

В.Ю. Каштан, К.Л. Сергеева, О.В. Коробко, Д.В. Іванов
**ПОШУК ТА ОЦІНКА ОСТРОВІВ ТЕПЛА
НА ЦИФРОВИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ**

Анотація. Останнім часом все більш актуальними стають дослідження теплового забруднення міст, «Міських островів тепла», з використанням космічних знімків. Підвищення теплового фону часто є індикатором інших видів забруднення, тому вивчення його просторової диференціації допомагає оцінити інтенсивність антропогенного впливу на довкілля загалом.

В роботі отримав подальший розвиток метод виділення сталих островів тепла урбанізованих територій за часовими рядами супутникових зображень. Запропоновано методику пошуку та оцінки островів тепла на цифрових космічних знімках, що дозволяє на основі аналізу різночасових карт температури виявляти стабільні у часі ділянки теплового забруднення, потенційно небезпечні для населення прилеглих територій. Виконано побудову карт UHI, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики.

Ключові слова: міський тепловий острів, температура поверхні землі, альbedo, LST, UHI, ДЗЗ, аерокосмічний моніторинг, теплова зйомка

Постановка проблеми. Заміни природного ландшафту штучним середовищем призвели до зміни екосистеми та фізичних властивостей поверхні, таких як теплоакуюча здатність та властивості теплопровідності [1]. Це ускладнює передачу тепла між міськими районами та довкіллям. Зображення температури поверхні землі (Land Surface Temperature, LST) з різних супутників широко використовуються для дослідження міського теплового середовища. Карти LST забезпечують повне просторове охоплення, що відрізняє їх від точкових даних про температуру повітря, отриманих з метеорологічних станцій. Зважаючи на це, в останні десятиліття зростає науковий інтерес до вивчення проблеми так званих міських островів тепла (Urban Heat Islands, UHI). «Міські острови тепла» виникають, коли міста замінюють природний покрив землі щільними концентраціями тротуарів, будівель та інших поверхонь, які поглинають і утримують тепло. Цей ефект призводить до збільшення витрат на споживання електроенергії (наприклад, на кондиціонування повітря), підвищує-

ся рівень забруднення повітря, а також захворюваність та смертність, пов'язані зі спекою. Так, наприклад, темні поверхні (низьке альbedo) поглинають більше енергії від сонячного світла, ніж поверхні, що відбивають світло (високе альbedo). Поглинена енергія з часом виділяється у вигляді теплової енергії, яку людина може відчувати. Різницю температур між поверхнями з високим і низьким альbedo можна побачити за допомогою інфрачервоної камери.

Пошук і аналіз просторового розподілу міських островів тепла є важливим завданням у сучасних дослідженнях навколишнього середовища. Це дозволить використовувати ефективні методи боротьби і запобігання негативному впливу теплових аномалій.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом супутникові зображення почали широко використовуватись для вивчення «Міських островів тепла». Розроблено різноманітні алгоритми для оцінки температури земної поверхні, наприклад, mono-window алгоритм, одноканальний метод, алгоритм split-window [2]. Доведено, що міські температури пов'язані з особливостями поверхні, що характеризуються, наприклад, нормалізованим диференціальним вегетаційним індексом (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). В одному з ранніх досліджень індекс NDVI використаний для оцінки взаємозв'язку між температурою земної поверхні та рослинністю [3]. Пізніше джерела «Міських островів тепла» почали пов'язувати не тільки з термодинамічними властивостями поверхонь, а й з їх формами та геометрією [4].

Дослідження «Міських островів тепла» проводяться по всьому світу [5–8]. В Україні це питання розглядають науковці Б.С. Бусигін, І.М. Гаркуша, Б.В. Шилін, Є.А. Балдін, М.Ю. Грищенко, В.І. Лялько, А.Б. Крилов, В.І. Зацерковний, Н.В. Оберемок, П.О. Березіна та ін. Роботи авторів присвячені основним результатам використання технології створення цифрових карт розподілу температурного поля міста Дніпро (Україна) за даними мультиспектральних сканерів Landsat TM/ETM+ та Terra MODIS. Отримано результати порівняння розподілу температур, одержаних різними методами [9–11].

Метою даної роботи є розробка методики для аналізу температурних аномалій та виявлення «Міських островів тепла» на цифрових космічних знімках у тепловому інфрачервоному діапазоні з супутника Landsat 8.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг теплового стану міст базується на використанні різночасових зйомок у інфрачервоному (тепловому) діапазоні електромагнітного спектру. Засобом аналізу, інтерпретації та візуалізації

результатів є новітні інформаційні (у тому числі геоінформаційні) та комунікаційні технології, що дозволяють здійснювати складну схему обробки матеріалів – від створення геопорталів і баз даних до представлення й візуалізації результатів у вигляді двовірних і тримірних просторових моделей розподілу температур і кількісної оцінки теплових втрат об'єктів інфраструктури (промислових підприємств, житлових масивів, інженерних мереж).

На рисунку 1 представлена схема запропонованої в роботі методики аналізу температурних аномалій та виявлення «Міських островів тепла» на цифрових космічних знімках.

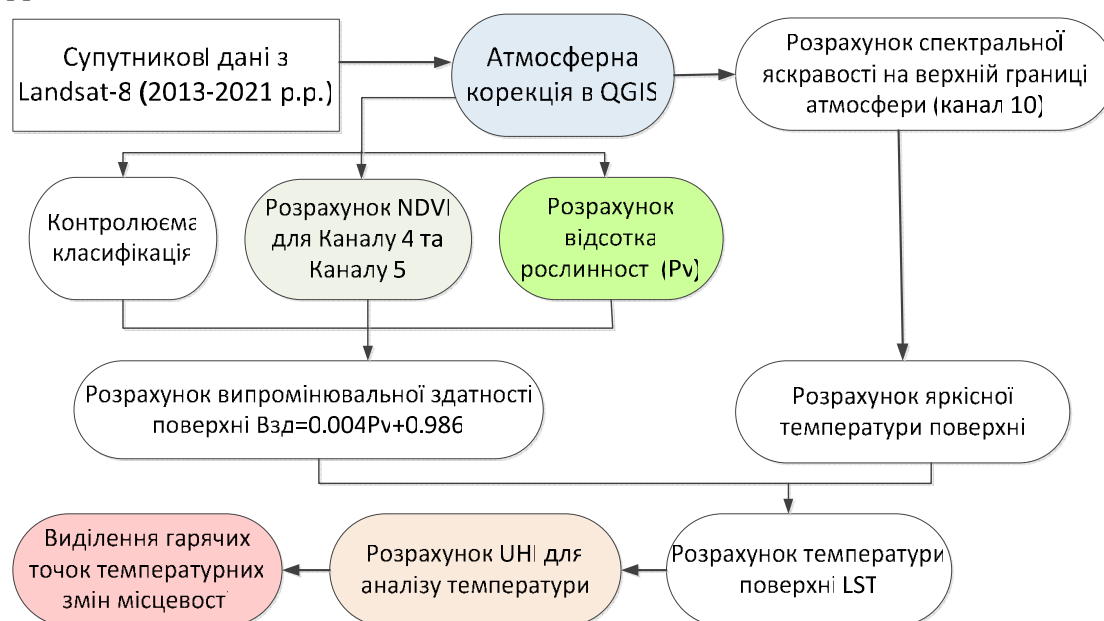


Рисунок 1 – Загальна схема методики

Реалізація методики наступна:

1. Спочатку завантажуюмо набір даних Landsat 8 в програмне середовище QGIS [12].

2. На другому етапі пропонуємо виконати атмосферну корекцію даних Landsat 8 на основі розрахунку коефіцієнту відбиття. Коефіцієнт відбиття – це відношення загального випромінювання, відбитого від поверхні, до загального вхідного випромінювання [13]:

$$p_{\lambda} = \frac{(Lsat_{rat} - Lhaze1\%)TT \cdot d^2}{E_{o\lambda} \cdot \cos\theta \cdot TAU_v \cdot TAU_z} \quad , \quad (1)$$

де $Lsat$ – це спектральне випромінювання для кожного каналу; $Lhaze$ – атмосферне спектральне випромінювання, розсіяне в напрямку датчика; TT – атмосферне пропускання світла від поверхні землі до датчика; TAU_v – 1,0 для

Landsat; $\text{TAUz} = \cos\theta_s$; $E_0\lambda$ – сонячне спектральне випромінювання поверхні, перпендикулярної до сонячних променів поза атмосферою.

3. Наступним етапом є розрахунок параметрів відбивної здатності та спектральної яскравості земної поверхні. Існуючі дослідження відзначають досить високу збіжність отриманих температурних даних для методів розрахунку випромінювальної здатності, що базуються на параметрі NDVI або класифікації поверхні [13]. Остаточний вибір методу залежить від розв'язуваної задачі та її масштабу. У цьому дослідженні було обрано метод, заснований на контрольованій напівавтоматичній класифікації, завдяки його простоті, зрозумілості та більш точному контролю результату. Після проведеної атмосферної корекції обчислюється NDVI [14].

Далі обчислюється параметр P_v (Proportion of vegetation), який описує відсоток рослинності [4]:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (2)$$

Отримуємо випромінювальну здатність поверхні землі (Ground Emissivity, або ми назвали B_z):

$$B_z = 0,04 * P_v + 0,986, \quad (3)$$

$$B_z = 1,0094 + 0,047 * \ln(NDVI) \quad (4)$$

де B_z – випромінювальна здатність.

4. Для розрахунку температури земної поверхні використовуємо метод, запропонований в роботі [14] на основі використання 10 каналу космічного знімку Landsat 8, так як 11 канал значно більше схильний до відблисків, засвітів і похибок датчика. Для обчислення яскравісних температур поверхні використовується наступне рівняння [15]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1} - 273,15 \quad (5)$$

де T – яскравісна температура у градусах Цельсія; K_1 , K_2 – калібрувальні константи; L_λ – спектральна яскравість на верхній границі атмосфери.

5. На наступному етапі обчислюємо температуру земної поверхні (LST) [15]:

$$LST = \frac{T}{\left(1 + \left(\lambda + \frac{T}{c2}\right) \cdot \ln(e)\right)} \quad (6)$$

де T – яскравісна температура поверхні; λ – довжина хвилі; $c_2 = h \cdot c / s$; h – постійна Планка; c – постійна Больцмана; s – швидкість світла.

Далі починаємо процес пошуку ділянок підвищених температур. Дані космічної зйомки використовуються на різних рівнях моделювання або як вхідні параметри для характеристики різних поверхневих покривів або в асиміляційних процедурах, які спрямовані на отримання адекватних параметрів для обчислення LST. Таким чином, використання UHI дозволяє виділити ділянки поверхні, на яких спостерігаються високі температури:

$$LST > \mu + 0.5 \cdot \delta, \quad (7)$$

де μ – просторове середнє арифметичне значення від LST; δ – стандартне відхилення LST.

В результаті виконаної операції (7) отримуємо растрове зображення, що показує температуру поверхні землі.

За підсумками цього етапу роботи була формалізована методика розрахунку температур земної поверхні за космічними знімками та створена модель для обробки всіх наборів даних за допомогою модулів *r.mapcalc* та *Graphical Modeler* у GRASS GIS. Використано мову Python для реалізації запропонованої методики.

Експериментальні результати. Тестування запропонованої в роботі методики проводилось на прикладі території міста Дніпро. На рисунку 2а) наведено результат розрахунку LST за 2021 рік; 2б) – результат виділення UHI за 2021 рік.

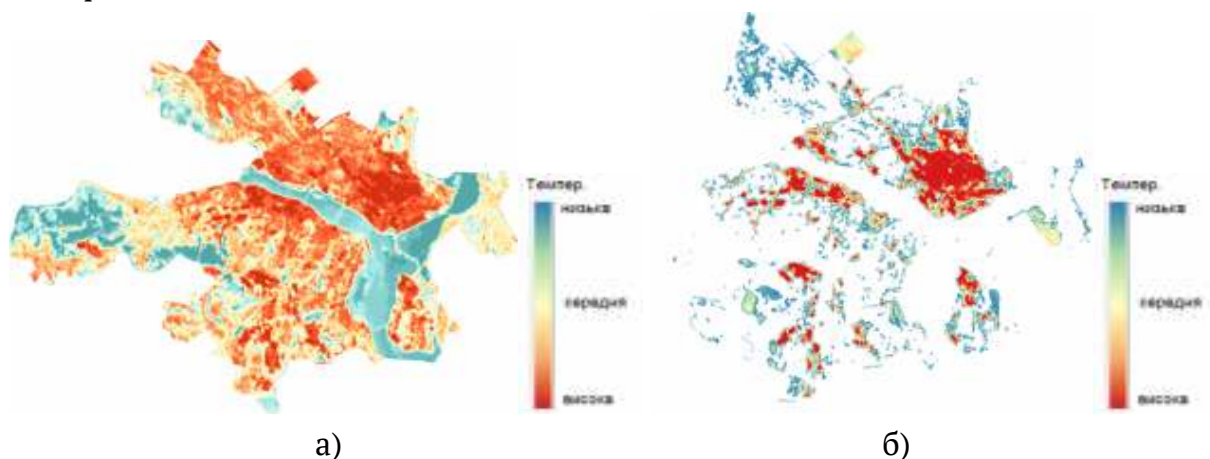


Рисунок 2 – Результат застосування методики пошуку та оцінки островів тепла для території м. Дніпро за 2021 рік: а) LST; б) UHI

На рисунку 3а наведено результат моніторингу теплових змін з 2013 по 2021 рік. При аналізі карти динаміки теплових островів м. Дніпро легко

помітити, що більша частина території міста потрапляє в зону аномально підвищеної температури порівняно з оточуючими територіями. Крім того, помітно збільшення островів тепла у період 2019-2020 років (рис. 3б) порівняно з 2013-2018 роками в районах приватного сектору, і навпаки зменшення островів тепла у 2021 році (рис. 3б) у промислових зонах. Докладніше розглядаючи період 2013-2015 років видно, що острови тепла розташовані переважно уздовж залізничних колій та в зонах з діючими промисловими підприємствами. Великий вплив має Індустріальний район (НПЗ «Інтерпайп»), проспект Івана Мазепи, вулиці Макарова, Робоча (Південний машинобудівний завод ім. А.М. Макарова, Дніпровський машинобудівний завод), залізна дорога, ТЕЦ. Це сприяє утворенню островів тепла, особливо в спекотні місяці. Варто зазначити, що теплові аномалії також розташовані над деякими сільськогосподарськими територіями на північ від міста через сильний нагрів ріллі. Таким чином, теплова карта дозволяє оцінити залежність утворення островів тепла на території Дніпра. Центр міста більше схильний до теплового забруднення через щільну забудову та велику тепловіддачу від споруд.

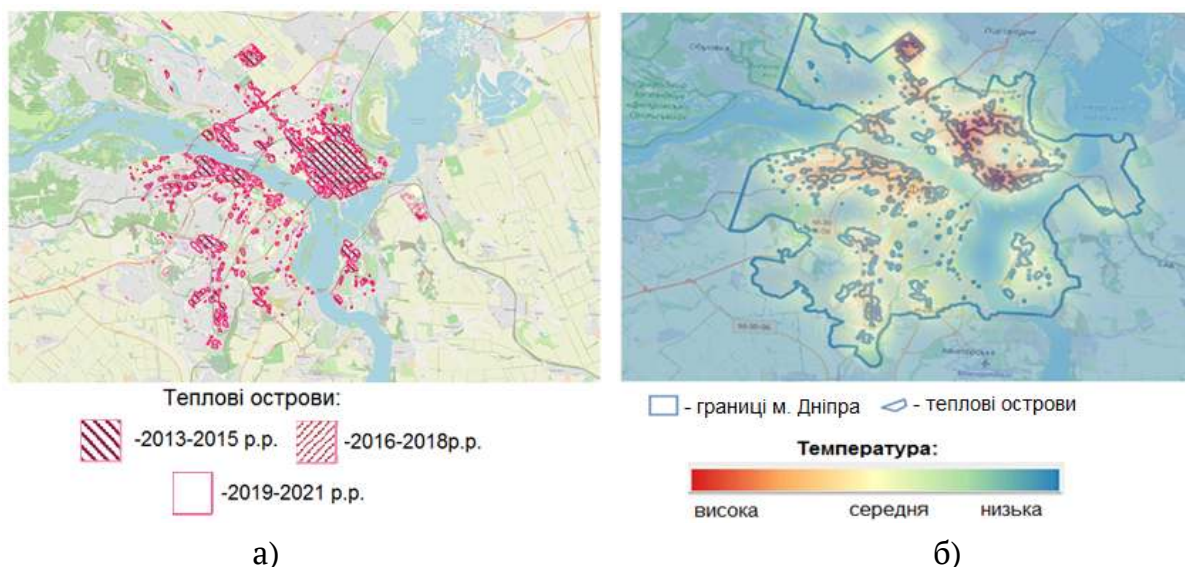


Рисунок 3 – Теплові острови м. Дніпро: а) за період за 2013 – 2021 роки;
б) за період 2019 – 2021 роки

На рисунку 4 наведено гістограму змін температурних показників. Розбиття гістограми яскравіших температур відбувалося за схемою "природні інтервали" (Natural Breaks), у якій границі класів визначаються шляхом угруповання подібних значень і максимально збільшують різницю між класами. У ході виділення вказаних вище щаблів температур границям класів присвоювалися найближчі цілі значення.

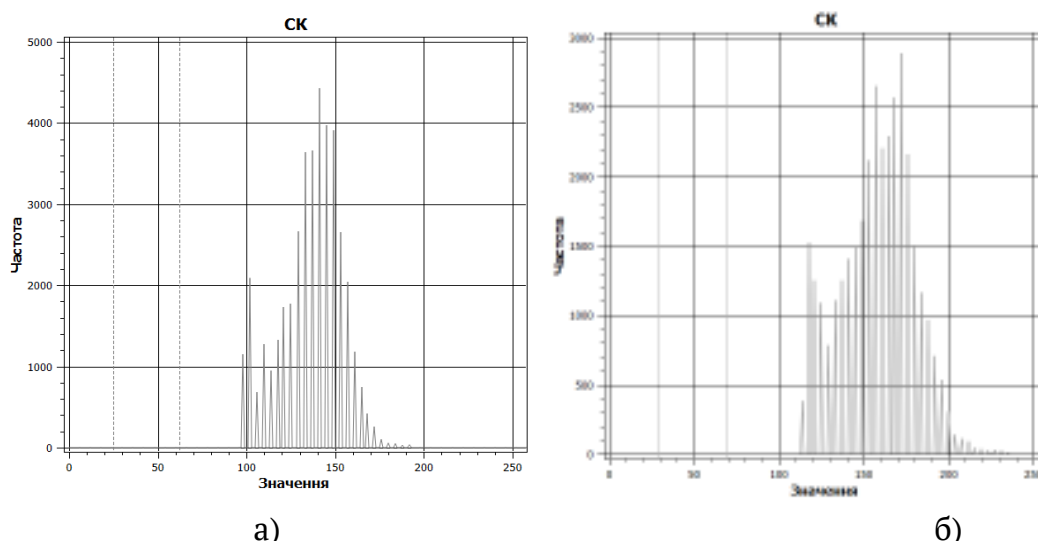


Рисунок 4 – Гістограми яскравісних температур: а) 2013 рік; б) 2021 рік

Висновки. Регулярний супутниковий моніторинг теплового стану урбанізованих геотехнічних систем дозволить своєчасно генерувати аварійні попередження, пов'язані з можливим виникненням УНІ. Проведені дослідження показали, що відбувається підвищення температури на ділянках, де рослинний покрив змінюється на непроникні поверхні і, як наслідок, збільшується середнє альбедо. Альбедо залежить від властивостей поверхні землі, причому вкрита рослинністю поверхня має нижче альбедо, ніж забудовані території. Таким чином, альбедо поверхні є важливим параметром дослідження «Міських островів тепла», що впливає на поверхневу енергію матеріалу. Крім того, характеристики ґрунтового покриття впливають на взаємодію між поверхневим шаром землі і вхідним випромінюванням поверхні. Тому важливо аналізувати як денну, так і нічну температуру поверхні для визначення взаємозв'язку між типом матеріалу та LST. Збільшення щільності забудови збільшує накопичення тепла в міських районах, що призводить до тепліших ночей. Водойми та зелені насадження знижують температуру поверхні та її негативний вплив на навколишнє середовище. Отримані в роботі карти розподілу температури земної поверхні, індексу NDVI і УНІ можуть бути використані у задачах міського планування разом із традиційними джерелами просторової інформації (ортофотопланами, топографічними картами, картами землекористування тощо) для отримання нової інформації щодо поліпшення стійкості міста до хвиль тепла. Дані спостережень за УНІ необхідні для зонування ділянок з різними типами землекористування, на-

приклад, збільшення кількості відкритого простору і зелені, поліпшення теплового комфорту громадян.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bhargava A., Bhargava S. (2018). Effects of Albedo in Urban Planning - Special Reference to Building Roofs. *Examines Mar Biol Oceanogr.*, 1(2), 6–7. DOI:<https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>
2. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // *Urban Sci.* — 2017. — Vol. 1(10).
3. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat // *Remote Sensing of Environment.* – 1997. – Vol 18. – P. 287–304.
4. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climate // *Remote sensing of Environment.* – 2003. — Vol. 86(3). – P. 370–384.
5. Зацерковний В. І., Оберемок Н.В., Березіна П. О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками LANDSAT. *Наукоємні технології* No 1(37), 2018, С. DOI:<https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>
6. Jin Yeu Tsou, Jing Zhuang, Yu Li, Yuanzhi Zhang. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. March 2017, *Urban Science* 1(1):10. DOI:<https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
7. Xiao J., Bonafoni S., Berger C. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sens.* 2019, 11(1), 48; <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
8. Wang W., Liu K. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. April 2019, *Physics and Chemistry of The Earth* 110. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>
9. Garkusha, I.M., Busygin, B.S. Study of the temperature of the earth's surface the city of Dnepropetrovsk using multispectral scanners// *GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 2013.
10. Busygin, B., Garkusha, I. Technology mapping of thermal anomalies in the city of Dnipropetrovsk, Ukraine, with application of multispectral sensors // *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency*, 2013.
11. Kavats O., Khramov D., Sergieieva K., Vasyliiev V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet // *Review of the Bulgarian Geological Society*, 2020, vol. 81, part 3, 195-197.

12. USGS Landsat Missions 2019 Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
13. Pat S., Chavez Jr. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9, September 1996, pp. 1025-1036
14. Joan-Cristian P, Francisco-Javier M, Luis A, Lluís P., Xavier P. 2018 Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry Remote Sensing 10, 1687.
15. Grigoraş G., Urişescu B. 2018 Spatial Hotspot Analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series

REFERENCES

1. Bhargava, A., & Bhargava, S. (2018). Effects of Albedo in Urban Planning - Special Reference to Building Roofs. Examines Mar Biol Oceanogr., 1(2), 6–7. DOI:<https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>
2. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // Urban Sci. — 2017. — Vol. 1(10).
3. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat // Remote Sensing of Environment. — 1997. — Vol 18. — P. 287–304.
4. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climate // Remote sensing of Environment. — 2003. — Vol. 86(3). — P. 370–384.
5. Zatserkovnyi V. I., Oberemok N.V., Berezina P. O. Prostorovo-chasovyi analiz «ostroviiv tepla» mehapolisa za suputnykovymy znimkamy LANDSAT. Naukoiemni tekhnolohii No 1(37), 2018, S. DOI:<https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>
6. Jin Yeu Tsou, Jing Zhuang, Yu Li, Yuanzhi Zhang. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. March 2017, Urban Science 1(1):10. DOI:<https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
7. Jingfeng Xiao, Stefania Bonafoni, Christian Berger. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. Remote Sens. 2019, 11(1), 48; <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
8. Weimin Wang, Kai Liu. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. April 2019, Physics and Chemistry of The Earth 110. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>

9. Garkusha, I.M., Busygin, B.S. Study of the temperature of the earth's surface the city of Dnepropetrovsk using multispectral scanners// GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2013.
10. Busygin, B., Garkusha, I. Technology mapping of thermal anomalies in the city of Dnipropetrovsk, Ukraine, with application of multispectral sensors // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency, 2013.
11. Kavats, O., Khramov, D., Sergieieva, K., Vasyliiev, V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet // Review of the Bulgarian Geological Society, 2020, vol. 81, part 3, 195-197.
12. USGS Landsat Missions 2019 Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
13. Pat S. Chavez, Jr. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9, September 1996, pp. 1025-1036
14. Joan-Cristian P, Francisco-Javier M, Luis A, Lluís P and Xavier P 2018 Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry Remote Sensing 10, 1687.
15. Grigoraş G and Urişescu B 2018 Spatial Hotspot Analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series.

Received 10.04.2023.

Accepted 12.04.2023.

Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images

Formulation of the problem. The development of urbanization processes resulted in Urban Heat Islands (UHI) - ur-ban areas of high temperatures due to the dominance of artificial surfaces that absorb and retain heat. UHIs adversely affect the environmental conditions of cities and people's health. Satellite images in the thermal infrared range of the electromagnetic spectrum allow identifying areas of the high thermal background of urbanized territories for management decisions support aimed at improving urban landscapes.

The aim of the work is to develop a methodology for temperature anomalies analysis and urban heat islands detection on digital space images from Landsat 8 satellite in the thermal infrared range of the electromagnetic spectrum.

Methodology of UHI detection. The methodology proposed in the paper includes a sequence of stages of collecting, and preprocessing satellite data, generating land surface temperature maps, identifying temperature anomalies, comprehensive analysis of high-temperature zones based on different-time data, and identifying areas of high temperatures stable over time.

Land Surface Temperature estimation. Land Surface Temperature (LST) is estimated from the band 10 data of space images from the Landsat 8 satellite. The initial data are subjected to atmospheric correction, after which the spectral radiation in the band is converted to brightness temperature, and then to LST (Celsius degrees).

UHI mapping. On each survey date, UHIs are identified as temperature anomalies - LST map pixels with values higher than the LST mean plus standard deviation within the study area.

Time series analysis of satellite images. UHI mapping is based on a time series of Landsat 8 images acquired during the warm season (when ambient temperatures are above zero) to eliminate the effect of snow and ice on the observation results. According to the time series of LST maps of different years, stable temperature anomalies are distinguished - UHIs presented on all images of the time series.

Conclusions. Time-stable UHIs of the urbanized territory are mapped and analyzed using Landsat 8 LST data time series. The areas of the high thermal background are compared with the classes of the earth's surface. It is concluded that increasing urban density contributes to the accumulation of heat and increases the ambient temperature. The maps of LST distribution, vegetation indices, and UHI generated in the work can be used in urban planning tasks together with traditional sources of spatial information to obtain new information on improving the city's resistance to heat waves. UHI observation data are necessary for zoning areas with different land use types, for example, increasing the amount of open space and greenery, and improving the thermal comfort of citizens.

Keywords: urban heat island, land surface temperature, LST albedo, UHI, Earth remote sensing, aerospace monitoring, thermal imaging.

Каштан Віта Юріївна – к.т.н, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Сергєєва Катерина Леонідівна — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Коробко Ольга Валеріївна – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Іванов Денис Валерійович – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Kashtan Vita – Ph.D., Associate Professor of the Information Technology and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Sergieieva Kateryna — Ph.D., Associate Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.

Korobko Olha - Assistant Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.

Ivanov Denys - Assistant Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.