенішим методом оцінки точності є розрахунок матриці похибок [16] в якій порівнюються дані отриманого зображення з контрольними даними для відповідної кількості класифікаційних одиниць. Відповідно, на основі отриманої матриці похибок розраховується загальна точність класифікації, як відношення вірно класифікованих елементів до загальної кількості елементів вибірки.

Оцінка точності використовувалася для перевірки класифікації шляхом використання 30% контрольних точок, отриманих на початковому етапі. Референтне значення, введене дослідником, базується на даних про достовірність ґрунту. У цій класифікації точність виробника (включає в себе упущення помилки, що відноситься до ступеня спостережуваного аспекту на місцевості, який не класифікується на карті) і точність користувача (оцінює упущення помилки і пояснює можливість того, що піксель класифікується у відповідну категорію).

Матриці похибок були розраховані для оцінки точності класів землекористування та земельного покриття. Існує чотири конкретні статистичні показники точності, а саме: загальна точність (Overall accuracy(OA)), точність виконавця (Producer accuracy(PA)), точність користувача (User accuracy(UA)) та коефіцієнт κ , які були отримані для оцінки точності класифікації. Найбільш репрезентативними з них є загальна точність (OA) та коефіцієнт κ . Загальна точність класифікації становить $OA_{2016}=94\%$, $\kappa_{2016}=0.92$ та $OA_{2022}=97\%$, $\kappa_{2022}=0.96$ для знімків 2016 та 2022 років, відповідно.

Висновки

Динаміка структури земельного покриття та землекористування, проаналізована за допомогою даних дистанційного зондування та ГІС, показала ефективність визначення минулого та майбутнього міст, а також типологію та розвиток міст, які можуть бути корисними органам місцевої влади для можливості керувати зростанням та розвитком цієї території. Огляд літератури встановив, що більшість досліджень було проведено для міст-мільйонників. Проблеми середніх міст відрізняються від проблем великих мегаполісів. У цьому дослідженні зроблено спробу з'ясувати унікальні особливості міського розвитку такого середнього міста, як Луцьк. Запропонована в роботі методика може бути масштабована до менших міст та містечок або ж до рівня агломерацій. Результати цього дослідження продемонстрували наступні факти:

- місто демонструє стабільне зростання у різні часові періоди;

- максимальне розширення забудованої території спостерігалось в південному та південно-східному напрямку та фрагментарну забудову в інших напрямках;
- дослідженням встановлено, що експансія окраїни є домінуючою в усіх вибраних періодах і відбувається в частині приміських зон міста.

Через обмеженість територій міста та вільних земель необхідно здійснювати раціональний контроль та управління міським ростом і динамікою.

Запропонована методика може бути використана для аналізу не тільки урбанізованих територій, а й інших видів земельного покриття та землекористувань. Завдяки хмарним сервісам Google Earth Engine стало можливим здійснювати обробку великих масивів даних дистанційного зондування без використання потужного і дороговартісного апаратного та програмного забезпечення.

References

1. Vinoth Kumar, J. A., Pathan, S. K., Bhanderi, R. J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth – a case study of Indore City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2007. Vol. 35, No. 1. C. 11–20.
2. Roy, B., Kasemi, N. Monitoring urban growth dynamics using remote sensing and GIS techniques of Raiganj Urban Agglomeration, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24, No. 2. C. 221–230.
3. Hassan Rashid, M. A. ul, Manzoor, M. M., Mukhtar, S. Urbanization and Its Effects on Water Resources: An Exploratory Analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2018. Vol. 15. C. 67–74.
4. H S, S., Ramachandra, T. V, Jagadish, K. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Vol. 5. C. 29–39.
5. Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., та ін. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. 21. C. 409–417.
6. Wilson, E., Hurd, J., Civco, D., та ін. Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. C. 275–285.
7. Wang, H., Gong, X., Wang, B., та ін. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 103. C. 102500.
8. La, Y., Bagan, H., Yamagata, Y. Urban land cover mapping under the Local Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate*. 2020. Vol.

33. С. 100661.

9. Aithal, D. B., Shivamurthy, V., Ramachandra, T. V. Simulating urban growth by two state modelling and connected network. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018.

10. Kandpal, R., Saizen, I. An evaluation of the relative urbanisation in peri-urban villages affected by industrialisation: the case study of Bhiwandi in the Mumbai Metropolitan Region, India. *Spatial Information Research*. 2019. Vol. 27, No. 2. С. 137–149.

11. Wentz, E. A., Nelson, D., Rahman, A., та ін. Expert system classification of urban land use/cover for Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29, No. 15. С. 4405–4427.

12. Bhatta, B. Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, No. 18. С. 4733–4746.

13. Jat, M., Garg, P., Khare, D. Assessment of urban growth pattern using spatial analysis techniques06.

14. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., та ін. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9, No. 1. С. 251.

15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., та ін. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. С. 18–27.

16. Melnyk, O. V., Manko, P. V. Klasyfikatsiia lisovykh masyviv Volyni za danymy bahatospektralnykh suputnykovykh znimkiv. *ScienceRise*. 2018. Vol. 9. С. 25–30.

Список використаної літератури

1. Vinoth Kumar, J. A., Pathan, S. K., Bhanderi, R. J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth – a case study of Indore City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2007. Vol. 35, No. 1. С. 11–20.

2. Roy, B., Kasemi, N. Monitoring urban growth dynamics using remote sensing and GIS techniques of Raiganj Urban Agglomeration, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24, No. 2. С. 221–230.

3. Hassan Rashid, M. A. ul, Manzoor, M. M., Mukhtar, S. Urbanization and Its Effects on Water Resources: An Exploratory Analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2018. Vol. 15. С. 67–74.

4. H S, S., Ramachandra, T. V, Jagadish, K. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Vol. 5. С. 29–39.

5. Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., та ін. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 21. C. 409–417.

6. Wilson, E., Hurd, J., Civco, D., та ін. Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. C. 275–285.

7. Wang, H., Gong, X., Wang, B., та ін. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 103. C. 102500.

8. La, Y., Bagan, H., Yamagata, Y. Urban land cover mapping under the Local Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate*. 2020. Vol. 33. C. 100661.

9. Aithal, D. B., Shivamurthy, V., Ramachandra, T. V. Simulating urban growth by two state modelling and connected network. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018.

10. Kandpal, R., Saizen, I. An evaluation of the relative urbanisation in peri-urban villages affected by industrialisation: the case study of Bhiwandi in the Mumbai Metropolitan Region, India. *Spatial Information Research*. 2019. Vol. 27, No. 2. C. 137–149.

11. Wentz, E. A., Nelson, D., Rahman, A., та ін. Expert system classification of urban land use/cover for Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29, No. 15. C. 4405–4427.

12. Bhatta, B. Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, No. 18. C. 4733–4746.

13. Jat, M., Garg, P., Khare, D. Assessment of urban growth pattern using spatial analysis techniques06.

14. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., та ін. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9, No. 1. C. 251.

15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., та ін. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. C. 18–27.

16. Мельник, О. В., Манько, П. В. Класифікація лісових масивів Волині за даними багатоспектральних супутникових знімків. *ScienceRise*. 2018. Vol. 9. C. 25–30.