

## ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В МІСТАХ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

### REMOTE SENSING MONITORING OF THERMAL CONDITIONS IN CITIES: THEORETICAL BACKGROUND

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), Вакулюк Л.А., старший викладач (Волинський національний університет ім. Лесі Українки) Резь Р.А., 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), Vakulyuk L.A., Senior Lecturer (Lesya Ukrainka Volyn National University), Rez R.A., PhD student (Lesya Ukrainka Volyn National University)

*Феномен, відомий як міський тепловий острів, спостерігається у містах по всьому світу з 1800-х років. Метеорологічні служби в різних країнах систематично фіксують температуру повітря в різних точках. Однак ускладнене просторове розташування поверхонь у міських районах утруднює або навіть унеможливує оцінку локальних змін температури поверхні лише на підставі цих даних. Для таких оцінок використовуються супутникові знімки для визначення температури поверхні землі. Дані дистанційного термального інфрачервоного сенсора дозволяють здійснювати аналіз температури поверхні землі як у просторовому, так і у часовому вимірах, навіть на глобальному рівні. Оскільки випромінювальна здатність та атмосферні ефекти є ключовими факторами, багато дослідників розробили різноманітні методики з урахуванням цих факторів. В цій роботі розглянуто три алгоритми визначення температури земної поверхні (LST) - алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм та метод рівняння переносу випромінювання, а також три моделі на основі NDVI - модель Ван де Греїнд та Ове, модель Валор та Каселлес, а також модель на основі порогового значення NDVI*

*A phenomenon known as the Urban Heat Island (UHI) has been observed in cities around the world since the 1800s. Meteorological services in different countries systematically record air temperatures at different locations. However, the complicated*

*spatial arrangement of surfaces in urban areas makes it difficult or even impossible to estimate local changes in surface temperature based on these data alone. For such assessments, satellite images are used to determine the Land Surface Temperature (LST). This indicator is a key factor that affects air temperature and is also used to create maps of the spatial distribution of temperature characteristics of the earth's surface. Remote thermal infrared sensor data allows for the analysis of the earth's surface temperature in both spatial and temporal dimensions, even at the global level. The accuracy of the determination depends on atmospheric effects, sensor parameters such as spectral range and viewing angle, as well as surface parameters such as emissivity and geometry. Since emissivity and atmospheric effects are key factors, many researchers have developed various techniques to account for these factors. In this paper, three algorithms for determining the land surface temperature (LST) - the single window algorithm, the single channel algorithm, and the radiation transfer equation method - as well as three NDVI-based models - the Van de Groen and Ouwe model, the Valor and Caselles model, and the NDVI threshold model - are reviewed.*

*The use of remote sensing data on land surface temperature (LST) and land surface emissivity (LSE) in the study of urbanized areas has a wide range of applications. LST measurements allow for determining the thermal regimes of different city districts, which can be useful in the development of master plans and urban design. LST data helps to identify and study urban thermal inversions depending on the types of buildings and the presence of green areas, which is important for analyzing the microclimate and air quality in cities.*

*The LST study can serve as a basis for determining thermal comfort and identifying areas where measures to improve the urban environment should be implemented. Monitoring changes in LST allows us to study the development of urbanized areas and their impact on the environment.*

*Ключові слова: урбанізовані території, дистанційне зондування, термальні інфрачервоні зображення, Landsat, міський тепловий острів, температура земної поверхні*

*Keywords: urbanized areas, remote sensing, thermal infrared images, Landsat, urban heat island, land surface temperature*

**Вступ.** Глобальне міське населення зросло з 30 % у 1950 році до 55 % у 2018 році і, за прогнозами, становитиме 68 % до 2050 року [1]. Урбанізація робить непропорційно великий внесок у глобальну зміну клімату: у 1990-х роках ~97 % антропогенних викидів CO<sub>2</sub> припадало на ~2 % загальної площі суші [2]. Очікується, що екстремальні теплові явища (теплові хвилі) будуть частішати і ставати дедалі сильнішими з глобальним потеплінням і становитимуть загрозу для здоров'я людей в усьому світі через зростання смертності та захворюваності. Заборона утилізації призводить до зміни мікроклімату, що може посилити наслідки глобального потепління. Відповідні дослідження на цю тему зосереджені в середніх широтах, тоді як вищі широти - вище 45° - недостатньо представлені та вразливі [3]. У прохолодних високих широтах забудоване

середовище часто планується і проектується таким чином, щоб зменшити втрати тепла та споживання енергії в зимові місяці. Міста з відносно прохолодними максимальними літніми температурами мають значно нижчий температурний поріг смертності, пов'язаної з теплом [4]. Це може призвести до збільшення використання енергії для охолодження, що призведе до подальшого збільшення викидів CO<sub>2</sub> і сприятиме глобальному потеплінню. Міська рослинність має потенціал для зниження температури повітря і, таким чином, споживання енергії для охолодження [5].

Міські території характеризуються зменшенням рослинного покриву і збільшенням непроникних поверхонь - тротуарів, доріг і будівель - у порівнянні з сільською місцевістю, що часто призводить до того, що в місті тепліше, ніж у навколишній сільській місцевості. Це явище, відоме як міський тепловий острів (Urban Heat Island (UHI)), спостерігається в містах по всьому світу з 1800-х років. Метеорологічні служби в багатьох країнах регулярно вимірюють температуру повітря в окремих точках. Однак складне просторове розташування поверхонь у міських районах ускладнює або навіть унеможливує оцінку локальних варіацій температури поверхні на основі лише цих даних. Супутникові знімки використовуються для оцінки температури поверхні землі (Land Surface Temperature (LST)), яка є основним фактором, що впливає на температуру повітря, а також для картографування просторового розподілу температури поверхні землі [6]. Температура повітря може бути вищою або нижчою за температуру поверхні в залежності від різних факторів, таких як наявність і напрямок вітру, інсоляція та характеристики поверхні [7]. Тим не менш, дані дистанційного зондування можуть забезпечити оцінку просторового розподілу температури на великих площах.

### **Постановка завдання**

Температура земної поверхні (LST) є одним з ключових параметрів, що впливають на енергетичний баланс з ключових параметрів, що впливають на баланс поверхневої енергії, регіональні кліматичні умови, теплові потоки та енергообмін. [7–9]. Багато дослідників вивчали важливість та вплив довготривалого сонячного випромінювання на різні включаючи міський клімат і дослідження поверхневих теплових островів (Surface Heat Island (SHI) [10, 11], евапотранспірацію [12], моніторинг лісових пожеж [13], геологічні та геотермальні дослідження [12, 13]. Крім того, LST було затверджено як один з пріоритетних параметрів Міжнародної програми з геосфери та біосфери (IGBP)[14, 15]. Дані дистанційного термального інфрачервоного зондування (Thermal Infrared (TIR)) дозволяють проводити часовий і просторовий аналіз LST у великому масштабі, навіть на глобальному рівні. Точне визначення LST з даних TIR залежить від атмосферних ефектів, параметрів датчика, тобто спектрального діапазону і кута огляду, та параметрів поверхні, таких як

випромінювальна здатність і геометрія [8]. Оскільки випромінювальна здатність і атмосферні ефекти є двома фундаментальними факторами для отримання LST з термальних даних, багато дослідників запропонували різні підходи для отримання LST з урахуванням цих факторів [16, 17]. Ці алгоритми називаються залежно від кількості використовуваних смуг сенсорів. Наприклад, одноканальні алгоритми використовують одну смугу TIR. Однак, методи з розділеним вікном або багатоканальні включають більше однієї смуги TIR.

Метою даної роботи є аналіз найпоширеніших методи визначення LST та LSE, що застосовуються до даних дистанційного зондування з КА серії Landsat.

### **Виклад основного матеріалу**

Супутники серії Landsat безперервно надають дані дистанційного зондування Землі з середньою роздільною здатністю вже понад чотири десятиліття. Починаючи з 23 липня 1972 року, загалом було запущено вісім серій супутників Landsat для цілей дистанційного зондування Землі. Landsat 6 був єдиним супутником, який не зміг досягти орбіти. Решта супутників забезпечили унікальний ресурс для дослідження глобальних змін і застосування в сільському господарстві, картографії, геології, лісовому господарстві, регіональному плануванні, моніторингу протягом останніх чотирьох десятиліть.

Landsat 5 TM і Landsat 7 ETM+ мають шість діапазонів відображення (видимий, ближній інфрачервоний, і короткохвильовий інфрачервоний, просторова роздільна здатність 30 м) і один діапазон в області TIR (смуга 6). Тепловий діапазон має власну просторову роздільну здатність 120 м та 60 м для сенсорів TM та ETM+, відповідно, але він надається кінцевим споживачам з роздільною здатністю 30 м після передискретизації кубічною згорткою. Датчик OLI Landsat 8 має дев'ять смуг відбиття з просторовою роздільною здатністю 30 м, а датчик Landsat 8 TIRS має дві смуги в TIR (смуга 10 і смуга 11). Ці теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 100 м, але передискретизуються і публікуються з роздільною здатністю 30 м Геологічною службою США.

Алгоритм одного вікна [18], Одноканальний алгоритм [19], Метод рівняння переносу випромінювання та алгоритм розділеного вікна [17, 18] є одними із найшороковживаніших алгоритмів визначення температури поверхні землі (LST) із вищезгаданих даних дистанційного зондування Землі. У той час як перші три методи можуть бути застосовані до даних Landsat 5 TM, 7 ETM+ та 8 OLI/TIRS, алгоритм розділеного вікна може бути застосований лише до даних Landsat 8 OLI/TIRS, оскільки для цього потрібно щонайменше два діапазони TIR. Істотні відмінності між цими методами полягають у математичному формулюванні та вхідних параметрах [20]. На додаток до випромінювальної здатності та

пропускання атмосфери, які є спільними для всіх методів, алгоритм одного вікна потребує приземної температури повітря для розрахунку ефективної середньої температури атмосфери, на відміну від інших методів. І навпаки, метод рівняння переносу випромінювання та одноканальний алгоритм потребують висхідного та низхідного атмосферного випромінювання для знаходження LST.

### Алгоритм одного вікна

Алгоритм одного вікна (Mono Window Algorithm, MWA) був розроблений Цинь та ін. [43] для даних Landsat TM. Метод потребує трьох основних параметрів, а саме: випромінювальної здатності, коефіцієнта пропускання атмосфери та ефективної середньої температури атмосфери. Значення LST за алгоритмом одного вікна можна визначити як:

$$T_s = \frac{\{a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T - DT_a\}}{C}, \quad (1)$$

$$a = -67.355351,$$

$$b = 0.458606$$

$$C = \varepsilon \times \tau,$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon) \tau],$$

де  $T_s$  - температура земної поверхні в Кельвінах,  $T$  - температура яскравості на датчику в Кельвінах,  $T_a$  - ефективна середня температура атмосфери в Кельвінах,  $\tau$  - коефіцієнт пропускання атмосфери,  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (Land Surface Emissivity (LSE)),  $a$  і  $b$  - константи алгоритму,  $C$  і  $D$  - параметри алгоритму, обчислені з використанням LSE і коефіцієнт пропускання.

### Одноканальний алгоритм

У роботі [19] було представлено перегляд алгоритму одного вікна для отримання LST з даних Landsat TIR. Враховуючи алгоритм одного вікна, LST ( $T_s$ ) можна обчислити, використовуючи наступне загальне рівняння:

$$T_s = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (LSE),  $L_{sen}$  - випромінювання на сенсорі в тепловому діапазоні,  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  - атмосферні функції, а  $\gamma, \delta$  - два параметри, що задаються:

$$\gamma \approx \frac{T^2}{b_\gamma L_{сен}}$$

$$\delta \approx T - \frac{T^2}{b_\gamma}$$

де  $b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda}$ ,  $c_2 = 14387,7 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ , а  $\lambda_i$  - ефективна довжина хвилі для смуги  $i$ , яка визначається як:

$$\lambda_i = \frac{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} \lambda f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} f_i(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

де  $f_i(\lambda)$  - функція спектрального відгуку для відповідної смуги.  $\lambda_{1,i}$  та  $\lambda_{2,i}$ , - нижня та верхня границя  $f_i(\lambda)$ , відповідно. Значення  $b_\gamma$  дорівнює 1256 К і 1277 К для смуги 6 знімків Landsat 5 і Landsat 7, відповідно; для смуги 10 і смуги 11 Landsat 8 воно дорівнює 1320 К і 1199 К відповідно. Атмосферні функції  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  та  $\psi_3$  визначаються як:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L_\lambda^\downarrow - \frac{L_\lambda^\uparrow}{\tau}; \psi_3 = L_\lambda^\downarrow$$

де  $L_\lambda^\uparrow (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - висхідне випромінювання або випромінювання атмосферного шляху,  $L_\lambda^\downarrow (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  низхідне випромінювання або випромінювання неба.

Метод рівняння переносу випромінювання  
 Простим методом отримання LST з однієї смуги TIR є інверсія рівняння радіаційного переносу випромінювання (RTE) відповідно до наступних виразів:

$$L_\lambda^{sen} = \left[ \varepsilon B_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon) L_\lambda^\downarrow \right] \tau + L_\lambda^\uparrow \quad (4)$$

де  $L_\lambda^{sen} (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - зареєстроване на сенсорі випромінювання відповідного теплового діапазону,  $B_\lambda(T_s) = (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - випромінювання чорного тіла. Випромінювання чорного тіла ( $B_\lambda$ ) при температурі  $T_s$  можна отримати, з рівняння (4):

$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon} \quad (5)$$

Звідси вже можна отримати  $T_s$ , використовуючи закон Планка як:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left( \frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \tau)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon}} \right)} \quad (6)$$

де  $K_1$  та  $K_2$  - калібрувальні константи для даних Landsat.

### Алгоритм розділеного вікна

У попередніх дослідженнях було представлено різні алгоритми розділеного вікна (Split Window Algorithms (SWA) для різних датчиків [21–23], а детальна інформація про SWA наведена в [24]. В цій роботі ми розглядаємо алгоритми розділеного вікна, розроблений в роботі [25] з коефіцієнтами перепараметризованими у [17], що відповідають кривій спектрального відбиття Landsat 8 TIRS.

Геологічна служба США рекомендувала не використовувати смугу 11 Landsat 8 для отримання LST через велику калібрувальну невизначеність [26]. Однак деякі дослідники стверджують, що вони отримали задовільні результати за допомогою алгоритми розділеного вікна [17, 27]. Тому в цьому дослідженні ми також аналізуємо алгоритм розділеного вікна. Згідно з алгоритмом розділеного вікна, LST ( $T_s$ ) можна обчислити за допомогою наступного рівняння:

$$T_s = T_{10} + B_1(T_{10} - T_{11}) + B_0, \quad (7)$$

$$\text{де } B_0 = \frac{C_{11}(1 - A_{10} - C_{10})L_{10} - C_{10}(1 - A_{11} - C_{11})L_{11}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}},$$

$$B_1 = \frac{C_{10}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}},$$

$$A_{10} = \varepsilon_{10}\tau_{10},$$

$$A_{11} = \varepsilon_{11}\tau_{11},$$

$$C_{10} = (1 - \tau_{10})(1 + (1 - \varepsilon_{10})\tau_{10}), \quad C_{11} = (1 - \tau_{11})(1 + (1 - \varepsilon_{11})\tau_{11}).$$

Тут  $\varepsilon_{10}$  та  $\varepsilon_{11}$  - LSE для смуг 10 і 11 відповідно,  $\tau_{10}$  і  $\tau_{11}$  - атмосферне пропускання атмосфери для смуг 10 і 11, відповідно.

### **Моделі випромінювальної здатності земної поверхні (LSE)**

Випромінювальна здатність земної поверхні LSE ( $\varepsilon$ ) - це здатність поверхні перетворювати теплову енергію в енергію випромінювання [28]. Випромінювальна здатність земної поверхні є одним з ключових параметрів для отримання точних даних температури земної поверхні з за допомогою даних дистанційного зондування. Напівемпіричні методи, фізично обґрунтовані методи та багатоканальні методи розділення температури/випромінювальної здатності є трьома різними категоріями для отримання LSE з космосу. Фізично обґрунтовані методи і багатоканальні методи не можуть бути застосовані до даних Landsat для отримання LSE через обмеження, наведені в багатьох дослідженнях, такі як вимога більш ніж двох TIR-діапазонів або нічних знімків. Напівемпіричні методи визначення випромінювальної здатності земної поверхні містять метод випромінювальної здатності на основі класифікації [21] та метод оцінки випромінювання на основі нормалізованого диференційного індексу рослинності NDVI [29], які підходять для оцінки LSE за даними Landsat. Метод випромінювальної здатності на основі класифікації генерує зображення LSE з класифікованого зображення шляхом застосування значення випромінювальної здатності для кожного класу. Однак, метод випромінювальної здатності на основі класифікації не є практичним, оскільки вимагає хорошого знання досліджуваної території та вимірювань випромінювальної здатності на поверхнях, репрезентативних для різних класів. Методи на основі NDVI є оперативними і найбільш часто використовуваними методами пошуку LSE, оскільки вони прості у застосуванні і дають задовільні результати [28].

### **Модель Ван де Грінд та Ове**

Ця модель була застосована до методів пошуку LST всіх серій Landsat (Landsat 5 TM, 7 ETM+, та 8 OLI/TIRS). В роботі [30] було запропоновано логарифмічний підхід для пошуку LSE на основі NDVI в діапазоні від 0,157 до 0,727. NDVI отримують з використанням ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного (R) діапазонів. Запропонована модель має вигляд:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (8)$$



### Модель Валор та Каселлес

Валор і Каселлес в роботі [29] запропонували теоретичну модель, що може бути застосована до усіх серій Landsat, яка пов'язує випромінювальну здатність з NDVI певної поверхні за допомогою коефіцієнта:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + 4 \langle d\varepsilon \rangle P_v (1 - P_v) \quad (9)$$

$\varepsilon_s$  і  $\varepsilon_v$  представляють випромінювальну здатність рослинності і ґрунту відповідно.  $\langle d\varepsilon \rangle$  - член, що враховує ефект порожнин, який залежить від геометрії поверхні.  $P_v$  (також відомий як фракційний рослинний покрив) - це частка рослинності, яка розраховується за формулою [103]:

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2, \quad (10)$$

де  $NDVI_{\max} = 0,5$  і  $NDVI_{\min} = 0,2$  у глобальній ситуації [70]. Як запропонували Валор та Каселлес [82],  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  приймаються 0,985 і 0,960, відповідно. Крім того, було розраховано середнє значення для члена  $\langle d\varepsilon \rangle$  як 0,015.

### Модель LSE на основі порогового значення NDVI ( $NDVI^{THM}$ )

У роботах [31, 32] пропонується оцінювати LSE на основі NDVI порогових значень ( $NDVI^{THM}$ ), розглядаючи три різні випадки, як представлено в рівнянні (11). У першому випадку ( $NDVI < 0,2$ ) піксель розглядається як голий ґрунт, а випромінювальна здатність отримується зі значень відбиття в червоній області. У другому випадку ( $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$ ) піксель складається з сумішшю голого ґрунту та рослинності, а в третьому випадку ( $NDVI > 0,5$ ) пікселі зі значеннями  $NDVI > 0,5$  вважаються повністю вкритими рослинністю.

$$\varepsilon = \begin{cases} a_i \rho_R + b_i & NDVI < 0.2 \\ \varepsilon_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon, \quad d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v) F_{\varepsilon_v} & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ NDVI > 0.5 & \end{cases} \quad (11)$$

У рівнянні (11)  $\rho_R$  - це значення коефіцієнта відбиття червоної смуги,  $a_i$  та  $b_i$  оцінюються з емпіричного співвідношення між коефіцієнтом відбиття червоної смуги та зображенням спектрорадіометра з середньою роздільною здатністю та бібліотекою випромінювальної здатності.  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  - випромінювальна здатність ґрунту і рослинності, відповідно.  $d''$  -

ефект порожнини ефект порожнин, зумовлений шорсткістю поверхні, як і в попередній моделі ( $de = 0$  для плоских поверхонь).  $F$  - геометричний геометричний коефіцієнт форми, прийнятий за середнє значення 0,55 [20].

## Висновки

У цьому дослідженні розглянуто три алгоритми визначення температури земної поверхні (LST) - алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм та метод рівняння переносу випромінювання.

Оскільки випромінювальна здатність земної поверхні (LSE) є одним з найважливіших факторів, що впливають на точність методів пошуку LST, було також розглянуто різні моделі на основі NDVI. Три моделі на основі NDVI, а саме: Модель Ван де Грінд та Ове, Модель Валор та Каселлес, а також модель на основі порогового значення NDVI ( $NDVI^{THM}$ ) були розглянуті для даних Landsat 5 TM і 7 ETM+.

Теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 120 м, 60 м і 100 м для Landsat 5 TM, 7 ETM+ і 8 TIRS, відповідно, але вони надаються кінцевим користувачам з роздільною здатністю 30 м після передискретизації кубічною згорткою. Різні методи зменшення масштабу для даних TIR або LST можуть бути використані в подальшій роботі для дослідження точності LST.

Використання даних про температуру земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) та випромінювання земної поверхні (Land Surface Emissivity, LSE) з дистанційного зондування в дослідженні урбанізованих територій має широкий спектр застосувань. Вимірювання LST дозволяє визначити тепловий режим різних районів міста, що може бути корисним при розробці генеральних планів та дизайну міського середовища. Дані LST допомагають виявляти та вивчати міські теплові інверсії в залежності від типів забудови та наявності зелених зон, що важливо для аналізу мікроклімату та якості повітря в містах.

Дослідження LST може служити основою для визначення теплового комфорту та ідентифікації територій, де необхідно впроваджувати заходи для поліпшення міського середовища. Слідкування за змінами LST дозволяє вивчати розвиток урбанізованих територій та їх вплив на оточуюче середовище.

В цілому, дані про температуру земної поверхні та випромінювання земної поверхні з дистанційного зондування є потужним інструментом для вивчення міських областей та урбанізованих територій, дозволяючи отримувати інформацію про тепловий режим та взаємодію міста з навколишнім середовищем.

## References

1. Adamo, S. B., Sherbinin, A. de. Population distribution, urbanization, internal migration, and development: An international perspective. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2011.

- C. 161–195.
2. Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., Pomaz, V. L. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*. 2004. Vol. 173, No. 2–3. C. 295–312.
  3. Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., та ін. Heatwave and health impact research: A global review. *Health & place*. 2018. Vol. 53. C. 210–218.
  4. Gosling, S. N., McGregor, G. R., Páldy, A. Climate change and heat-related mortality in six cities Part I: model construction and validation. *International journal of biometeorology*. 2007. Vol. 51. C. 525–540.
  5. Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., та ін. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings*. 1997. Vol. 25, No. 2. C. 139–148.
  6. Voogt, J. A., Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of the environment*. 2003. Vol. 86, No. 3. C. 370–384.
  7. Prihodko, L., Goward, S. N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60, No. 3. C. 335–346.
  8. Dash, P., Göttsche, F.-M., Olesen, F.-S., та ін. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, No. 13. C. 2563–2594.
  9. Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of the environment*. 2013. Vol. 131. C. 14–37.
  10. Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., Kaya, S. Evaluation of spatio-temporal variability in Land Surface Temperature: A case study of Zonguldak, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 2016. Vol. 188. C. 1–15.
  11. Naughton, J., McDonald, W. Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 14. C. 1722.
  12. Senay, G. B., Schauer, M., Velpuri, N. M., та ін. Long-term (1986–2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of the United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 13. C. 1587.
  13. Maffei, C., Alfieri, S. M., Menenti, M. Relating spatiotemporal patterns of forest fires burned area and duration to diurnal land surface temperature anomalies. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 11. C. 1777.
  14. Townshend, J. R., Justice, C. O., Skole, D., та ін. The 1 km resolution global data set: Needs of the international geosphere biosphere program! *International Journal of Remote Sensing*. 1994. Vol. 15, No. 17. C. 3417–3441.
  15. Meng, X., Cheng, J., Sensing, S. L.-R., та ін. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. C. 1247.
  16. Becker, F. Toward a local split window method over the land surface. *Int. J. Remote Sensing*. 1990. Vol. 11. C. 19–34.
  17. Yu, X., Guo, X., Sensing, Z. W.-R., та ін. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm, and single channel. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. C. 6.
  18. Qin, Z., Karnieli, A., Remote, P. B.-I. journal of, та ін. A mono-window algorithm

- for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 2001. Vol. 22, No. 18. C. 3719–3746.
19. Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., та ін. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *X PonsIEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2009. Vol. 47, No. 1. C. 339.
  20. Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., environment, L. P.-R. S. of, та ін. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Elsevier.
  21. Sun, D., Research, R. P.-J. of geophysical, 2003, U. Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of geophysical research: atmospheres*. 2003. Vol. 108, No. D11. C. 4326.
  22. Pedelty, J., Devadiga, S., Masuoka, E., та ін. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2007. C. 1021–1025.
  23. Wan, Z., Remote, J. D.-I. T. on geoscience and, 1996, U. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
  24. Li, Z., Tang, B., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Elsevier.
  25. Mao, K., Qin, Z., Shi, J., та ін. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, No. 15. C. 3181–3204.
  26. Landsat 8 OLI and TIRS Calibration Notices | U.S. Geological Survey: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice>(дата звернення: 25.11.23).
  27. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*. 2018.
  28. Sobrino, J., Raïssouni, N., Environment, Z. L.-R. S. of, та ін. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Elsevier. 2001. Vol. 75. C. 256–266.
  29. Valor, E., Environment, V. C.-R. sensing of, 1996, undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Elsevier. 1995. Vol. 57. C. 167–184.
  30. Griend, A. A. Van De, Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. C. 1119–1131.
  31. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*.
  32. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., та ін. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *A PlazaIEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2008. Vol. 46, No. 2.

## **Література**

1. Adamo, S. B., Sherbinin, A. de. Population distribution, urbanization, internal migration, and development: An international perspective. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2011. C. 161–195.

2. Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber, H. J., Pomaz, V. L. Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle. *Ecological Modelling*. 2004. Vol. 173, No. 2–3. C. 295–312.
3. Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., та ін. Heatwave and health impact research: A global review. *Health & place*. 2018. Vol. 53. C. 210–218.
4. Gosling, S. N., McGregor, G. R., Páldy, A. Climate change and heat-related mortality in six cities Part 1: model construction and validation. *International journal of biometeorology*. 2007. Vol. 51. C. 525–540.
5. Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., та ін. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and buildings*. 1997. Vol. 25, No. 2. C. 139–148.
6. Voogt, J. A., Oke, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of the environment*. 2003. Vol. 86, No. 3. C. 370–384.
7. Prihodko, L., Goward, S. N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 60, No. 3. C. 335–346.
8. Dash, P., Göttsche, F.-M., Olesen, F.-S., та ін. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, No. 13. C. 2563–2594.
9. Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of the environment*. 2013. Vol. 131. C. 14–37.
10. Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., Kaya, S. Evaluation of spatio-temporal variability in Land Surface Temperature: A case study of Zonguldak, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 2016. Vol. 188. C. 1–15.
11. Naughton, J., McDonald, W. Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 14. C. 1722.
12. Senay, G. B., Schauer, M., Velpuri, N. M., та ін. Long-term (1986–2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of the United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 13. C. 1587.
13. Maffei, C., Alfieri, S. M., Menenti, M. Relating spatiotemporal patterns of forest fires burned area and duration to diurnal land surface temperature anomalies. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 11. C. 1777.
14. Townshend, J. R., Justice, C. O., Skole, D., та ін. The 1 km resolution global data set: Needs of the international geosphere biosphere program! *International Journal of Remote Sensing*. 1994. Vol. 15, No. 17. C. 3417–3441.
15. Meng, X., Cheng, J., Sensing, S. L.-R., та ін. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. C. 1247.
16. Becker, F. Toward a local split window method over the land surface. *Int. J. Remote Sensing*. 1990. Vol. 11. C. 19–34.
17. Yu, X., Guo, X., Sensing, Z. W.-R., та ін. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm, and single channel. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. C. 6.
18. Qin, Z., Karnieli, A., Remote, P. B.-I. journal of, та ін. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application

- to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*. 2001. Vol. 22, No. 18. C. 3719–3746.
19. Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., та ін. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *X PonsIEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2009. Vol. 47, No. 1. C. 339.
  20. Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., environment, L. P.-R. S. of, та ін. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Elsevier.
  21. Sun, D., Research, R. P.-J. of geophysical, 2003, U. Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8). *Journal of geophysical research: atmospheres*. 2003. Vol. 108, No. D11. C. 4326.
  22. Pedely, J., Devadiga, S., Masuoka, E., та ін. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments. *IEEE International Geoscience and remote sensing Symposium*. 2007. C. 1021–1025.
  23. Wan, Z., Remote, J. D.-I. T. on geoscience and, 1996, U. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
  24. Li, Z., Tang, B., Wu, H., та ін. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Elsevier.
  25. Mao, K., Qin, Z., Shi, J., та ін. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26, No. 15. C. 3181–3204.
  26. Landsat 8 OLI and TIRS Calibration Notices | U.S. Geological Survey: URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice>(дата звернення: 25.11.23).
  27. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*. 2018.
  28. Sobrino, J., Raissouni, N., Environment, Z. L.-R. S. of, та ін. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Elsevier. 2001. Vol. 75. C. 256–266.
  29. Valor, E., Environment, V. C.-R. sensing of, 1996, undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Elsevier. 1995. Vol. 57. C. 167–184.
  30. Griend, A. A. Van De, Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 14, No. 6. C. 1119–1131.
  31. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*.
  32. Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., та ін. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *A PlazaIEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2008. Vol. 46, No. 2.