

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру**

На правах рукопису

ПТАЧИК ВЛАДИСЛАВ АНДРІЙОВИЧ

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ (LST) ЗА ТЕПЛОВИМИ
ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА
ПРИКЛАДІ М. ЛУЦЬК**

Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій
Освітня програма Геодезія та землеустрій
Робота на здобуття першого (бакалаврського) освітнього рівня

Науковий керівник:
ВАКУЛЮК ЛАРИСА АДАМІВНА
старший викладач

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ
Протокол №
засідання кафедри геодезії,
землевпорядкування і кадастру
Від . . . 2025 р.

Завідувач кафедри
д.т.н., проф. А.В. Уль _____

ЛУЦЬК – 2025

Анотація

Птачик В. А. *Методи визначення температури земної поверхні (LST) за тепловими даними дистанційного зондування на прикладі м. Луцьк. Кваліфікаційна робота на правах рукопису. –ВНУ імені Лесі Українки, МОН України, Луцьк, –2025. -78 с.*

В бакалаврській роботі розглянуто теоретичні основи дистанційного моніторингу теплового режиму в містах. Проаналізовано та систематизовано спектральні індекси для дистанційних досліджень міських територій. Обчислено температуру земної поверхні у часовому розрізі для території Луцької територіальної громади.

Ключові слова: *температура земної поверхні (LST), моделювання, спектральний індекс, тепловий острів, параметри.*

Annotation

Ptachyk V. A. *Methods for determining land surface temperature (LST) from thermal remote sensing data using the example of the city of Lutsk. Qualification work on the rights of the manuscript. -Lesya Ukrainka National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lutsk, -2025. -78 c.*

The bachelor's thesis examines the theoretical foundations of remote monitoring of thermal conditions in cities. Spectral indices for remote sensing of urban areas have been analyzed and systematized. The temperature of the earth's surface over time was calculated for the territory of the Lutsk territorial community.

Keywords: *land surface temperature (LST), modeling, spectral index, heat island, parameters.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В МІСТАХ.....	12
1.1. Методи визначення LST з даних TIR	12
1.2. Особливості застосування даних з супутників серії Landsat.	13
1.3. Алгоритм одного вікна	14
1.4. Одноканальний алгоритм	15
1.5. Метод рівняння переносу випромінювання	16
1.6. Алгоритм розділеного вікна	16
1.7. Моделі випромінювальної здатності земної поверхні (LSE).....	17
1.8. Модель Ван де Грінд та Ове	18
1.9. Модель Валор та Каселлес.....	19
1.10. Модель LSE на основі порогового значення NDVI (NDVITHM).....	19
РОЗДІЛ 2. СПЕКТРАЛЬНІ ІНДЕКСИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ	21
2.1. Основні аспекти дослідження.....	21
2.2. Мультиспектральні дані ДЗЗ	24
2.3. Просторова роздільна здатність в урбаністиці	25
2.4. Спектральні індекси у різних діапазонах.....	26
2.5. Індекси з видимим, ближнім інфрачервоним та короткохвильовим інфрачервоним діапазонами.....	28
2.6. Спектральні індекси з термальними діапазонами	29
2.7. Спектральні індекси з нічним освітленням.....	32
2.8. Комплексні спектральні індекси з оптичними, NTL і тепловими діапазонами.....	34
РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ПРИКЛАДІ ЛУЦЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ	36
3.1. Загальні відомості.....	36
3.2. Коротка інформація про Луцьку міську територіальну громаду.....	46

3.3. Застосування карт WorldCover для дослідження	48
3.4. Встановлення залежності середнього значення температури відповідно до класу земельного покриття. На прикладі Луцької міської територіальної громади.....	49
3.5. Дослідження змін LST в часовому розрізі на прикладі міста Луцька.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....	56
ДОДАТКИ.....	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- LULC – Land Use and Land Cover, землекористування та ґрунтовий покрив;
- ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;
- LST – Land Surface Temperature, температура поверхні землі;
- ТГ – територіальна громада;
- SHI – Surface Heat Island, тепловий острів поверхні;
- IGBP – міжнародна програма з геосфери та біосфери;
- TIR – Thermal Infrared, дані дистанційного термального інфрачервоного зондування;
- MWA – Mono Window Algorithm, алгоритм одного вікна;
- LSE – Land Surface Emissivity, випромінювальна здатність земної поверхні;
- SWA – Split Window Algorithms, алгоритми розділеного вікна;
- NDVI – нормалізований диференційований індекс рослинності;
- NDBI – нормалізований диференційований індекс забудованих територій;
- MODIS – спектрорадіометр помірної роздільної здатності;
- VIRIS – інтелектуальний спектрометр видимого та інфрачервоного діапазону;
- GEE – Google Earth Engine, платформа хмарних обчислень;
- ISA – impervious surface area, площа непроникної поверхні;
- V_rNIR-BI – видимий червоний індекс забудови в ближньому інфрачервоному діапазоні;
- V_gNIR-BI – видимий зелений індекс забудови в ближньому інфрачервоному діапазоні;
- BBI – бінарний індекс забудови у видимому діапазоні;
- CBCI – комбінований індекс біофізичного складу;
- MBSI – модифікований індекс для відкритого ґрунту;
- OSAVI – оптимізований індекс рослинності з поправкою на ґрунт;
- PISI – перпендикулярний індекс непроникної поверхні;
- NIR – видимий, ближній інфрачервоний діапазон;
- SWIR – короткохвильовий інфрачервоний діапазон;

UI – міський спектральний індекс;
NDBI – найбільш поширений міський індекс;
BUI – індекс забудови;
UHI – феноменом теплових островів;
NDISI – нормалізована різниця індексу непроникної поверхні;
MNDISI_{Sun} – модифікований NDISI;
NTL – Nighttime Lights, датчик нічного освітлення;
DMPS-OLS – операційна система лінійного сканування;
HIS – індекс населених пунктів;
VANUI – урбаністичний індекс з поправкою на рослинність та для вирішення проблем насичення;
NDUI – нормалізований індекс різниці в містах;
OLS – оперативна система лінійного сканування;
DMSP – програма оборонних метеорологічних супутників;
МС – метеостанція;
ЕОЕР – Європейське космічне агентство зі спостереження Землі;
ЄКА – Європейське космічне агентство;
СДОР – сильнодіючі отруйні речовини.

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть у сфері дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для дослідження міських і забудованих територій спостерігається стрімке зростання кількості ефективних спектральних індексів, що застосовуються для аналізу землекористування та типів покриття (Land Use and Land Cover, LULC). Сьогодні ДЗЗ набуває все більшого значення у сфері міського планування та управління. Традиційні методи, зокрема картографування та польові обстеження, поступово втрачають свою актуальність, поступаючись новітнім зображенням із супутників, які широко використовуються в урбаністичних дослідженнях [1]. Завдяки сучасним ДЗЗ-даним можливо створювати карти як окремих міських територій, так і регіонального чи глобального масштабу, часто — у майже реальному часі [1–4].

У планетарному масштабі 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 приблизно 97 % антропогенних викидів CO₂ припадало десь біля 2 % всієї площі суші [2]. Прогнозується, що з глобальним потеплінням екстремальні теплові явища, такі як теплові хвилі, будуть виникати частіше та ставати більш інтенсивними, що становить серйозну загрозу для здоров'я людей через зростання рівня смертності та захворюваності. У містах з відносно помірними максимальними літніми температурами поріг смертності, пов'язаний із високими температурами, значно нижчий [4]. Це може стати причиною підвищеного енергоспоживання на потреби охолодження, що, своєю чергою, призведе до зростання викидів CO₂ та сприятиме подальшому загостренню проблеми глобального потепління. Озеленення міських територій здатне знижувати температуру повітря, що потенційно зменшить потребу в енергії для охолодження приміщень.[5].

Міські території характеризуються зменшенням рослинного покриття через збільшення кількості непроникних поверхонь, таких як тротуари, дороги, площі, двори та будівлі, у порівнянні з сільськими районами. Це призводить до

підвищення температури в містах, явища, відомого як міський тепловий острів (Urban Heat Island, UHI), яке спостерігається в урбанізованих зонах у всьому світі з початку XIX століття. Попри те, що метеорологічні служби в багатьох країнах регулярно фіксують температуру повітря в певних точках, складна структура міського середовища часто перешкоджає точній оцінці локальних температурних змін лише на основі таких спостережень. Для вирішення цього завдання застосовуються супутникові знімки, які дають змогу вимірювати температуру земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) — ключовий чинник, що впливає на температуру повітря, а також здійснювати просторове картографування температурного розподілу підстилаючої поверхні [6]. Температура повітря може стрімко змінюватись 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.

Метою даної роботи є дослідження методів і алгоритмів розрахунку температури поверхні в межах міських територій, а також формулювання власних пропозицій на прикладі Луцької територіальної громади.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- здійснити огляд наукової літератури, присвяченої тематиці дослідження;
- проаналізувати теоретичні засади дистанційного зондування у контексті моніторингу теплового режиму міських територій;
- дослідити спектральні індекси, які застосовуються для оцінки температурних характеристик поверхні;
- використати оброблені дані для проведення аналізу теплових характеристик на території Луцької ТГ.

Об'єктом дослідження в даній роботі є міські території.

Предмет дослідження даної роботи є температура поверхонь міських територій.

Методи дослідження: математичний, картографічний, системний підхід, геопросторовий аналіз, аналогій та порівнянь, геоінформаційний,

картографічний, метод аналізу та синтезу, метод обробки супутникових даних, аналіз літературних джерел.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у теоретичному узагальненні підходів до дистанційного моніторингу теплового режиму міських територій. У роботі розроблено картографічні та графічні моделі, адаптовані до умов Луцької територіальної громади, що дозволяють візуалізувати та аналізувати просторовий розподіл температур поверхні.

Практичне значення результатів дослідження полягає в тому, що висновки, отримані у процесі роботи, а також запропоновані підходи та рекомендації, можуть бути використані для вдосконалення методів дослідження теплового режиму міст із застосуванням технологій дистанційного зондування Землі. Отримані результати мають прикладне значення для міського планування, екологічного моніторингу та розробки заходів щодо адаптації до змін клімату.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В МІСТАХ

1.1. Методи визначення LST з даних TIR

Міський тепловий острів – це явище спостерігається у населених пунктах по всьому світу з початку XIX ст. Метеорологічні служби різних країн регулярно реєструють температуру повітря в різних місцях. Однак складна структура забудованих районів часто перешкоджає точній оцінці локальних змін температури поверхні лише на основі цих даних. Для цього використовуються супутникові знімки, які дозволяють визначати температуру поверхні землі. Дані, отримані з термального інфрачервоного сенсора, забезпечують можливість аналізу температури поверхні як у просторовому, так і в часовому аспектах, навіть на глобальному рівні. Випромінювальні характеристики та атмосферні ефекти є ключовими чинниками, які враховуються в різноманітних методах, розроблених багатьма дослідниками. В цьому розділі роботи розглянуто три алгоритми визначення температури земної поверхні (LST) - алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм й 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.

Температура земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) є одним із ключових параметрів, що впливають на енергетичний баланс територій, регіональні кліматичні умови, теплові потоки та процеси енергообміну [7–9]. Результати численних досліджень підтверджують важливу роль довготривалого сонячного випромінювання у формуванні міського клімату, зокрема при вивченні феномену теплового острова поверхні (Surface Heat Island, SHI) [10, 11], процесів евапотранспірації [12], моніторингу лісових пожеж [13], а також у геологічних і геотермальних дослідженнях [12, 13].

Крім того, LST визнано одним із пріоритетних параметрів у рамках Міжнародної програми з вивчення геосфери та біосфери (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP) [14, 15]. Завдяки даним термального

інфрачервоного дистанційного зондування (Thermal Infrared, TIR) можливе проведення як часових, так і просторових досліджень LST у широкому масштабі — від локального до глобального рівня.

Точність розрахунку LST на основі TIR-даних значною мірою залежить від низки чинників: атмосферних умов, характеристик сенсора (зокрема спектрального діапазону та кута огляду), а також фізичних властивостей поверхні, таких як випромінювальна здатність та її геометрія [8]. Оскільки вплив атмосферних явищ і значення випромінювальної здатності є критичними для точного визначення LST, у науковій практиці було запропоновано низку методів, які враховують ці аспекти [16, 17].

Алгоритми для визначення LST зазвичай класифікують залежно від кількості залучених термальних каналів супутника. Так, одноканальні алгоритми базуються на використанні лише однієї TIR-смуги, тоді як методи "розділеного вікна" (split-window) або багатоканальні підходи використовують кілька спектральних смуг для підвищення точності розрахунків.

У цьому розділі буде проведено аналіз найпоширеніших алгоритмів визначення LST, які застосовуються до супутникових знімків, отриманих із космічних апаратів серії **Landsat**.

1.2. Особливості застосування даних з супутників серії Landsat.

Супутники серії **Landsat** забезпечують безперервне дистанційне зондування Землі із середньою просторовою роздільною здатністю вже понад 40 років — з моменту запуску першого апарата 23 липня 1972 року. Упродовж цього періоду було здійснено запуск восьми супутників Landsat, з яких лише **Landsat 6** не досяг орбіти. Інші апарати успішно функціонували (або функціонують досі), ставши ключовим джерелом інформації для дослідження глобальних змін і застосування в різних галузях: сільському господарстві, геології, екології, картографії, управлінні земельними ресурсами, лісовому господарстві, регіональному плануванні та екологічному моніторингу.

Супутники **Landsat 5** (з сенсором **TM**) та **Landsat 7** (з сенсором **ETM+**) забезпечують багатоспектральні знімки в шести оптичних діапазонах: від

видимого світла до ближнього й короткохвильового інфрачервоного (SWIR), із просторовою роздільною здатністю 30 метрів. Крім того, обидва апарати мають окрему термальну інфрачервону смугу (**смуга 6**), що використовується для вимірювання температури поверхні.

Просторова роздільна здатність термального каналу становить:

- **120 м** для сенсора **TM** (Landsat 5),
- **60 м** для сенсора **ETM+** (Landsat 7).

Однак для зручності кінцевих користувачів термальні зображення проходять попередню обробку — **дискретизацію за допомогою кубічної згортки** (cubic convolution resampling), після чого надаються з просторовою роздільною здатністю **30 м**.

Сенсор OLI на супутнику Landsat 8 має 9 спектральних смуг для відображення з просторовою роздільною здатністю 30 м, а сенсор TIRS на цьому ж супутнику забезпечує 2 смуги в тепловій інфрачервоній області (смуги 10 і 11). Теплові смуги TIRS мають початкову просторову роздільну здатність 100 м, але Геологічна служба США дискретизує їх і надає з роздільною здатністю 30 м.

Алгоритм одного вікна [18], одноканальний алгоритм [19], метод рівняння переносу випромінювання та алгоритм розділеного вікна [17, 18] є одними з найпоширеніших підходів для визначення коливань температури поверхні землі (LST) за даними дистанційного зондування. Перші три методи можуть застосовуватися до даних супутників Landsat 5 TM, 7 ETM+ та 8 OLI/TIRS, тоді як алгоритм розділеного вікна підходить лише для даних Landsat 8 OLI/TIRS, оскільки він вимагає наявності щонайменше двох теплових діапазонів. Основні відмінності між цими методами полягають у математичних формулах і використовуваних вхідних параметрах. [20]. На додаток до випромінювальної здатності та пропускання атмосфери, які є спільними для всіх методів, алгоритм одного вікна вимагає знання температури повітря підстилаючої поверхні для розрахунку ефективної середньої температури атмосфери, на відміну від інших методів. У свою чергу, метод рівняння переносу випромінювання та

одноканальний алгоритм потребують даних про висхідне та низхідне атмосферне випромінювання для визначення температури поверхні землі (LST).

1.3. Алгоритм одного вікна

Алгоритм одного вікна (*Mono Window Algorithm, MWA*) був розроблений під керівництвом професора Циня [43] спеціально для обробки даних, отриманих із сенсора **Landsat TM**. Метод ґрунтується на використанні трьох ключових параметрів: **випромінювальної здатності поверхні, атмосферної прозорості (коефіцієнта пропускання атмосфери) та середньої температури атмосфери**. Завдяки урахуванню цих змінних, алгоритм дозволяє з достатньою точністю обчислювати температуру земної поверхні на основі термальних даних лише однієї спектральної смуги. Значення температури поверхні землі (LST) за алгоритмом одного вікна можна визначити за формулою:

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

$$a = -67.355351,$$

$$b = 0.458606$$

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

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

де T_s - температура земної поверхні в Кельвінах, T - температура яскравості на датчику в Кельвінах, T_a - ефективна середня температура атмосфери в Кельвінах, τ - коефіцієнт пропускання атмосфери, ε - 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.

1.4. Одноканальний алгоритм

У праці [19] було проаналізовано алгоритм одного вікна для отримання температури поверхні землі (LST) з даних Landsat TIR. В рамках цього алгоритму LST (T_s) можна обчислити за допомогою наступного загального рівняння:

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

де ε - випромінювальна здатність земної поверхні (LSE), L_{sen} - випромінювання на сенсорі в тепловому діапазоні, ψ_1, ψ_2, ψ_3 - атмосферні функції, а γ, δ - два параметри, що задаються:

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

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

де $b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda}$, $c_2 = 14387,7 \text{ мкм} \cdot \text{К}$, а λ_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 межа $f_i(\lambda)$, відповідно. Значення b_γ 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 ψ_1, ψ_2 та ψ_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.

1.5. Метод рівняння переносу випромінювання

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

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

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_λ) 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.

1.6. Алгоритм розділеного вікна

У попередніх дослідженнях розглядалися різні **алгоритми розділеного вікна** (*Split Window Algorithms, SWA*) для обробки даних з різноманітних супутникових сенсорів [21–23]. Детальний огляд цих методів наведено у джерелі [24]. У межах цієї роботи ми зосередимось на SWA-алгоритмах, представлених у дослідженні [25], з параметризованими коефіцієнтами, адаптованими до характеристик сенсора **Landsat 8 TIRS**, які наведено в [17]. Застосування цих алгоритмів дозволяє точно враховувати спектральні особливості Landsat 8 при розрахунку температури земної поверхні, що підвищує точність оцінювання **LST**.

Варто зазначити, що **Геологічна служба США (USGS)** рекомендує утриматися від використання **смуги 11** Landsat 8 для обчислення LST через значну калібрувальну невизначеність цього каналу [26]. Однак, згідно з окремими науковими роботами [17, 27], результати, отримані за допомогою алгоритмів розділеного вікна із використанням цієї смуги, можуть вважатися прийнятними.

З огляду на вищезазначене, у цьому розділі також буде представлено приклад алгоритму розділеного вікна для Landsat 8, адаптований з урахуванням його спектральних характеристик.

Згідно з алгоритмом розділеного вікна, LST (T_s) можна обчислити за допомогою наступного рівняння:

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

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

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

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

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

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

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

де ε_{10} та ε_{11} - LSE для смуг 10 і 11 відповідно, τ_{10} і τ_{11} - атмосферне пропускання атмосфери для смуг 10 і 11, відповідно.

1.7. Моделі випромінювальної здатності земної поверхні (LSE)

Випромінювальна здатність земної поверхні (LSE, ε) визначає здатність поверхні перетворювати теплову енергію в енергію випромінювання [28]. Вона є одним із ключових параметрів для отримання точних даних про температуру земної поверхні за допомогою дистанційного зондування.

Для визначення випромінювальної здатності земної поверхні (Land Surface Emissivity, LSE) із космічних даних існують три основні категорії методів: напівемпіричні, фізично обґрунтовані та багатоканальні методи розділення температури або випромінювальної здатності.

Однак фізично обґрунтовані та багатоканальні підходи не завжди застосовні до даних супутників серії Landsat через певні обмеження, описані в численних дослідженнях. Зокрема, ці методи вимагають наявності більш ніж двох теплових інфрачервоних (TIR) смуг або використання нічних знімків, що ускладнює їхнє впровадження для Landsat.

Напівемпіричні методи, навпаки, є найбільш придатними для оцінки LSE за супутниковими даними Landsat. До них належать метод класифікації випромінювальної здатності [21] та метод оцінки LSE на основі нормалізованого диференційного індексу рослинності (NDVI) [29]. Ці підходи забезпечують

достатню точність визначення випромінювальної здатності, враховуючи специфіку та обмеження дистанційних даних Landsat.

Метод випромінювальної здатності на основі класифікації генерує зображення LSE, використовуючи класифіковане зображення та призначаючи значення випромінювальної здатності для кожного класу. Однак цей метод має свої недоліки, оскільки вимагає детального знання досліджуваної території та вимірювань випромінювальної здатності на поверхнях, які репрезентують різні класи.

Натомість методи, що базуються на нормалізованому диференційному індексі рослинності (NDVI), є більш практичними та широко розповсюдженими для оцінки випромінювальної здатності земної поверхні (LSE). Вони характеризуються оперативністю та простотою застосування, при цьому забезпечуючи задовільну точність результатів. Завдяки цим перевагам такі методи є привабливими для досліджень, які потребують швидкої і надійної оцінки LSE [28].

1.8. Модель Ван де Грінд та Ове

Дана модель заслуговує на увагу, оскільки її застосовували для визначення температури поверхні (LST) у всіх основних серіях супутників Landsat — **Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+** та **Landsat 8 OLI/TIRS**. У дослідженні [30] було запропоновано логарифмічний підхід для оцінки випромінювальної здатності земної поверхні (LSE), що базується на нормалізованому диференційному індексі рослинності (NDVI) у діапазоні значень від 0,157 до 0,727. При цьому NDVI розраховується на основі даних ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного (R) спектральних каналів. Запропонована модель має такий математичний вигляд:

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

1.9. Модель Валор та Каселлес

Валор і Каселлес у своїй роботі [29] розробили теоретичну модель, яка може бути застосована до всіх серій Landsat. Ця модель дозволяє досліджувати випромінювальну здатність конкретної поверхні на основі нормалізованого

диференційного індексу рослинності (NDVI) за допомогою відповідного коефіцієнта. Таким чином, вона забезпечує можливість ефективної оцінки LSE, використовуючи дані, отримані з ДЗЗ:

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

ε_s і ε_v - випромінювальна 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), який представляє собою частку рослинності, яку можна розрахувати 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 планетарній ситуації [70]. Як запропонували Валор та Каселлес [82], ε_v та ε_s приймаються за 0,985 і 0,960, відповідно. Крім того, було розраховано середнє значення для члена $\langle d\varepsilon \rangle$ як 0,015.

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

У роботах [31, 32] пропонується оцінювати випромінювальну здатність поверхні (LSE) на основі порогових значень індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI), які позначаються як $NDVI^{THM}$. Визначають три основні

випадки, описані в рівнянні (11):

1. **Перший випадок ($NDVI < 0.2$):** піксель вважається непокритим рослинністю ґрунтом, а LSE оцінюється за значеннями відбиття у червоній частині спектру.
2. **Другий випадок ($0.2 \leq NDVI \leq 0.5$):** піксель відображає змішане покриття, що складається з відкритого ґрунту та рослинності.
3. **Третій випадок ($NDVI > 0.5$):** пікселі з таким значенням NDVI вважаються повністю вкритими рослинністю.

Такий підхід дозволяє врахувати різні типи поверхневого покриття й отримати більш точні оцінки випромінювальної здатності земної поверхні.

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

У рівнянні (11) ρ_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. ε_v та ε_s - випромінювальна здатність ґрунту і рослинності, відповідно. d'' - ефект порожнини ефект порожнин, зумовлений неоднорідністю поверхні, як і в попередній моделі ($d\varepsilon = 0$ для плоских поверхонь). F - геометричний коефіцієнт форми, прийнятий за середнє значення 0,55 [20].

РОЗДІЛ 2

СПЕКТРАЛЬНІ ІНДЕКСИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ

2.1. Основні аспекти дослідження

Світова тенденція урбанізації підкреслює необхідність регулярного оновлення карт для ефективного моніторингу змін у навколишньому середовищі. Аналіз взаємозв'язку між процесами урбанізації та їхнім впливом на довкілля можна здійснити шляхом картографування масштабу та інтенсивності змін, пов'язаних із розширенням забудованих територій.

Супутникове дистанційне зондування виступає потужним інструментом для створення таких карт у великих масштабах. Воно забезпечує безперервний і детальний моніторинг територій, що дає змогу дослідникам і планувальникам краще розуміти динаміку урбанізації та її наслідки для навколишнього середовища.

Цей підхід відкриває можливості для:

Відстеження змін: Регулярні супутникові знімки дозволяють фіксувати трансформації у землекористуванні, зокрема розширення міських територій, зменшення зелених зон та інші екологічні зміни.

Оцінки впливу: Аналіз даних дистанційного зондування допомагає визначати вплив урбанізації на локальний клімат, якість повітря і водних ресурсів, а також стан біорізноманіття.

Планувати розвиток: Отримані дані можуть бути використані для розробки стратегії сталого розвитку міст, щоб зменшити негативні наслідки урбанізації.

Так, супутникове дистанційне зондування дійсно є важливим інструментом для розуміння та управління урбанізацією в контексті екологічної стійкості. Супутникові датчики, що використовуються для дистанційного зондування, насправді мають декілька спектральних діапазонів, що дозволяє проводити детальний аналіз матеріалів і об'єктів на поверхні Землі. Кожен спектральний діапазон має свої особливості та переваги, що дозволяє виявляти

різні характеристики матеріалів. Дослідження, розглянуті в цьому розділі, проведені в основному на супутниках з помірною роздільною здатністю. Дані з середньою роздільною здатністю, такі як ті, що надаються супутниками Landsat, є надзвичайно корисними для картографування міського середовища. Ось деякі ключові аспекти використання таких даних:

Доступність і обсяги даних

- **Безкоштовність:** Багато супутникових даних, таких як ті, що отримані в рамках програм Landsat та Sentinel, є безкоштовно доступними для науковців і широкої громадськості. Це робить їх особливо привабливими для використання у різноманітних наукових дослідженнях та практичних проектах.
- **Великі обсяги:** Завдяки безперервному моніторингу, супутникові місії забезпечують значний обсяг історичних і актуальних даних. Це дає змогу проводити довгострокове спостереження за змінами, зокрема в міських територіях.

Переваги середньої роздільної здатності

- **Картографування територій:** Дані з роздільною здатністю близько 30 метрів (наприклад, Landsat) дозволяють створювати детальні карти міських районів, включаючи інформацію про забудовані ділянки, рослинність та водні об'єкти.
- **Моніторинг змін:** Регулярні супутникові знімки дозволяють відстежувати динаміку урбанізації, змін у землекористуванні, а також стан навколишнього середовища.
- **Аналіз великих територій:** Середня роздільна здатність оптимальна для вивчення масштабних міських просторів, де важливіше охоплення великих площ, ніж деталізація окремих об'єктів.

Використання спектральних індексів

Дані з середньою роздільною здатністю дозволяють застосовувати різні спектральні індекси для аналізу стану міського середовища:

- **NDVI** для оцінки рослинності.
- **NDBI** для виявлення забудованих територій.
- **LST** для аналізу температури поверхні.

Таким чином, дані з середньою роздільною здатністю є надзвичайно важливими для картографування та аналізу міських територій. Їх доступність і велика кількість дозволяють проводити різноманітні дослідження, що стосуються урбанізації, екології та управління природними ресурсами.

Тут ми розглянемо систематизацію найбільш актуальних для міського середовища спектральних індексів, зокрема: мультиспектрального, теплового та нічної освітленості. Це допоможе краще зрозуміти можливості використання спектральних індексів в міських дослідженнях та зробити правильний вибір найбільш відповідних індексів для конкретних задач з урахуванням доступних спектральних діапазонів, а також розглянути їхні переваги, обмеження та недоліки.

Мультиспектральні дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) користуються великою популярністю серед урбаністів завдяки поєднанню середньої просторової роздільної здатності, коротшого інтервалу між зйомками, широкому спектральному покриттю (видимий світ, ближній інфрачервоний — NIR, короткохвильовий інфрачервоний — SWIR, тепловий діапазон), а також простоті доступу та достатньому охопленню територій.

Серед основних джерел таких даних найвизначнішим є Landsat, який має найдовший та найстабільніший історичний архів вільно доступних супутникових знімків з глобальним покриттям. Це робить його особливо привабливим для науковців, що працюють із часовими рядами даних.

Супутники Sentinel-2A і 2B забезпечують більш високу просторову роздільну здатність до 10 метрів у деяких видимих діапазонах, що також є важливим для детального аналізу міських територій.

Натомість спектро радіометр помірної роздільної здатності (MODIS) має дуже широке покриття та короткий час між знімками, що робить його придатним для регіональних досліджень, де не потрібна висока просторова роздільна здатність.

Інший спектрометр видимого та інфрачервоного діапазону (VIRIS) пропонує високу спектральну роздільну здатність, але його застосування обмежене через меншу частоту знімання.

Таким чином, кожен із розглянутих датчиків має свої переваги і недоліки, що слід враховувати при виборі джерела даних для конкретного завдання.

Крім того, сучасні обчислювальні платформи значно розширюють можливості дослідників, зокрема в урбаністичних проектах. Платформа Google Earth Engine (GEE) дозволяє швидко обробляти великі обсяги супутникових даних, збільшуючи обчислювальні ресурси та сприяючи ефективному обміну інформацією між користувачами.

Ми проаналізуємо найпоширеніші спектральні індекси даних дистанційного зондування, що застосовуються в урбаністичних дослідженнях.

2.2. Мультиспектральні дані ДЗЗ

Спектральні індекси дистанційного зондування Землі значно спрощують дослідження міських систем, оскільки дозволяють інтегрувати різні набори даних, виділяти об'єктивну інформацію, автоматизувати обробку зображень, мінімізувати вплив людського фактора, полегшувати масштабування досліджень, підвищувати надійність аналізу та прискорювати сам процес дослідження.

До недавнього часу спектральні індекси для вивчення міст були доволі рідкісними. Більшість з них були розроблені лише після 2000-х років. На початковому етапі урбаністичне індексування зосереджувалося на загальних характеристиках міста як густонаселеного простору. Згодом увага була зосереджена переважно на інфраструктурних особливостях міських територій. Внаслідок цього, в індексуванні було зроблено акцент на непроникних

характеристиках забудованої території як індикатора міста. Площа забудови і площа непроникної поверхні (impervious surface area (ISA)) мають спектральну схожість з відкритим ґрунтом. Тому більшість індексів із забудованими територіями розглядають як поверхню з обмеженнями. Також приділили увагу вирішенню проблеми класифікації між площею відкритого ґрунту та площею непроникної поверхні.

Є багато методів виділення міських територій в області ДЗЗ. Спектральні індекси - один з них у класифікації на рівні пікселів. Його потрібно застосовувати на широких масивах даних ДЗЗ [7].

Спектральні індекси надають ймовірнісний вихід з безперервним значенням, тоді як класифікатори надають дискретні значення [8] при класифікації зображень. Саме тому в кількісних маніпуляціях індекси є найбільш застосовуваними серед користувачів. У класифікаціях на рівні субпікселів індекси популярні при аналізі спектрального змішування для отримання остаточних даних [9].

Контрольована класифікація зображень потребує наявності навчальних даних і не завжди може точно відобразити географічні варіації. Натомість, класифікація на основі спектральної індексації є неконтрольованим методом, що легко застосовується у глобальних масштабах, здатен працювати з великими обсягами даних і демонструє високу надійність [10]. Саме тому використання спектральних індексів для класифікації зображень набуває популярності в численних просторово-часових дослідженнях [6, 11].

Спектральні індекси широко застосовують для аналізу даних дистанційного зондування, виявлення та моніторингу змін у землекористуванні та покритті поверхні в динаміці. По-перше, міські землекористувальні класи відрізняються від інших типів покриття тим, що є антропогенними, на відміну від природних покриттів. По-друге, міські території характеризуються високою гетерогенністю, сегментованістю та змішаністю з іншими класами землекористування й покриття. По-третє, їх спектральні сигнатури складні для інтерпретації: світлі пікселі

можуть нагадувати сухий ґрунт, а темні — тінь, вологий ґрунт або мілководні водойми.

2.3. Просторова роздільна здатність в урбаністиці

Міське землекористування характеризується як змішана територія, що включає непроникні поверхні, рослинність, водні об'єкти та відкритий ґрунт. Дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) зі середньою просторовою роздільною здатністю ефективно класифікуються на обмежену кількість класів [12]. Знімки з роздільною здатністю 10–30 метрів, такі як дані Landsat або Sentinel-2A/B, достатні для загального картографування міських об'єктів, проте вони не забезпечують детальної інформації про міські неоднорідності, що обмежує точність досліджень.

Поряд із загальним картографуванням ґрунтового покриття [13], дані з високою роздільною здатністю використовуються для вивчення специфічних міських особливостей, наприклад, міської рослинності [14], виявлення будівель [17], а також моніторингу руйнувань будівель після землетрусів [18].

Зазвичай, складність спектральних індексів прямо пов'язана з їх точністю і обернено — з надійністю. Прості індекси є більш надійними, але менш точними, тоді як складні індекси дають більш точні результати, але вимагають додаткової інформації. Через обмеженість доступних даних дистанційного зондування складні індекси часто не можуть бути застосовані на практиці.

Спектральні індекси для міст почали розроблятися з інфрачервоних спектральних діапазонів. Вони були неефективними, бо забудовані території змішувалися з ґрунтом. Тому були розроблені нові індекси з використанням різних діапазонів (панхроматичного, прибережного, теплового...). Та акцент змістився з забудованих територій на площу чистої поверхні. Внаслідок цього для підвищення точності були розроблені комплексні та багатоджерельні індекси.

На даний час існує багато активних датчиків ДЗЗ, а ще більше перебуває в стадії розробки. Для спрощення аналізу - замість значень довжин хвилі сенсорів ДЗЗ використали позначення, що відповідають назвам каналів з місії Landsat.

2.4. Спектральні індекси у різних діапазонах

Датчики з довжиною хвилі від 400 до 900 нанометрів (нм) є найпоширенішими серед датчиків ДЗЗ для зйомки землі. (Табл. 1). Супутникові, повітряні і навіть безпілотні літальні апарати - майже всі датчики ДЗЗ мають цей діапазон довжин хвиль.

Таблиця 1.

Спектральні індекси із довжиною хвиль 400-800 нм.

№ п/п	Формула	Джерело
1	$VrNIR - BI = (Red - NIR) / (Red + NIR)$	[23]
2	$VgNIR - BI = (Red - NIR) / (Red + NIR)$	
3	$BBI = NDBI_{Blue-Green,b} + NDBI_{Red-Green,b}$ $де, NDBI_{Blue-Green} = (Blue - Green) / (Blue + Green),$ $NDBI_{Red-Green} = (Red - Green) / (Red + Green)$	[24]
4	$CBCI = (A + 1) \times MBSI - OSAVI + A,$ $де, MBSI = ((Red + Green) \times 2) / ((Red + Green) - 2),$ $OSAVI = (NIR - Red) / (NIR + Red + 0.16)$ при $A = 0,51$	[25]
5	$PISI = 0.8129 \times Blue - 0.5735 \times NIR + 0.0750$	[26]

У науковому дослідженні [22] зазначено, що окрім забудованих територій, суха рослинність також проявляє високий коефіцієнт відбиття у діапазоні SWIR1. Через це було запропоновано два індекси забудови, які базуються лише на видимих спектральних діапазонах:

- **VrNIR-BI** (видимий червоний індекс забудови в ближньому інфрачервоному діапазоні),
- **VgNIR-BI** (видимий зелений індекс забудови в ближньому інфрачервоному діапазоні).

З цих двох індексів кращі результати показує VrNIR-BI, який ефективно класифікує непроникні поверхні та сухі рослинні ділянки. Проте він менш придатний для розрізнення непроникних поверхонь і відкритого ґрунту.

Для подолання цих обмежень було розроблено новий бінарний індекс забудови (BBI) у видимому спектрі, що базується на різних варіантах Normalized Difference Built-up Index (NDBI) [23].

Іншим підходом є комбінований індекс біофізичного складу (CBCI) [24], який поєднує два індекси:

- **MBSI** (модифікований індекс відкритого ґрунту),
- **OSAVI** (оптимізований вегетаційний індекс з поправкою на ґрунт) [26].

Індекс MBSI призначений для виявлення ґрунтових ділянок, тоді як OSAVI є вегетаційним індексом, у формулі якого присутній кореляційний фактор A (0,51), що залежить від характеристик ґрунту. Цей кореляційний фактор введено для покращення співвідношення між MBSI та OSAVI.

Перевагою CBCI є здатність розрізняти непроникні ділянки в поєднанні з рослинністю, хоча він менш ефективний у розмежуванні непроникних ділянок і відкритого ґрунту.

В дослідженні [25] застосовували простори ознак синього та інфрачервоного діапазонів, щоб запропонувати рівняння опорної лінії, назване перпендикулярним індексом непроникної поверхні PISI, яке розділяє непроникні ділянки від відкритого ґрунту. Використавши лише два діапазони, він має вищу точність у відокремленні непроникної площі від площі голого ґрунту в режимі реального часу. PISI показав кращі результати, ніж індекси BCI та NDBI. Це стосується більшості оптичних датчиків, тому що вони використовували діапазони в синій та інфрачервоній зоні. Також PISI може бути запропонований у багатьох інших застосуваннях ДЗЗ. Схоже до BBI, PISI дає кращу роздільну здатність між непроникними ділянками і відкритим ґрунтом, а також між непроникними ділянками і ділянками рослинності.

2.5. Індекси з видимим, ближнім інфрачервоним та короткохвильовим інфрачервоним діапазонами

Цей підрозділ розглядає міські спектральні індекси, що використовують видимий, ближній інфрачервоний (NIR) та короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) діапазони (Табл. 2).

Перший міський спектральний індекс (Urban Index, UI) був запропонований у дослідженні [27]. Найбільш поширеним індексом для визначення міських територій є Normalized Difference Built-up Index (NDBI), розроблений у роботі [28]. Автори спробували створити бінарний індекс на основі NDBI, де всі позитивні значення вважалися міськими територіями, а від'ємні — неміськими.

У дослідженні [29] було запропоновано новий індекс забудови (NBI), який дозволяє чіткіше розрізняти забудовані та незабудовані землі порівняно з NDBI. NBI має повністю додатній діапазон значень для міських територій, проте виникли складнощі з його нормалізованою формою. Порядок значень за індексом такий: незабудовані території > забудовані > інші класи земного покриву, від вищих до нижчих значень. Точність класифікації забудованих ділянок становила близько 90%.

У роботі [30] запропоновано два нові міські індекси: Normalized Building Area Index (NBAI) та Built-up Ratio Band Approach (BRBA). NBAI використовує обидва SWIR-діапазони, тоді як BRBA — лише один з них. Автори довели, що застосування цих індексів підвищує точність виділення забудови на 10–13 % порівняно з NDBI та NBI.

У джерелі [31] запропоновано новий індекс виділення забудованих територій на основі даних Landsat 8 із додаванням константи $L = 0,3$ для підвищення стабільності. Для подальшого покращення точності класифікації міського землекористування було розроблено індекс Built-up Index (BUI) [32]. Проте BUI демонстрував певні помилки, зокрема схильність до пропуску деяких забудованих ділянок, а також плутанину між забудованими та незабудованими територіями, що впливало на точність його застосування.

А. Каполупо та ін. [21] використовували SWIR1 та червоні смуги для введення індексу SwiRed. Для класифікації забудованих територій

використовується поріг $0 < \text{значення} < 0,22$. SwiRed застосовується для тимчасового застосування з усіма місіями Landsat з діапазонами SWIR.

Таблиця 2

Спектральні індекси з видимим, ближнім інфрачервоним та короткохвильовим інфрачервоним діапазонами

№ п/п	Формула	Джерело
1	$UI = ((SWIR2 - NIR) / (SWIR2 + NIR) + 1) \times 100$	[28]
2	$NDBI = (SWIR1 - NIR) / (SWIR1 + NIR)$	[29]
3	$NBI = (Red \times SWIR1) / NIR$	[30]
4	$NBAI = (SWIR2 - SWIR1 / Green) / (SWIR2 + SWIR1 / Green)$	[31]
5	$BRBA = Red / SWIR1$	
6	$BAEI = (Red + L) / (Green + SWIR1)$	[32]
7	$BUI = 2 \times \frac{(Red \times SWIR2) - (SWIR1 \times SWIR2)}{(Red + SWIR1) \times (SWIR1 + SWIR2)}$	[33]
8	$SwiRed = (SWIR1 - Red) / (SWIR1 + Red)$	[22]

2.6. Спектральні індекси з термальними діапазонами

Міський штучний ландшафт часто акумулює та випромінює більше тепла порівняно з навколишніми природними територіями, що зумовлює феномен теплових міських островів (Urban Heat Island, UHI). Через це існує просторово-часова різниця температур між міськими та позаміськими зонами. Для покращення точності класифікації міських територій теплові дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) активно використовуються при розробці нових спектральних індексів.

Одним із перших автоматизованих індексів для аналізу непроникних штучних поверхонь (Impervious Surface Area, ISA) став Нормалізований індекс різниці непроникної поверхні (Normalized Difference Impervious Surface Index, NDISI) [33]. Він не вимагає попереднього виділення водних об'єктів і ділянок ґрунту, що спрощує його застосування для супутникових даних середньої просторової роздільної здатності.

Однак NDISI має певні обмеження, зокрема проблеми, пов'язані з «водним шумом», коли водні поверхні можуть помилково ідентифікуватися як непроникні ділянки. Для усунення цієї проблеми автори запропонували замінити видимі спектральні смуги на спеціальні водні індекси, що допомагають точніше розділяти водні й непроникні площі.

У результаті було розроблено покращені індекси забудованості та незабудованості, які дозволяють краще розрізняти ці два типи територій, що значно підвищує точність класифікації міських ландшафтів, як було продемонстровано у відповідних дослідженнях.

Площі незабудованих земель також змінюються, і не всі з них можна дослідити за допомогою індексу, індукованого тепловим діапазоном, тому що в міських районах невеликі за розміром незабудовані землі не виділяють значного тепла (Табл. 3).

Таблиця 3

Спектральні індекси із термальними діапазонами

№ п/п	Формула	Джерело
1	$NDISI = \frac{TIR - (VIS_1 + NIR + SWIR1) / 3}{TIR + (VIS_1 + NIR + SWIR1) / 3}$	[34]
2	$NDISI = \frac{TIR - (WI + NIR + SWIR1) / 3}{TIR + (WI + NIR + SWIR1) / 3}$	
3	$EBBI = \frac{SWIR1 + NIR}{10\sqrt{SWIR1 + TIR}}$	[35]
4	$MNDISI_{Sun} = \frac{T_s - (MNDWI + NIR + SWIR1) / 3}{T_s + (MNDWI + NIR + SWIR1) / 3},$ $\text{де } T_s = \frac{TIR}{1 + \left(\frac{\lambda \times TIR}{\rho} \right) \ln \varepsilon}, \quad \rho = 1.438 \times 10^{-2}$ $\varepsilon = \begin{cases} 0.979 - 0.035Red & NDVI < NDVI_{min} \\ 0.986 + 0.004P_V & NDVI_{min} < NDVI < NDVI_{max} \\ 0.99 & NDVI > NDVI_{max} \end{cases}$ $P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$	[36]
5	$NDBI_{OLI} = \frac{(PCA \text{ із } SWIR1, SWIR2 + PCA \text{ із } TIR1, TIR2) - NIR}{(PCA \text{ із } SWIR1, SWIR2 + PCA \text{ із } TIR1, TIR2) + NIR}$	[37]

6	$BAEM = NDBI_{OLI} - NDVI - MNDWI$	
7	$NDII = (Vis - TIR) / (Vis + TIR)$	[38]
8	$DBI = \frac{Blue - TIR1}{Blue + TIR1} - NDVI$	[39]

Ч. Сун та ін. [35] розробили модифікований NDISI ($MNDISI_{Sun}$). Замість теплового інфрачервоного (TIR) діапазону було використано значення температури поверхні землі (LST). $MNDISI_{Sun}$ може використовуватися для місії Landsat TM, ETM+ і теплових інфрачервоних датчиків OLI (TIRS). Особливістю є те, що зображення, отримані влітку, краще ідентифікуються. Завдяки загальній точності 87% і загальному коефіцієнту $\kappa = 74\%$, $MNDISI_{Sun}$ придатний також для аналізу часових даних.

Іншим міським індексом, що базується на теплових даних, є модифікація індексу нормалізованої різниці забудови (NDBI), розроблена для даних Landsat OLI і названа NDBIOLI [36]. Цей індекс формулюється з використанням методу головних компонент (PCA), а порогове значення визначається за допомогою пошуку в двовіконному режимі з гнучкою швидкістю, що дозволяє підвищити точність класифікації порівняно з традиційними індексами.

На основі NDBIOLI було розроблено ще один міський індекс — метод вилучення забудованої площі (Built-up Area Extraction Method, BAEM), який покращує якість картографування міських територій за рахунок зменшення пропусків і помилок. Варто зазначити, що NDBIOLI має модифіковану формулу розрахунку порівняно з класичним NDBI [28].

Першим індексом, схожим на NDBI, що призначений для визначення непроникної поверхні, став нормалізований різницевий індекс непроникності (Normalized Difference Imperviousness Index, NDII), який використовує видимий (VIS) та тепловий (TIR) діапазони супутника Landsat TM [37]. Комбінування цих спектральних діапазонів продемонструвало високу точність при тестуванні на об'єктах з високою роздільною здатністю. NDII є простим у використанні індексом, що дозволяє швидко визначати непроникні поверхні в міських

районах, застосовуючи будь-які мультиспектральні набори даних із теплового та видимого діапазонів.

Міські непроникні поверхні зазвичай мають високу позитивну кореляцію з тепловими даними, тоді як рослинність демонструє зворотню кореляцію, що полегшує їх розмежування за допомогою теплових індексів.

Для підвищення точності класифікації використовують набір теплових даних. Наприклад, Б. Адаму та А. Расул [38] розробили та застосували індекс сухої забудови (DBI), використовуючи синій та тепловий діапазони з Landsat OLI. DBI припускає, що забудовані території мають менше рослинності і, відповідно, низькі значення NDVI. Тому, застосування NDVI може ще більше покращити характеристики забудови. Застосовуваний у сухому кліматі, DBI має хорошу загальну точність класифікації 93%. Але міська територія з високою рослинністю не підходить для використання DBI. Теплові дані мають ряд обмежень, які слід враховувати. Спектральна відмінність теплових діапазонів є незначною і часто демонструє фенологічні та денні відмінності між досліджуваними територіями.

2.7. Спектральні індекси з нічним освітленням

NTL (Nighttime Lights) - це датчик нічного освітлення. Міський ландшафт відрізняється використанням світла на відміну від неміських територій. Таким чином, використовуючи спектральні дані NTL з денним часом, мультиспектральні датчики мають нове розуміння досліджень міст (Табл. 4).

Таблиця 4

Спектральні індекси з нічним освітленням

№ п/п	Формула	Джерело
1	$HSI = \frac{(1 - NDVI_m) - NTL_N}{(1 - NTL_N) + NDVI_m + (NDVI_m \times NTL_N)}$	[3]
2	$VANUI = (1 - NDVI_{nor}) \times NTL_{nor}$	[40]
3	$LISI = (1 - NDVI_{max}) \times \sqrt{NTL_{nor}}$	[41]
4	$NDUI = \frac{NTL - NDVI}{NTL + NDVI}, (NDVI \geq 0)$	[42]

5	$NUACI = \begin{cases} 0, d > r, d = \sqrt{(NDWI - \alpha)^2 + (EVI_{\max} - b)^2} \\ \left(1 - \frac{d}{r}\right) \times NTL_{Norm}, d \leq r \end{cases}$	[43]
6	$NAISI = \left(\frac{NTL - PC1_{nor} + TC3_{nor}}{2} \right) - SAVI_{nor}$	[44]

У 2008 році був запропонований індекс населених пунктів (HIS), який об'єднує дані максимального NDVI з Terra MODIS та нічного освітлення Землі (NTL) з операційної системи лінійного сканування Defense Meteorological Program Operational Line Scan System (DMSP-OLS) [2]. Обидва набори даних мають досить грубу просторову роздільну здатність, однак цей індекс ефективний для великомасштабного картографування міських територій. NDVIm у цьому випадку — максимальний NDVI, отриманий за рік із Terra MODIS, а NTLN — стандартизовані дані DMSP-OLS, нормовані в діапазоні від 0 до 1. Завдяки великому розміру пікселя HIS є швидким і економічно вигідним методом, хоча має проблему насиченості сигналу.

У дослідженні [39] запропоновано урбаністичний індекс нічного освітлення з поправкою на рослинність (VANUI), який вирішує проблему насиченості та підвищує контрастність сигналу NTL, краще виділяючи міські характеристики. VANUI застосовується для аналізу розширених урбаністичних процесів, таких як споживання енергії, викиди вуглекислого газу, структура міст тощо.

У роботі [40] запропоновано широкий масштабний індекс непроникної поверхні (Large-scale Impervious Surface Index, LISI), який демонструє кращу продуктивність порівняно з VANUI. LISI використовує максимальний річний NDVI з MODIS (NDVImax) та нормалізовані дані нічного освітлення з супутника VIIRS-DNB (NTLnor). Загальна точність LISI становить 0,13, і він призначений для картографування великих заміських і сільських територій.

Аналогічно, в дослідженні [41] було проаналізовано нормалізований індекс різниці в містах (Normalized Difference Urban Index, NDUI), що поєднує дані DMSP-OLS та Landsat RSI. У формулі NDUI використовується

нормалізоване зображення нічного освітлення (NTL), при цьому пікселі з $NDVI \leq 0$ вважаються водними об'єктами і виключаються з аналізу. Значення NDVI у діапазоні від 0 до 1 дозволяє ефективно розділяти міські території та сільськогосподарські угіддя.

Інший мультисенсорний міський індекс використовував розширений індекс рослинності MODIS (EVI), Landsat ETM+ і дані DMSP-OLS NTL, названі нормалізованим зведеним індексом міських територій (NUACI), завдяки підвищенню точності класифікації [19].

Індекс непроникної поверхні з поправкою на нічне світло (NAISI) розраховується з використанням трьох незалежних наборів даних: індексу ефективної вегетації (EVI) з MODIS, індексу водної поверхні (NDWI) з Landsat та нормалізованого зображення нічного освітлення з DMSP-OLS. NAISI усуває ефект розквіту (blooming effect) та зменшує проблеми насичення, характерні для грубих наборів даних нічного освітлення (NTL).

Для формування індексу, на відміну від використання грубого EVI з MODIS, застосовано індекс покращеної вегетації з поправкою на ґрунт (SAVI) з Landsat, що має середню просторову роздільну здатність [42].

У роботі [43] NAISI було представлено разом із підходом базового віднімання (background subtraction). Для розрахунку індексу використовували нормалізовані вихідні дані дистанційного зондування, зокрема: нічне освітлення (NTL), перший компонент аналізу головних компонентів (PC1), третій компонент перетворення Китаєць (TC3) та SAVI. Запропонований індекс показав значне підвищення точності виділення непроникних штучних поверхонь (ISA).

2.8. Комплексні спектральні індекси з оптичними, NTL і тепловими діапазонами

Стало можливим поєднання кількох комплексних індексів, а саме поєднали денні та нічні дослідження ДЗЗ за допомогою оптичних, теплових і NTL наборів даних (Табл. 5).

Таблиця 5

Комплексні спектральні індекси

№ п/п	Формула	Джерело
1	$MNDISI_{Liu} = \frac{T_{LST} + L_{LIT} - (SAVI + SWIR1)}{T_{LST} + L_{LIT} + (SAVI + SWIR1)}$	[21]
2	$VTLI = (1 - NDVI_{max}) \times Tem_{max} \times NTL_{nor}$	[45]
3	$TVANUI = \frac{\arctan(LST / NDVI)}{\pi / 2} \times NTL$	[40]

Термічні дані ДЗЗ широко використовувалися в дослідженні теплових островів міст (UHI). Автори роботи [20] модифікували алгоритм NDISI [33] і розробили MNDISI, який розглядає питання спектральної різниці в межах даних ДЗЗ і спектральної подібності з іншими класами земного покриття, особливо з підстилаючою поверхнею. Тут T_{LST} – денна температура земної поверхні, L_{LIT} – яскравість, отримана із зображень нічного світла, SAVI – індекс рослинності, а SWIR1 – смуга 5 у Landsat TM/ETM+.

Схожим за підходом є дослідження [44], в якому було розроблено індекс, що поєднує оптичні, теплові та дані нічного освітлення (NTL). Для цього використано набори даних: NTL з DMSP-OLS, індекс нормалізованої різниці вегетації (NDVI) на основі MODIS та температурні дані поверхні (LST) також з MODIS, що склало основу індексу VTIL. В цьому індексі $NDVI_{max}$ відображає максимальний річний NDVI, Tem_{max} – максимальну річну нічну температуру, а NTL_{nor} – нормалізовані дані DMSP-OLS про світлове забруднення. Усі вхідні дані нормалізуються в діапазоні від 0 до 1.

У 2018 році було розроблено урбаністичний індекс нічного освітлення (TVANUI), скоригований за допомогою температури рослинності. Для його формування використовували вегетаційний індекс, дані NTL і температури підстилаючої поверхні [39]. TVANUI був протестований на територіях Китаю та США та продемонстрував кращу продуктивність порівняно з іншими популярними міськими спектральними індексами.

РОЗДІЛ 3

ОБЧИСЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ПРИКЛАДІ ЛУЦЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

3.1. Загальні відомості

Кожне місто має свої унікальні місцеві кліматичні особливості, що формуються внаслідок складної взаємодії радіаційних потоків, які по-різному впливають на різні типи поверхні. На ці особливості впливають висотна забудова, заасфальтовані площі, міські вулиці, а також зелена рослинність і водні об'єкти. Забруднення атмосферного повітря, а також додаткове теплове навантаження, пов'язане з господарською діяльністю (зокрема спалюванням пального та випаровуванням), суттєво впливають на формування міського клімату. Ці фактори призводять до виникнення феномену «теплового острова» (Urban Heat Island, UHI) — метеорологічного явища XX–XXI століть, що характеризується підвищенням приземної температури повітря в міській забудові порівняно з прилеглими районами.

Феномен UHI спричиняє зміни у міській погоді та кліматі, створюючи в літній період дискомфортні умови для мешканців. Внаслідок цього в міських територіях формуються специфічні мікрокліматичні умови, які проявляються у зміні співвідношення складників радіаційного балансу, температури, вологості повітря та ґрунту, освітленості, опадів і швидкості вітру. Оскільки процес урбанізації набирає обертів, дослідження мікроклімату міст набуває особливої важливості і є актуальним завданням сучасної науки.

Прискорений ріст міст, індустріалізація, збільшення кількості автотранспорту та забруднення атмосферного повітря спонукали вчених до детальнішого вивчення клімату міст з його неоднорідною просторовою структурою. Міські ландшафти є типовими антропогенними перетвореннями, що відбуваються в процесі забудови. У зв'язку з цим, науковці приділяють значну увагу вивченню теплофізичних властивостей антропогенної поверхні міських ландшафтів.

Дослідження міських мікрокліматичних умов охоплюють трансформації теплових і вологісних процесів, які сприяють формуванню специфічних мікрокліматичних особливостей у міських ландшафтах. З урахуванням цих факторів виникає нагальна потреба в подальшому вивченні мікрокліматичних характеристик міста Луцька у сучасний період. Глибоке розуміння цих аспектів сприятиме не лише підвищенню якості життя мешканців, але й розробці ефективних екологічних стратегій для покращення стану довкілля в місті.

Луцьк — невелике місто та обласний центр Волинської області, розташоване в долині правої притоки Прип'яті — річки Стир. Територія міста переважно охоплює першу надзаплавну терасу, що включає правобережну і лівобережну частини, розташовану на північному краю Волинської височини, яка різко переходить у Поліську зандрову рівнину.

Рельєф території має слабо горбистий характер із чітко вираженими річковими долинами Стиру та трьох його приток. Дві з приток — Сапалаївка (правобережна) та Жидовинка і Омеляник (лівобережні) — розчленовують міську територію: Сапалаївка протікає через східно-центральну частину міста, Жидовинка — через південну, а Омеляник — через західну. Абсолютні висоти над рівнем моря в межах правобережної тераси Стиру варіюються від 190 до 205 метрів.

Особливу увагу варто звернути на вододіл між Сапалаївкою та Стиром: він має легку випуклість і асиметричну форму. Схил до р. Стир — вузький і крутий, тоді як схил до р. Сапалаївка — широкий і пологий, що особливо чітко помітно в центральній частині міста. Вододіли лівобережних приток Стиру, Жидовинки та Омеляника, в свою чергу, мають слабовиражений рельєф.

Село Рованці та мікрорайон Луцька Кічкарівка розташовані на широкій лівобережній першій надзаплавній терасі річки Стир. Ця полого тераса має абсолютні висоти в межах 180–185 м і поступово піднімається від заплавної зони до прилеглої до долини місцевості з висотами 190–195 м. Різноманітність типів діяльної поверхні — наявність штучних водойм, щільність забудови, парки, сквери, санітарно-захисні зони промислових підприємств, алеї, озеленені вулиці

та живоплоти — істотно впливають на формування кліматичних умов у межах міста. Це спричиняє просторову неоднорідність мікроклімату окремих районів у порівнянні з периферійними територіями та прилеглими населеними пунктами.

Загальна площа міста Луцьк становить 4161 гектар. Із цієї площі природні та штучні водотоки займають 2,5%, сільськогосподарські землі — 12,8%, заболочені землі та території без рослинного покриву — 2,4%. Забудовані землі охоплюють 72,8% від загальної площі міста, у тому числі території громадського призначення — 7,8%, житлові райони — 24,6%, промислові та транспортні території — 24,4%, комерційні землі — 3,8%, інші землі — 12,2% [47].

Місто характеризується значним поширенням твердого покриття. Чергування високих і низьких будівель, а також різноманітні напрямки вулиць і проспектів створюють бар'єри для випаровування вологи та руху повітряних потоків. Внаслідок цього підвищується нагрівання поверхні вдень і інтенсивніше охолодження вночі. Така специфіка впливає на співвідношення радіаційного та теплового балансу, формування вітрового режиму і призводить до виникнення характерних мікрокліматичних особливостей у межах міста.

Згідно з вищенаведеними даними, у межах міста формуються два мікрокліматичні райони:

1. **Заплава р. Стир та її приток:** характеризується нижчою температурою повітря в порівнянні з навколишньою територією та вищою вологістю.
2. **Тераса р. Стир:** тут температура повітря вища на 1–2 °С, а вологість нижча, ніж на заплаві.

Ці фактори свідчать про необхідність подальшого вивчення мікрокліматичних умов Луцька для розробки ефективних заходів щодо покращення якості життя в місті.

Згідно з дослідженнями, описаними в праці [45], мікрокліматичні відмінності в Луцьку найяскравіше проявляються за умов ясної та тихої погоди влітку. Наприклад, 4 та 5 липня 2017 року, коли спостерігалася відсутність хмарності (0 балів), різні типи діяльної поверхні отримували майже однакову кількість сонячного тепла, що впливало на термічний режим приземних шарів

повітря та ґрунту, призводячи до значних відмінностей у температурі повітря між районами міста.

На противагу цьому, за похмурої погоди та мінливої хмарності (до 8 балів), що спостерігалася в післяполуденні та вечірні години цих днів, показники температури знижувалися. Це пояснюється тим, що в умовах хмарності переважала розсіяна та частково пряма радіація, яка зменшувала розбіжності в отриманні тепла різними типами поверхні.

Також було зафіксовано, що при змінній хмарності в межах 3–7 балів (ввечері 4 липня, після полудня 5 липня та протягом дня 6 липня) підвищувалась турбулентність повітря, що сприяло згладженню мікрокліматичних особливостей. Таким чином, ясна погода сприяє більш виразному прояву мікрокліматичних відмінностей у Луцьку, тоді як похмура погода та вітрові умови пом'якшують ці різниці. Найвища температура повітря була зафіксована в центрі міста, на Театральному майдані, де температура зранку досягла 21,8 °С, а в післяобідній час — 22,9 °С. Відмітки температури на Театральному майдані демонстрували найбільші відхилення порівняно з даними метеостанції Луцьк, яка розташована на схід від міста на відстані 1 км. Зокрема, відхилення становили:

- 6,1 °С — від метеостанції Луцьк;
- 4,8 °С — від температури в Центральному парку;
- 4,7 °С — від берегу р. Стир;
- 1,2 °С — від скверу «Дубовий гай».

Ці дані підкреслюють важливість антропогенного впливу та різноманіття міського ландшафту, які призводять до значних коливань температури в різних частинах міста, створюючи різні мікрокліматичні умови.

У післяобідні години різниця температури повітря в Луцьку була значно меншою, ніж уранці, завдяки похмурій погоді. Відхилення температури повітря становили:

- 1,7 °С — від метеостанції Луцьк;
- 4,6 °С — від Центрального парку;

- **1 °C** — від берегу р. Стир;
- **0,5 °C** — від скверу «Дубовий гай».

У вечірні години найменші відхилення температури в центрі міста коливалися від **1,7 °C** (від МС Луцьк) до **1,0 °C** (від скверу «Дубовий гай»). Це свідчить про те, що температурні показники на всіх точках спостереження стали майже однаковими через мінливу хмарність.

Однак на правому березі р. Стир температура повітря в цей час була на **2,2 °C** нижча, ніж на Театральному майдані, та на **1,5–2,1 °C** нижча порівняно з лісопарковими зонами. Також температура була на **0,5 °C** нижча, ніж у метеостанції Луцьк. Це зниження температури можна пояснити впливом водойми, який впливає на термічний режим повітря в прилеглих районах.

Отже, у центрі Луцька фіксується підвищення температури повітря вранці на **1,2–0,5 °C** та в післяполуденний час на **6,1–1,7 °C** в порівнянні з промисловим мікрорайоном ДПЗ та метеостанцією Луцьк, розміщеними на південній і східній околицях міста. Основна причина цих мікрокліматичних різниць полягає в утворенні островів тепла, які найчастіше спостерігаються на міських площах, у перехрестях вулиць, а також на територіях із забудовами та заасфальтованими ділянками.

Таким чином, у ясну погоду влітку температура в центрі міста завжди вища завдяки потужним островам тепла, ніж у околицях і на території метеостанції Луцьк. Однак у сонячні, але вітряні дні ці температурні різниці значно зменшуються. Цю закономірність підтверджує думка Г. Є. Ландсберга, який стверджує, що навіть невелика швидкість вітру (більше **4 м/с**) може бути достатньою для знищення острова тепла, знижуючи температурні відмінності між міськими і навколишніми територіями.

Водночас посилення вітру та збільшення хмарності протягом дня призводять до зменшення температурних різниць між центром Луцька, його іншими районами та метеостанцією Луцьк. Так, за умов мінливої хмарності 6 липня спостерігали такі відхилення в температурних показниках:

- У центрі міста вранці температура була вищою на **3,7 °C** порівняно з Центральним парком.
- Вона перевищувала температуру на березі р. Стир на **2,9 °C** та на **2,8 °C** у сквері «Дубовий гай».
- У післяобідній час різниця становила **1,5 °C** для Центрального парку та **0,6 °C** для берега р. Стир; лише в сквері «Дубовий гай» температура була на **1 °C** вищою, ніж у центрі міста.

Найбільші різниці в температурних показниках спостерігалися вранці на Театральному майдані, де температура перевищувала показники на березі р. Стир на **3,9 °C** та на лісопаркових зонах на **0,2–1,1 °C**.

Варто зазначити, що в післяобідні та вечірні години температура повітря на метеостанції була вищою, ніж у центрі міста та інших його районах. Це призводило до найменших температурних відхилень, що пояснюється мінливою хмарністю, яка сприяла більш рівномірному розподілу тепла і, відповідно, згладженню мікрокліматичних особливостей.

Особливо помітна різниця температури повітря спостерігається між неозеленими та озеленими територіями Луцька, що загалом знижує температурні показники в зелених зонах. Зокрема, найбільші відмінності температур між центром міста, Центральним парком і сквером «Дубовий гай» були зафіксовані у ясну, тиху погоду вранці та в післяобідній час і становили **4,8 °C** і **4,6 °C** відповідно. Ввечері ця різниця зменшувалась до **0,1 °C** для Центрального парку та **0,7 °C** для скверу «Дубовий гай». Більша різниця температур між парком і сквером пояснюється густішою деревною рослинністю в Центральному парку.

За умов мінливої хмарності температура повітря ввечері була майже однаковою в обох зонах, а різниця становила незначні **1,5 °C** у післяобідній години. Винятком були ранкові години, коли різниця температур сягала **3,7 °C** і **2,8 °C** відповідно.

Спостереження влітку також показують, що в заплаві р. Стир за умов ясної та мінливої хмарності температура повітря нижча, ніж у центрі міста, на **4,7–2,9**

°C вранці, 1,2–0,6 °C в обід та 2,2 °C увечері. Однак вранці та в обід температура в заплаві виявлялася вищою на 1,4–1,0 °C та 0,7 °C відповідно. Вечірні години показували, що температура в заплаві була нижчою на 0,5–2,4 °C у порівнянні з даними метеостанції Луцьк, що обумовлено впливом бризової циркуляції.

Ці спостереження підкреслюють важливість зелених зон у регулюванні мікроклімату міста та їхній вплив на температурні коливання в різних районах.

Отже, основною причиною виникнення мікрокліматичних відмінностей у температурному режимі різних районів Луцька є радіаційний режим діяльної поверхні, що має специфічні теплопоглинальні властивості [45]. Це безпосередньо впливає на температуру повітря та, як наслідок, на вологість.

Варто зазначити, що вологість повітря в місті загалом нижча, ніж у його околицях. Це пов'язано із підвищенням температури і зменшеним випаровуванням з поверхонь, вкритих асфальтом або бруківкою.

Аналіз результатів вимірювань показав, що відносна вологість повітря влітку в центрі міста є значно нижчою, ніж у лісопаркових зонах, заплаві річки Стир та на метеостанції Луцьк. Найбільші відмінності спостерігалися зранку й увечері за ясної погоди: різниця між центром міста і метеостанцією становила 31 % та 24 % відповідно, а також між Центральним парком (16 % і 18 %) і сквером (23 % і 19 %).

У післяобідній час різниця була найменшою: відносна вологість у центрі міста була на 7 % вищою за показники метеостанції Луцьк і на 12 % та 13 % нижчою порівняно з лісопарковими зонами.

Загалом, у післяобідні години відносна вологість була вищою на всіх точках спостереження порівняно з метеостанцією Луцьк. За умов мінливої хмарності вологість повітря в центрі міста була нижчою на 17 % зранку, на 9 % в обід і на 12 % увечері у порівнянні з парковими зонами.

У заплаві річки Стир і в центрі міста різниця в показниках вологості повітря в післяобідній час була дещо більшою і становила 14 % у порівнянні з іншими точками спостереження.

В похмурі дні вологість повітря протягом дня мало змінювалася, і спостерігалися незначні відхилення у всіх точках спостереження від МС Луцьк, за винятком ранку в центрі міста. Ці дані свідчать про те, що різні типи діяльної поверхні, а також природні чинники, такі як озеленення та наявність водойм, мають значний вплив на формування мікроклімату міста.

Зазначена закономірність, що спостерігається в літні вечори, підтверджує значний вплив міської забудови та зелених зон на формування мікроклімату. Різниця у відносній вологості між центром міста та лісопарковими зонами становила **18–19 %**, що можна пояснити меншими випаровуючими поверхнями в центрі та великою площею парків, які забезпечують більш ефективну інфільтрацію та утримання вологи.

Варто звернути увагу на те, що відносна вологість повітря є вищою в Центральному парку культури та відпочинку ім. Лесі Українки та у сквері «Дубовий гай» порівняно з центром міста. Це явище зумовлене наявністю меліоративних каналів у парку, які сприяють збільшенню вологості. За даними досліджень, в молодих парках (скверах) відносна вологість повітря може бути на **5–10 %** вищою, ніж в відкритих місцевостях, тоді як у старих парках — на **15–20 %**.

Додатково, дерева відіграють важливу роль у збереженні вологості, затримуючи до **20 %** опадів, які випадають на їх поверхню. Основні причини зменшення відносної вологості в центрі міста включають наявність заасфальтованих площ, щільну забудову та перехрестя, які акумулюють сонячну радіацію та висушують повітря, формуючи так звані острови тепла. Також мала площа зелених насаджень, які активно вегетують і транспірують вологу, сприяє зниженню загальної вологості в міських умовах.

Таким чином, можна стверджувати, що баланс між забудовою і зеленими зонами є критично важливим для підтримки сприятливих мікрокліматичних умов у міських районах.

Наявність різних типів діяльної поверхні та формування островів тепла суттєво впливають на вітровий режим у місті. Науковці відзначають, що

швидкість вітру в межах міста є у 0,4–1,3 раза меншою, ніж у його околицях. Це підтверджують мікрокліматичні спостереження, згідно з якими найслабший вітер (0–2 м/с) зазвичай спостерігається в центральній частині міста та в лісопаркових зонах, де крони дерев стримують рух повітряних потоків.

В обідню пору на правому березі річки Стир зафіксовано посилені вітри зі швидкістю 4–5 м/с, що зумовлено бризовою циркуляцією. Ці вітри сприяють зниженню температури повітря до 19–21 °С у післяобідні години. Загалом середня швидкість вітру в міській забудові є меншою, ніж у позаміській зоні. При цьому метеостанція Луцьк фіксує значно вищу швидкість вітру, ніж у самому місті та його окремих районах.

Крім того, в місті спостерігаються мікрокліматичні відмінності щодо температури й вологості ґрунту, а також освітленості території. Освітленість визначається щільністю та орієнтацією забудови, а також наявністю дерев з різною густотою і конфігурацією тіні.

Найвищі показники освітленості зафіксовано на Театральному майдані — відкритій площі без зелених насаджень. Натомість у парку та на березі річки Стир освітленість менша через затінення, створене міською забудовою.

Температура ґрунту також істотно варіюється залежно від місця. Найвища температура спостерігалася на відкритій поверхні газону в центрі міста, де відбувається інтенсивне нагрівання та тепловіддача. Відносна вологість ґрунту в обідній та вечірній час коливалася тут у межах 20–35 %.

Найнижчі температури ґрунту фіксувалися у парках та біля водойм, де зімкнуті крони дерев обмежують проникнення сонячного світла і радіаційного тепла. Це уповільнює нагрівання ґрунту й приземного шару повітря, створюючи особливі мікрокліматичні умови в таких зонах.

Зменшення сонячної радіації та вітру під наметом лісопаркових насаджень, а також відсутність поверхневого стоку, сприяють зменшенню непродуктивних витрат вологи з ґрунту. Лісопаркові насадження затримують частину опадів, які випаровуються з крон дерев в атмосферу, зменшуючи вологість повітря та, відповідно, температуру верхнього шару ґрунту і самих рослин. Це призводить

до кращого збереження вологи в ґрунті. Внаслідок цього верхній (0–20 см) горизонт ґрунту в лісопаркових насадженнях є значно вологішим, порівняно з ґрунтами вуличних насаджень у центрі міста.

Піщані ґрунти на березі р. Стир, через свою сухість і малу теплопровідність, акумулюють тепло в верхніх горизонтах, що сприяє збільшенню фізичного випаровування та, відповідно, зменшенню їхньої вологості. З огляду на ці фактори, можна стверджувати, що найкомфортнішими мікрокліматичними умовами влітку для мешканців міста є лісопаркові зони та території поблизу водойм.

Плануючи забудову нових житлових районів та розвиток транспортної інфраструктури в умовах загострення проблеми зміни клімату, яка постає все гостріше в містах, включно з Луцьком, необхідно впроваджувати заходи для покращення міського клімату. Одним із найефективніших рішень є озеленення, яке регулює швидкість вітру, відносну вологість, температуру та запиленість повітря.

Озеленення міських територій може реалізовуватися у різних формах: створення парків і скверів, посадка дерев уздовж вулиць і доріг, формування тіньових біогруп та солітерів, вертикальне озеленення стін в'юнкими рослинами, облаштування зелених дахів і квіткове оформлення балконів будівель. Важливим є також впровадження заходів, що зменшують нагрівання будівель — з урахуванням їх орієнтації відносно сторін горизонту, вибору будівельних матеріалів, а також зниження рівня забруднення повітря, викликаного транспортною інфраструктурою.

Влітку, за ясної погоди, в центрі міста формуються потужні острови тепла, що забезпечують підвищення температури порівняно з околицями та метеостанцією (МС) Луцьк. Однак посилення вітру та збільшення хмарності в денний час сприяють зменшенню температурних відмінностей між центральною частиною міста, іншими районами та МС Луцьк. Особливо помітна значна різниця

температури між неозеленими і озеленими територіями, останні з яких суттєво знижують тепловий режим.

Відносна вологість повітря влітку в центрі міста є нижчою, ніж у лісопаркових зонах, заплаві річки Стир і на МС Луцьк. Мінімальна швидкість вітру спостерігається в центрі міста та в зелених зонах, де крони дерев стримують повітряні потоки. Водночас посилений вітер фіксується в обідню пору на правому березі річки Стир, що обумовлено місцевою бризовою циркуляцією.

Для покращення мікрокліматичних умов у Луцьку необхідно впровадити комплекс заходів, спрямованих на розвиток ландшафтно-рекреаційних зон. Важливо зберегти та розширити наявні зелені насадження загального користування, як у межах міста, так і на прилеглих територіях озеленоного поясу. Це передбачає створення нових масивів парків, лугопарків, гідропарку вздовж річок Стир і Сапалаївка, а також лісів і лісопарків. Подібні заходи не лише зменшать негативний вплив урбанізації на міський мікроклімат, але й підвищать якість життя мешканців, створюючи комфортні умови для відпочинку, рекреації та оздоровлення.

3.2. Коротка інформація про Луцьку міську територіальну громаду

Луцька міська територіальна громада складається з обласного адміністративного центра – міста Луцька, Прилуцького старостинського округу (с. Прилуцьке, с. Дачне, с. Жабка та с. Сапогове), Жидичинського старостинського округу (с. Жидичин, с. Клепачів, с. Кульчин, с. Липляни, с. Небіжка та с. Озерце), Боголюбського старостинського округу (с. Тарасове, с. Боголюби, с. Богушівка, с. Озденіж та с. Іванчиці), Княгининівського старостинського округу (с. Княгининок, с. Буків, смт Рокині, с. Брище, с. Зміїнець, с. Милушин, с. Милуші, с. Моташівка та с. Сирники), Заборольського старостинського округу (с. Забороль, с. Антонівка, с. Великий Омеляник, с. Всеволодівка, с. Олександрівка, с. Одереди, с. Городок, с. Сьомаки, с. Шепель, с. Заболотці та с. Охотин).

Луцька міська громада — територіальна громада в Україні, розташована на території Луцького району Волинської області. Вона була утворена 25 жовтня 2019 року шляхом приєднання Прилуцької сільської ради Ківерцівського району до Луцької міської ради обласного значення [47].

У сучасному вигляді громада сформована відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 червня 2020 року № 708-р. До її складу увійшли: Луцька міська рада обласного значення, Рокинівська селищна рада, Боголюбська, Заборольська, Княгининівська, Одерадівська, Шепельська сільські ради Луцького району, Жидичинська, Озерцівська та Прилуцька сільські ради Ківерцівського району, а також Іванчицівська сільська рада Рожищенського району. Загальна площа Луцької міської територіальної громади становить 38 257,43 га (382,57 км²) (Додаток 1).

Луцьк — одне з найдавніших міст України з багатою історико-культурною спадщиною та вигідним географічним розташуванням. Вперше згадка про місто зафіксована в Іпатіївському літописі 1085 року, що свідчить про його значний розвиток уже в той період.

Сучасне місто Луцьк розташоване на північному заході України. Це адміністративний центр Волинської області, який входить до складу «Єврорегіону Буг», займаючи площу 4023,17 га (40,23 км²). Місто простягається на 10 км із заходу на схід та на 15 км з півночі на південь. Луцьк знаходиться в межах поліської та лісостепової фізико-географічних зон.

Середньорічна температура в Луцьку становить 7,2 °С, а середня кількість опадів досягає 617 мм. Основна частина міста, зокрема й центр, розташована на правому березі річки Стир.

Луцьк є важливим транспортним вузлом Волинської області. Через місто проходять залізничні та автомобільні шляхи національного та міжнародного значення. Географічне розташування міста дуже вигідне: воно знаходиться за 85 км від кордону з Республікою Польща та за 398 км від столиці України — Києва. Найближчі аеропорти розташовані у місті Рівне (65 км) та Львів (143 км).

Місто має значний потенціал для розвитку різних видів туризму, завдяки хорошій екологічній ситуації, великій кількості архітектурних пам'яток, історичних та заповідних зон, а також розвиненим мистецьким осередкам та гостинності місцевих жителів.

Станом на 1 січня 2023 року населення Луцької територіальної громади становило 243 482 особи, з яких 215 986 мешкали безпосередньо в місті Луцьку.

Луцьк характеризується комфортною інфраструктурою, відносно доброю екологією, високим рівнем безпеки, сучасністю, компактністю, якісною освітою, багатою культурою та розвинутою економікою.

3.3. Застосування карт WorldCover для дослідження

Продукт **WorldCover 10 m**, запущений у 2021 році Європейським космічним агентством (ЄКА), пропонує планетарну карту земного покриття за 2021 рік з роздільною здатністю 10 метрів. Карта створена на основі даних супутників Sentinel-1 (радіолокаційні дані) та Sentinel-2 (оптичні дані).

WorldCover містить 11 класів земного покриття і розроблений у рамках проекту ЄКА WorldCover, що є частиною п'ятої програми ЄКА зі спостереження Землі (EOEP-5).

Раніше карти земного покриття великого масштабу базувалися на зображеннях з низькою роздільною здатністю (понад 100 м) або тільки на оптичних даних. Включення радіолокаційних даних Sentinel-1 відкриває нові можливості для більш точного та своєчасного моніторингу землекористування і змін покриття на великих територіях.

З цією метою, вражене конференцією WorldCover 2017 року, Європейське космічне агентство (ЄКА) ініціювало проект WorldCover. Результатом цього проєкту стало випуск у 2021 році у вільному доступі глобального продукту ґрунтового покриття з роздільною здатністю 10 м за 2020 рік, який базується на даних Sentinel-1 і Sentinel-2. Цей продукт містить 11 класів ґрунтового покриття і пройшов незалежну перевірку, демонструючи загальну глобальну точність близько 75%.

Отримавши позитивні відгуки, Європейське космічне агентство (ЄКА) вирішило продовжити проект WorldCover та доручило консорціуму WorldCover створити нову, покращену версію карти за 2021 рік. Оновлена карта, випущена 28 жовтня 2022 року, має загальну точність 76,7%.

Саме ця карта стала базою для нашого дослідження. На карті WorldCover 2021 року ми виділили межі Луцької міської територіальної громади (див. Додаток 2) та сформували шість тематичних шарів: лісові площі, пасовища, орні землі, забудовані території, водойми та трав'яно-болотні угіддя.

3.4. Встановлення залежності середнього значення температури відповідно до класу земельного покриття. На прикладі Луцької міської територіальної громади

Продукт MOD11A1 V6.1 надає щоденні значення температури поверхні землі (LST) та випромінювальної здатності в сітці 1200 на 1200 кілометрів. Значення температури отримують з продукту MOD11 L2. Коли температура сягає 30 градусів і вище, то деякі пікселі можуть мати кілька спостережень, які відповідають критеріям ясного неба. У такому випадку значення пікселя є середнім значенням усіх спостережень, що відповідають критеріям ясного неба. Разом з денними та нічними діапазонами приземної температури та їхніми індикаторними шарами якості надаються діапазони MODIS 31 і 32 та шість шарів спостережень.

Добовий продукт LST 3-го рівня з просторовою роздільною здатністю 1 км представлений у вигляді плитки розміром 1200×1200 пікселів у інтегрованій синусоїдальній проекції (версія V3) або синусоїдальній проекції (версія V4), де точний розмір пікселя становить 0,928 км × 0,928 км.

Застосувавши продукт MOD11A1 V6.1 для періоду з 1 червня по 1 вересня 2024 року на території Луцької міської громади, виокремленій за картою WorldCover, було отримано три картографічні зображення.

- Перше зображення (Додаток 3) демонструє коливання середніх денних температур. Найнижчі температури спостерігаються на водоймах, найвищі — на забудованих територіях (Додаток 7). Амплітуда коливань денних температур становить близько 4 °C.
- Друге зображення (Додаток 4) ілюструє середні нічні температури, де найнижчі значення зафіксовані на пасовищах, а найвищі — на забудованих територіях (Додаток 8).
- Третє зображення (Додаток 5), на якому використані дані дистанційного зондування для середньодобової температури, демонструє найвищі температури на орних землях і найнижчі — на лісових масивах. У цьому випадку температурні відмінності між класами земельного покриття коливаються в межах 5–10 °C і не є надто різкими.

Наше дослідження показало, що як вдень, так і вночі найвищі температури на забудованих (міських територіях), що ще раз підтверджує явище міського теплового острова.

3.5. Дослідження змін LST в часовому розрізі на прикладі міста Луцька

На додатках 9 – 10 розміщені тематичні карти території м. Луцька на яких прослідковується зміна LST в часовому розрізі від 1985р. – до сьогодні. Для опрацювання даних цих карт, для кожної з них було створено по два графіки: Гістограма значень пікселів та Гістограма розподілу значень пікселів відображає залежність між кількістю пікселів і температурою (°C). Площа під кожним інтервалом значень пікселів відповідає площі території в квадратних метрах (м²), для якої характерна відповідна температура. Аналіз даних, наведених у додатках 12–14, показує зміни температурного розподілу на території Луцької міської громади у часовому зрізі за роки 1985, 2000 та 2024.

У 1985р. спостерігаються найбільша кількість пікселів для температури 33–35°C, у 2000р. – для температури 38–40°C, а для 2024р. – 36–37°C. Ці ж показники підтвердили і графіки Площ під кожним інтервалом значень пікселів. Отже, пік найвищих температур на значних площах спостерігається у 2000р., значно нижчі

температури зафіксовані у 1985р., незначні зміни температур відбулися в проміжку 2000 – 2024р.

Максимальні значення LST на тематичних картах різняться у різні роки. Найвищі температури зафіксовані у 2000 році — 66,1 °С, що на 14,8 °С нижче, ніж у 1985 році, та на 5,7 °С нижче, ніж у 2024 році. Згідно з проведеними дослідженнями, найвищі температури спостерігалися саме у 2000 році, а найнижчі — у 1985 році. Температурні зміни у період між 2000 і 2024 роками є незначними.

Висновки

У цій роботі ми узагальнили найпоширеніші спектральні міські індекси, навели їхні математичні рівняння, розглянули переваги та недоліки, а також класифікували відповідно до вимог щодо діапазонів даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Було встановлено, що ранні міські спектральні індекси відзначалися простотою, базувалися на даних з одного джерела ДЗЗ і демонстрували надійність у застосуванні. Натомість сучасні індекси, хоча і більш складні, використовують кілька джерел даних, включають рідкісні спектральні смуги та забезпечують вищу точність і деталізацію аналізу.

Загалом, розвиток міського індексування проходив етапи — від загального картографування міських територій до більш спеціалізованого відображення окремих характеристик міського середовища. Водночас постійне розширення спектра та якості даних ДЗЗ сприяє підвищенню інформаційної ємності й функціональних можливостей цих індексів.

Зростаючий попит на високоякісні дослідження стимулює науковців у сфері дистанційного зондування Землі до розробки вдосконалених спектральних індексів. Використання платформ хмарних обчислень, таких як Google Earth Engine (GEE), а також зростання обчислювальної потужності дозволяють створювати більш складні та точні індекси. Подолання просторово-часових бар'єрів у спостереженнях потребує розробки надійніших методів, що забезпечать ефективне вирішення урбаністичних завдань. Отже, подальший розвиток спектральних індексів дистанційного зондування буде визначальним фактором у підвищенні ефективності практичного застосування таких методів.

У рамках цієї магістерської роботи проведено аналіз трьох алгоритмів визначення температури поверхні Землі (LST): алгоритму одного вікна, одноканального алгоритму та методу рівняння переносу випромінювання. Особливу увагу приділено впливу випромінювальної здатності поверхні Землі (LSE) — одного з ключових факторів, що визначають точність оцінки LST. З огляду на це, було досліджено різні моделі оцінки LSE, засновані на індексі

NDVI. Зокрема, проаналізовано три моделі: модель Ван де Грінда та Ове, модель Валора та Каселлеса, а також модель на основі порогового значення NDVI (NDVITHM), застосовані до даних Landsat 5 TM та 7 ETM+.

Використання даних про температуру поверхні Землі (LST) та випромінювальну здатність поверхні Землі (LSE), отриманих за допомогою дистанційного зондування, має широкий спектр застосувань у дослідженнях урбанізованих територій. Вимірювання LST дає змогу детально оцінювати тепловий режим різних міських районів, що є важливим інструментом при розробці генеральних планів та модернізації міського середовища. Аналіз даних LST дозволяє виявляти міські теплові інверсії та їх залежність від типу забудови, щільності забудови і наявності зелених зон, що має значення для дослідження якості повітря і формування мікроклімату в містах.

Дослідження температури поверхні Землі (LST) слугує основою для оцінки теплового комфорту населення та ідентифікації територій, які потребують впровадження заходів щодо покращення міського середовища. Постійний моніторинг змін LST дозволяє відстежувати процеси урбанізації, оцінювати їх вплив на навколишнє середовище та планувати стратегії сталого розвитку міських територій.

В цілому, дані про температуру поверхні Землі та випромінювальну здатність поверхні, отримані за допомогою дистанційного зондування, є потужним інструментом для вивчення міських районів та урбанізованих територій. Вони дозволяють отримувати інформацію про тепловий режим та взаємодію міста з навколишнім середовищем.

Наше дослідження на території Луцької міської громади показало, що як вдень, так і вночі найвищі температури фіксуються на забудованих міських територіях, що підтверджує існування явища міського теплового острова. Отримані результати, засновані на даних дистанційного зондування Землі, узгоджуються з висновками досліджень [45], виконаних на основі метеорологічних спостережень.

Застосувавши продукт MOD11A1 V6.1 для аналізу даних у часовому проміжку з 1 червня по 1 вересня 2024 року на карті WorldCover для території Луцької міської територіальної громади, було створено три картографічні зображення:

1. Середня денна температура

На першій карті (Додаток 3) показано коливання середніх значень денних температур. Аналіз зображення дозволив побудувати графік залежності середньої денної температури від класу земельного покриття. Дослідження виявило, що найнижчі температури фіксуються на водних об'єктах, тоді як найвищі – на забудованих територіях (Додаток 7). Амплітуда коливань денних температур становить близько 4°C.

2. Середня нічна температура

Картографічне зображення середніх нічних температур (Додаток 4) демонструє, що найнижчі значення спостерігаються на пасовищах, а найвищі, як і вдень, зафіксовані на забудованих територіях (Додаток 8).

3. Середньодобова температура

На зображенні, представленому в Додатку 5, використані дані дистанційного зондування Землі для визначення середньодобових температур поверхні. Графік залежності температури від класу земельного покриття демонструє, що найвищі температурні показники спостерігаються на орних землях, тоді як найнижчі — на лісових масивах. Водночас, температурні різниці між різними класами земельного покриття залишаються помірними і варіюють у межах 5–10°C.

Дослідження підтверджує, що як вдень, так і вночі найвищі температури фіксуються на забудованих (міських) територіях, що свідчить про наявність явища міського теплового острова.

За допомогою побудованих тематичних карт для міста Луцька було проаналізовано максимальні значення температури поверхні Землі (LST) у 1985, 2000 та 2024 роках. У 1985 році найбільша кількість пікселів припадала на інтервал температури 33–35 °C, у 2000 році — на 38–40 °C, а в 2024 році — на

36–37 °C. Аналогічні тенденції підтверджуються графіками площ під кожним інтервалом значень пікселів. Таким чином, найвищі температури на значних площах були зафіксовані у 2000 році, тоді як у 1985 році спостерігалися значно нижчі температурні показники. У період між 2000 та 2024 роками температурні зміни були незначними.

Максимальні значення температури поверхні Землі (LST) на тематичних картах свідчать про суттєві відмінності між роками. Найвища температура була зафіксована у 2000 році і становила 66,1 °C, що на 14,8 °C більше за показник 1985 року та на 5,7 °C більше, ніж у 2024 році. Результати досліджень підтверджують, що максимальні температури спостерігалися саме у 2000 році, а найнижчі — у 1985 році. У проміжку між 2000 та 2024 роками температурні зміни були незначними.

Список використаної літератури

1. Netzband, M., Stefanov, W. L., Redman, C. Applied remote sensing for urban planning, governance and sustainability: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
2. Lu, D., Tian, H., Zhou, G., та ін. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data. Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. С. 3668–3679.
3. Liu, X., Hu, G., Chen, Y., та ін. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 209. С. 227–239.
4. 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.
5. Уль, А. В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., та ін. Дистанційний моніторинг урбанізованих територій. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2022. No. 18. С. 162–173.
6. Melnyk, O., Manko, P., Brunn, A. Remote sensing methods for estimating tree species of forests in the Volyn region, Ukraine. Frontiers in Forests and Global Change. 2023. Vol. 6.
7. Pan, X., Uchida, S., Liang, Y., та ін. Discriminating different landuse types by using multitemporal NDXI in a rice planting area. International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31. С. 585–596.
8. He, C., Shi, P., Xie, D., та ін. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. Remote Sensing Letters. 2010. Vol. 1. С. 213–221.
9. Li, W. Mapping Urban Impervious Surfaces by Using Spectral Mixture Analysis and Spectral Indices. Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 1. С. 94.
10. Olaode, A., Naghdy, G., Todd, C. Unsupervised Classification of Images: A Review. International Journal of Image Processing. 2014. Vol. 8. С. 2014–325.
11. Melnyk, A., Manko, P. Classification of volyn forests according to data of multispectral satellite images. ScienceRise. 2018. Vol. 9. С. 25–30.

12. Ridd, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities†. *International Journal of Remote Sensing*. 1995. Vol. 16, No. 12. C. 2165–2185.
13. Parent, J., Volin, J., Civco, D. A fully-automated approach to land cover mapping with airborne LiDAR and high resolution multispectral imagery in a forested suburban landscape. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 104.
14. Miloud, chikr el-mezouar, Taleb, N., Kpalma, K., та ін. Vegetation extraction from IKONOS imagery using high spatial resolution index. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2011. Vol. 5.
15. Wang, D., Hubacek, K., Shan, Y., та ін. A Review of Water Stress and Water Footprint Accounting. *Water*. 2021. Vol. 13, No. 2. C. 201.
16. Nouri, H., Beecham, S., Anderson, S., та ін. High Spatial Resolution WorldView-2 Imagery for Mapping NDVI and Its Relationship to Temporal Urban Landscape Evapotranspiration Factors. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6, No. 1. C. 580–602.
17. Qin, R., Fang, W. A Hierarchical Building Detection Method for Very High Resolution Remotely Sensed Images Combined with DSM Using Graph Cut Optimization. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2014. Vol. 80. C. 37–47.
18. Wang, X., Li, P. Extraction of earthquake-induced collapsed buildings using Very High Resolution imagery and airborne Lidar data. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. C. 2163–2183.
19. Ruifang, H., Yu, D., Sun, Y., та ін. Integrating Multiple Source Data to Enhance Variation and Weaken the Blooming Effect of DMSP-OLS Light. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. C. 1422–1440.
20. Liu, C., Shao, Z., Chen, M., та ін. MNDISI: A multi-source composition index for impervious surface area estimation at the individual city scale. *Remote Sensing Letters*. 2013. Vol. 4.

21. Capolupo, A., Monterisi, C., Tarantino, E. Landsat Images Classification Algorithm (LICA) to Automatically Extract Land Cover Information in Google Earth Engine Environment. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 7. C. 1201.
22. Estoque, R. C., Murayama, Y. Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 56. C. 205–217.
23. Bai, Y., He, G., Wang guizhou, W. guizhou, та ін. WE-NDBI-A new index for mapping urban built-up areas from GF-1 WFV images. *Remote Sensing Letters*. 2020. Vol. 11. C. 407–415.
24. Chen, J., Yang, K., Chen, S., та ін. Enhanced normalized difference index for impervious surface area estimation at the plateau basin scale. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2019. Vol. 13. C. 1.
25. Tian, Y., Chen, H., Song, Q., та ін. A Novel Index for Impervious Surface Area Mapping: Development and Validation. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 10. C. 1521.
26. Moosavi, V., Talebi, A., Mokhtari, M. H., та ін. Estimation of spatially enhanced soil moisture combining remote sensing and artificial intelligence approaches. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, No. 23. C. 5605–5631.
27. Kawamura, M., Jayamanna, S., Tsujiko, Y. Quantitative Evaluation Of Urbanization In Developing Countries Using Satelite Data. *Doboku Gakkai Ronbunshu*. 1997. Vol. 1997, No. 580. C. 45–54.
28. Zha, Y., Gao, J., Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24, No. 3. C. 583–594.
29. Jieli, C., Manchun, L., Liu, Y., та ін. Extract residential areas automatically by New Built-up Index: 2010. 1c.
30. Waqar, M., Mirza, J. F., Mumtaz, R., та ін. Development of new indices for extraction of built-up area and bare soil from landsat. *Data*. 2012. Vol. 1.

31. Bouzekri, S., Lasbet, A. A., Lachehab, A. A New Spectral Index for Extraction of Built-Up Area Using Landsat-8 Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2015. Vol. 43, No. 4. C. 867–873.
32. Kaimaris, D., Patias, P. Identification and Area Measurement of the Built-up Area with the Built-up Index (BUI). *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*. 2016. Vol. 5. C. 1844–1858.
33. Xu, H. Analysis of Impervious Surface and its Impact on Urban Heat Environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2010. Vol. 76. C. 557–565.
34. As-syakur, A. R., Adnyana, I. W. S., Arthana, I. W., та ін. Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing*. 2012. Vol. 4, No. 10. C. 2957–2970.
35. Sun, Z., Wang, C., Guo, H., та ін. A Modified Normalized Difference Impervious Surface Index (MNDISI) for Automatic Urban Mapping from Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 9. C. 1–18.
36. Bhatti, S. S., Tripathi, N. K. Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing*. 2014. Vol. 51, No. 4. C. 445–467.
37. Zhaoqi, W., Gang, C., Li, X., та ін. Application of a normalized difference impervious index (NDII) to extract urban impervious surface features based on Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. C. 1–15.
38. Adamu, B., Rasul, A. Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. *Land*. 2018. Vol. 7.
39. Zhang, X., Li, P. A temperature and vegetation adjusted NTL urban index for urban area mapping and analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 135. C. 93–111.
40. Guo, W., Lu, D., Wu, Y., та ін. Mapping impervious surface distribution with integration of SNNP VIIRS-DNB and MODIS NDVI Data. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. C. 12459–12477.

41. Zhang, Q., Li, B., Thau, D., та ін. Building a Better Urban Picture: Combining Day and Night Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, No. 9. С. 11887–11913.

42. Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., та ін. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 59, No. 3. С. 440–451.

43. Chen, X., Jia, X., Pickering, M. A Nighttime Lights Adjusted Impervious Surface Index (NAISI) with Integration of Landsat Imagery and Nighttime Lights Data from International Space Station. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 83. С. 101889.

44. Hao, R., Yu, D., Sun, Y., та ін. Integrating Multiple Source Data to Enhance Variation and Weaken the Blooming Effect of DMSP-OLS Light. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, No. 2. С. 1422–1440.

45. Нетробчук І. М., Вдовичук І. І. Мікрокліматичні особливості міста Луцьк. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Географічні науки. Луцьк, 2017. № 9 (358). С. 15–22.

46. ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61781

47. Луцька міська рада. <https://www.lutskrada.gov.ua/pages/korotka-informatsiia-pro-lutsku-misku-terytorialnu-hromadu-roztashuvannia-klimat>

48. Закон України Про охорону навколишнього природного середовища <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>

ДОДАТКИ