

УДК 528.8+711.4

А.В. Уль

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5249-0828>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

О.В. Мельник

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

Ю.А. Мельник*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Л.А. Вакулюк

Старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-3927>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

*автор-кореспондент, e-mail: y.melnyk@lntu.edu.ua

Взаємозв'язок між температурою земної поверхні та характеристиками земного покриття міста Луцьк: аналіз часових рядів супутникових індексів Landsat.

Цитувати як:

Уль, А.В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., Вакулюк, Л. А. (2025). Взаємозв'язок між температурою земної поверхні та характеристиками земного покриття міста Луцьк: аналіз часових рядів супутникових індексів Landsat. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 353-369. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-31)

© 2025, Уль, А.В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., Вакулюк, Л. А.

Анотація. Швидке зростання міського населення посилює ефект "острову тепла" (UHI), що має значний вплив на довкілля та здоров'я. Розуміння динаміки температури земної поверхні (LST) та її зв'язку з типами земного покриття є критично важливим для сталого міського розвитку. Дистанційне зондування Землі є цінним інструментом для моніторингу та дослідження температурного режиму міських територій, дозволяючи отримувати інформацію про LST на великих територіях з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. На відміну від традиційних метеорологічних станцій, супутники забезпечують синоптичний огляд території, що є вирішальним для вивчення просторових закономірностей UHI. Особливо важливими є дані супутників програми Landsat, які надають довгострокові архівні записи з 1980-х років та мають термальні канали, придатні для розрахунку LST, а також канали у видимому, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах для вивчення характеристик земного покриття. Дане дослідження присвячене аналізу довготривалої динаміки річних середніх значень LST та спектральних індексів NDVI та NDBI для міста

Луцьк за період 1984-2024 років з використанням даних супутників Landsat (5, 7, 8, 9) та платформи Google Earth Engine. Застосовано методи аналізу часових рядів, лінійного трендового та кореляційного аналізу. Виявлено значні річні коливання LST та загальну тенденцію до її зростання ($+0.17^{\circ}\text{C}/\text{рік}$). Спостерігається позитивний тренд NDVI та негативний тренд альбедо. Кореляційний аналіз показав очікувані сильні негативні зв'язки LST з Альбедо. Однак, виявлені неочікувані позитивні кореляції LST з вегетаційними індексами та слабкі зв'язки з індексами забудови/голої землі потребують подальшого дослідження просторових закономірностей. Результати дослідження мають значення для оцінки мікроклімату та підтримки рішень з міського планування.

Ключові слова: температура земної поверхні, спектральні індекси, часові ряди, кореляція, Landsat, Google Earth Engine.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Швидке зростання міського населення по всьому світу призводить до значної трансформації ландшафтів, замінюючи природні поверхні (рослинність, ґрунти, водойми) на штучні матеріали (асфальт, бетон, будівлі). Ці зміни мають глибокий вплив на місцевий клімат, зокрема, сприяючи формуванню та посиленню ефекту міського "острову тепла" (Urban Heat Island - UHI) [1]. Ефект UHI проявляється у підвищенні температури повітря та земної поверхні в межах міських територій порівняно з навколишніми природними або сільськогосподарськими ландшафтами.

Дослідження температурного режиму міських територій має критичне значення з кількох причин [2]. По-перше, підвищені температури в містах можуть мати негативний вплив на здоров'я населення, збільшуючи ризики теплових ударів, загострення серцево-судинних та респіраторних захворювань. По-друге, UHI призводить до зростання споживання енергії на кондиціонування повітря, збільшуючи навантаження на електромережі та викиди парникових газів. По-третє, зміна термального режиму впливає на екосистеми в межах міста та прилеглих територій, змінюючи умови для існування флори і фауни. Розуміння динаміки та просторового розподілу температур є необхідним для розробки ефективних стратегій міського планування, адаптації до зміни клімату та покращення якості життя мешканців.

Дистанційне зондування Землі є надзвичайно цінним інструментом для моніторингу та дослідження температурного режиму міських територій. Супутникові дані дозволяють отримувати інформацію про температуру земної поверхні (Land Surface Temperature - LST) на великих територіях з високою просторовою та часовою роздільною здатністю [3, 4]. На відміну від традиційних метеорологічних станцій, які надають точкові вимірювання температури повітря, супутники забезпечують синаптичний огляд території, що є вирішальним для вивчення просторових закономірностей

УНІ. Особливо важливими є дані супутників програми Landsat, які надають довготривалі архівні записи (починаючи з 1980-х років) та мають термальні канали, придатні для розрахунку LST, а також канали у видимому, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах для вивчення характеристик земного покриття.

Температура земної поверхні тісно пов'язана з типом земного покриття та його фізичними властивостями, такими як альbedo (відбивна здатність поверхні), емісивна здатність та теплоємність. Різні типи земного покриття відіграють різну роль у формуванні теплового режиму, зокрема, забудовані території (будівлі, дороги) зазвичай мають низьке альbedo (поглинають більше сонячної радіації), високу теплоємність (акумулюють тепло) та низьку евапотранспірацію, що призводить до вищих температур, рослинність (ліси, парки, газони) має вище альbedo, забезпечує тінь та активно бере участь у процесі евапотранспірації (випаровування води рослинами), що чинить охолоджуючий ефект і призводить до нижчих температур, водойми (річки, озера) мають високу теплоємність і можуть відігравати як охолоджуючу, так і зігріваючу роль залежно від сезону та часу доби, але зазвичай мають більш стабільну температуру порівняно з суходолом, відкритий ґрунт та сільськогосподарські угіддя без рослинного покриття можуть сильно нагріватися під прямими сонячними променями.

Оцінка динаміки зміни спектральних індексів, розрахованих за даними супутників, є потужним інструментом для кількісної оцінки стану та типу земного покриття та їхньої зміни з часом. Індeksi, такі як Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) [5, 6], Нормалізований різницевий індекс забудови (NDBI) [7, 8] та альbedo [3, 9] є чутливими до різних характеристик поверхні (щільності та здоров'я рослинності, наявності води, ступеня забудови, відбивної здатності). Дослідження часових рядів цих індексів дозволяє виявити тенденції в зміні земного покриття, а їх кореляційний аналіз з LST допомагає встановити зв'язок між станом поверхні та її температурою. Оцінка динаміки зміни цих індексів паралельно з LST є ключовою для розуміння причинно-наслідкових зв'язків у формуванні міського теплового режиму в умовах змін клімату та антропогенного впливу.

Таким чином, комплексний аналіз довготривалих супутникових даних, що включає розрахунок температури земної поверхні та різноманітних спектральних індексів, є вкрай важливим для дослідження мікроклімату міських територій, оцінки впливу різних типів земного покриття та прогнозування майбутніх змін в умовах посилення ефекту міського "острову тепла".

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження довготривалої динаміки (1985-2024) річних середніх значень температури земної поверхні та ряду супутникових індексів для території м. Луцьк на основі даних D33 Landsat.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання дослідження:

- Виконати збір, попередню обробку (фільтрація, маскування хмарності) та інтеграцію багаторічних супутникових даних Landsat 5, 7, 8, 9 для території міста Луцьк.
- Розрахувати річні середні значення температури земної поверхні (LST) для досліджуваного періоду.
- Обчислити річні середні значення низки спектральних індексів, що характеризують різні аспекти земного покриття: Нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI), Нормалізованого різницевого індексу забудови (NDBI) та Альбеда.
- Проаналізувати динаміку річних середніх значень LST та розрахованих індексів шляхом побудови часових рядів.
- Визначити наявність та статистичну значущість довготривалих лінійних трендів у часових рядах LST та кожного з індексів.
- Дослідити кореляційні зв'язки між річними середніми значеннями LST та річними середніми значеннями спектральних індексів для оцінки впливу різних типів земного покриття на формування теплового режиму міста.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є місто Луцьк, розташоване на північному заході України. Луцьк є адміністративним центром Волинської області та Луцького району. Місто лежить на річці Стир, у південно-східній частині Волинської області. Географічні координати Луцька приблизно 50°45' північної широти та 25°20' східної довготи.

Територія міста розташована в межах Волинської височини. Клімат Луцька помірно-континентальний, характеризується м'якою зимою та теплим літом. Середньорічна температура повітря становить близько 7,4 °С, з найнижчими середніми значеннями у січні (-4,9 °С) та найвищими у липні (18,0 °С).

Згідно з останніми даними, населення міста Луцька становить близько 220-221 тисячі осіб (оцінка на 2022 рік). Площа міста, за різними джерелами, становить близько 40,23 км². Слід зазначити, що після приєднання Прилуцької сільської ради у 2019 році площа Луцької міської територіальної громади збільшилась, але безпосередньо площа міста Луцька становить зазначені вище значення.

В межах міста та прилеглих територій присутні різноманітні типи земного покриття, що є важливим для аналізу температурних умов та індексів. Окрім забудованих територій, є зелені зони, включаючи парки, а також водні об'єкти, пов'язані з річкою Стир та її притоками, наприклад, зоологічний заказник місцевого значення "Гнідавське болото", частина якого розташована в межах Луцька. Це є досить типовим для міст,

розташованих у лісостеповій зоні, з характерними для регіону ґрунтами. Дослідження цих різномірних ландшафтів за допомогою супутникових даних дозволяє оцінити їх вплив на мікроклімат міста.

Набори даних

Для довготривалого аналізу температури земної поверхні (LST) та спектральних індексів на території міста Луцьк у період з 1984 по 2024 роки використовувалися дані супутників програми Landsat [10]. Ця програма, що реалізується NASA та Геологічною службою США (USGS), надає найдовший безперервний архів спостережень Землі з космосу, що робить її ідеальною для досліджень часових рядів та виявлення довготривалих змін.

У дослідженні були задіяні дані з чотирьох супутників Landsat, що працювали або працюють протягом аналізованого періоду [11]:

Landsat 5 (LT05) оснащений тематичним картографом (Thematic Mapper - TM). Надавав дані з 1984 до 2012 року. Його дані були ключовими для ранньої частини досліджуваного періоду.

Landsat 7 (LE07) оснащений покращеним тематичним картографом (Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+). Надає дані з 1999 року по теперішній час, хоча після збою сканера у 2003 році зображення мають пропуски даних (гар-філи).

Landsat 8 (LC08) оснащений оперативним наземним іміджером (Operational Land Imager - OLI) та термальним інфрачервоним сенсором (Thermal Infrared Sensor - TIRS). Надає дані з 2013 року. Сенсор OLI має покращену радіометричну роздільну здатність (12 біт) порівняно з попередніми супутниками Landsat.

Landsat 9 (LC09) оснащений сенсорами OLI-2 та TIRS-2, які є вдосконаленими версіями сенсорів Landsat 8. Надає дані з 2021 року, забезпечуючи продовження безперервного ряду спостережень разом з Landsat 8.

Усі дані були отримані з колекцій Collection 2 Level 2 у каталозі Google Earth Engine [12]. Цей рівень обробки продуктів Landsat є атмосферно скоригованим і надає готові до використання дані:

Дані відбиття від поверхні Землі (Surface Reflectance (SR)) у видимих, ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах спектра мають просторову роздільну здатність 30 метрів і використовуються для розрахунку більшості спектральних індексів.

Дані температури земної поверхні (Surface Temperature (ST)), отримані з термальних каналів (ST_B6 для Landsat 5/7, ST_B10 для Landsat 8/9). Ці дані також є масштабованими і потребують застосування відповідного коефіцієнта та зсуву (0.00341802 та 149.0) для отримання температури в Кельвінах, яка потім конвертується у градуси Цельсія.

Використання даних Landsat Collection 2 Level 2 забезпечило узгодженість та високий ступінь обробки вхідних даних, мінімізуючи

необхідність додаткових атмосферних корекцій. Назви колекцій у каталозі GEE, що відповідали використаним даним, були наступними:

Landsat 5 TM: LANDSAT/LT05/C02/T1_L2

Landsat 7 ETM+: LANDSAT/LE07/C02/T1_L2

Landsat 8 OLI/TIRS: LANDSAT/LC08/C02/T1_L2

Landsat 9 OLI-2/TIRS-2: LANDSAT/LC09/C02/T1_L2

Вибір цих супутникових даних дозволив провести ретроспективний аналіз змін температурного режиму та характеристик земного покриття міста Луцьк за значний проміжок часу (40 років) з достатньою для регіонального масштабу просторовою деталізацією.

Порядок проведення дослідження

Дослідження проводилося з використанням платформи Google Earth Engine (GEE) та програмного середовища Python з бібліотеками geemap, geopandas, pandas, numpy, matplotlib, seaborn та scipy [13]. Процес аналізу включав наступні етапи:

Межі міста Луцьк було завантажено з векторного файлу формату Shapefile (.shp) за допомогою бібліотеки geopandas отриманого із сервісу OpenStreetMap. Отриманий полігон було конвертовано у формат ee.Geometry для використання в Google Earth Engine.

Для кожного року в досліджуваному періоді (1984-2024) та для кожного супутника Landsat (Landsat 5, 7, 8, 9) виконувався запит до відповідних колекцій продуктів Surface Reflectance (SR) та Surface Temperature (ST) (колекції 2, рівень 2) у каталозі GEE на літній період (1 червня – 31 серпня). Колекції фільтрувалися за просторовим розташуванням (область дослідження) та часовим діапазоном (червень-серпень для фокусування на літньому періоді). Знімки з високою хмарністю (більше 20%) виключалися з подальшого аналізу. Застосовувалися бітові маски якості (QA_PIXEL) для маскування пікселів, закритими хмарами, тінями від хмар, а також для вибору тільки "чистих" пікселів.

Для кожного знімка Landsat з термальним каналом (ST_B6 для Landsat 5/7, ST_B10 для Landsat 8/9) отримувалось значення пікселів термального каналу. До значень термальних каналів застосовувався стандартний коефіцієнт масштабування та зсув, визначені для продуктів Landsat Collection 2 Level 2. Отримані значення температури в Кельвінах конвертувалися у градуси Цельсія шляхом віднімання константи 273.15 і отриманий канал LST додавався до зображення.

До каналів Surface Reflectance (SR_B*) кожного знімка застосовувався стандартний коефіцієнт масштабування (0.0000275) та зсув (-0.2) для отримання дійсних значень коефіцієнтів відбиття (reflectance) у діапазоні [0, 1]. Використовуючи масштабовані канали коефіцієнтів відбиття, обчислювалися значення наступних спектральних індексів за їх

стандартними формулами: NDVI, NDBI (SWIR1/NIR) та Albedo (зважена сума).

Добре відомий і широко використовуваний нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [14] є простим, але потужним інструментом для вимірювання зеленої рослинності. Він врівноважує розсіювання зеленого листа в ближньому інфрачервоному діапазоні з абсорбцією хлорофілу в червоному діапазоні довжин хвиль (1). Значення NDVI коливаються від -1 до 1. Негативні значення NDVI (близькі до -1) вказують на наявність води. Значення, близькі до нуля (від -0,1 до 0,1), зазвичай відображають безплідні ділянки, такі як скеля, пісок або сніг. Низькі позитивні значення (від 0,2 до 0,4) відповідають чагарникам і лукам, а високі - помірним і тропічним дощовим лісам.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

де ρ_{NIR} — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B4, для Landsat 8/9 – SR_B5); ρ_{RED} — коефіцієнт відбиття у видимому червоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B3, для Landsat 8/9 – SR_B4).

Нормалізований різницевий індекс забудови NDBI (Normalized Difference Built-up Index) [7] є одним із спектральних індексів, широко використовуваних для виділення та картографування забудованих територій у міських та приміських ландшафтах за даними дистанційного зондування. Індекс NDBI розраховується на основі відбивної здатності земної поверхні у короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах спектра за наступною формулою (2):

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

де ρ_{SWIR1} — коефіцієнт відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні 1 (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B5, для Landsat 8/9 – SR_B6); ρ_{NIR} — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B4, для Landsat 8/9 – SR_B5).

Вибір цих спектральних діапазонів обумовлений їхніми характеристиками взаємодії з різними типами земного покриття. Забудовані території (будівлі, дороги) зазвичай мають вище відбиття у SWIR діапазоні порівняно з NIR, тоді як рослинність, навпаки, має дуже низьке відбиття у SWIR та високе у NIR (внаслідок інтенсивного поглинання у SWIR та сильного відбиття у NIR через клітинну структуру листа). Вода поглинає значну частину енергії в обох цих діапазонах, особливо у SWIR. Значення NDBI лежать у діапазоні від -1 до +1. Вищі позитивні значення NDBI (> 0)

зазвичай відповідають забудованим територіям. Значення близько нуля можуть відповідати ґрунтам або територіям з розрідженою рослинністю. Від'ємні значення NDBI (< 0) типові для територій з щільним рослинним покривом та водних об'єктів.

Альbedo поверхні є важливою радіаційною властивістю [9, 15, 16], що визначає частку падаючого сонячного випромінювання, яка відбивається від поверхні. Це безрозмірний показник, що набуває значень від 0 (повне поглинання) до 1 (повне відбиття). Альbedo земної поверхні відіграє значну роль у формуванні енергетичного балансу, впливаючи на температуру поверхні: поверхні з низьким альbedo (темні, наприклад, асфальт, темний ґрунт) поглинають більше сонячної енергії і сильніше нагріваються, тоді як поверхні з високим альbedo (світлі, наприклад, сніг, світла покрівля, пісок) відбивають більшу частину випромінювання і залишаються прохолоднішими.

В контексті міських територій, зміна альbedo поверхні внаслідок урбанізації є одним з ключових факторів, що сприяють формуванню ефекту міського "острову тепла". Моніторинг змін альbedo є важливим для оцінки впливу різних типів міського покриття на тепловий режим.

Ширококутне короткохвильове альbedo (3) може бути оцінене за даними супутникових знімків як зважена сума коефіцієнтів відбиття в окремих спектральних діапазонах. У даному дослідженні для розрахунку альbedo за даними Landsat використовувався підхід, запропонований [17], який надає специфічні вагові коефіцієнти для каналів сенсора Thematic Mapper (TM) супутників Landsat 5 та Landsat 7.

Формула для розрахунку альbedo за цим методом виглядає наступним чином:

$$\text{Albedo} = \rho_{\text{Blue}} \cdot w_{\text{Blue}} + \rho_{\text{Green}} \cdot w_{\text{Green}} + \rho_{\text{Red}} \cdot w_{\text{Red}} + \rho_{\text{NIR}} \cdot w_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR1}} \cdot w_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{SWIR2}} \cdot w_{\text{SWIR2}} \quad (3)$$

де ρ — коефіцієнт відбиття в відповідному спектральному діапазоні (Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2), а w — вагові коефіцієнти, для даних Landsat TM. Зокрема, використані вагові коефіцієнти були: $w_{\text{Blue}} = 0.293$, $w_{\text{Green}} = 0.274$, $w_{\text{Red}} = 0.233$, $w_{\text{NIR}} = 0.156$, $w_{\text{SWIR1}} = 0.045$, $w_{\text{SWIR2}} = 0.013$. В даному дослідженні, незважаючи на те, що ці коефіцієнти були отримані для сенсорів TM (Landsat 5/7), вони також були застосовані для даних сенсорів OLI/TIRS (Landsat 8/9) для забезпечення послідовності методики розрахунку альbedo по всій довготривалій часовій серії. Розрахунки проводилися на основі масштабованих до $[0, 1]$ коефіцієнтів відбиття з продуктів Landsat Collection 2 Level 2.

Аналіз динаміки альbedo та його кореляції з LST дозволяє кількісно оцінити, як зміни відбивної здатності поверхні міста Луцьк впливають на його тепловий режим. Очікується, що зі зменшенням середнього альbedo

міста (наприклад, внаслідок збільшення площі темних асфальтових доріг та покрівель) температура земної поверхні буде зростати, що проявиться у сильному негативному кореляційному зв'язку між цими показниками.

До всіх числових даних, окрім даних LST застосовувалася нормалізація до діапазону $[-1, 1]$ за формулою (4):

$$x_{\text{норм.}} = 2 \cdot \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} - 1. \quad (4)$$

На основі нормалізованого фрейму даних будувався двовісний графік часових рядів, що відображає зміну річних середніх значень LST (на лівій осі Y) та всіх нормалізованих індексів (на правій осі Y).

Було проведено лінійний регресійний аналіз для виявлення довготривалих тенденцій у часових рядках річних середніх значень кожного нормалізованого параметра (також LST). Обчислювалися нахил тренду, коефіцієнт детермінації (R^2) та р-значення. Також обчислювалася матриця парних коефіцієнтів кореляції Пірсона між річними середніми значеннями LST та всіх нормалізованих індексів.

Результати та обговорення

Аналіз часових рядів та трендів

Для дослідження було використано 212 зображень із чотирьох супутників Landsat на основі яких було створено усереднені композитні зображення для кожного року.

Аналіз часових рядів (рис. 1.) та трендів (рис. 2.) дозволяє візуально оцінити загальну картину змін кожного параметра та їхню взаємодію протягом тривалого періоду, що є основою для подальшого статистичного аналізу трендів та кореляцій (рис. 1.).

Графік відображає динаміку річних середніх значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки. Графік має дві осі Y: ліва вісь відображає значення LST у градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$), права вісь - значення індексів, нормалізовані до діапазону $[-1, 1]$ для зручності порівняння.

Лінія LST демонструє значні річні коливання протягом досліджуваного періоду, що є очікуваним для середніх літніх температур. Спостерігається загальна тенденція до зростання LST протягом 40 років, хоча і з вираженими піками та спадами в окремі роки. Наприклад, помітні відносно високі значення LST у роки близько 2010-2012, 2015-2016 та після 2018 року. Діапазон річних середніх значень LST знаходиться приблизно між 22.5°C та 40.0°C . Середнє значення за весь період 32.82°C , мінімальне: 22.52°C та максимальне 38.42°C . Тренд **зростає** $+0.17^{\circ}\text{C}/\text{рік}$. Температура поверхні стабільно зростає, що свідчить про ефект урбанізації та кліматичних змін.

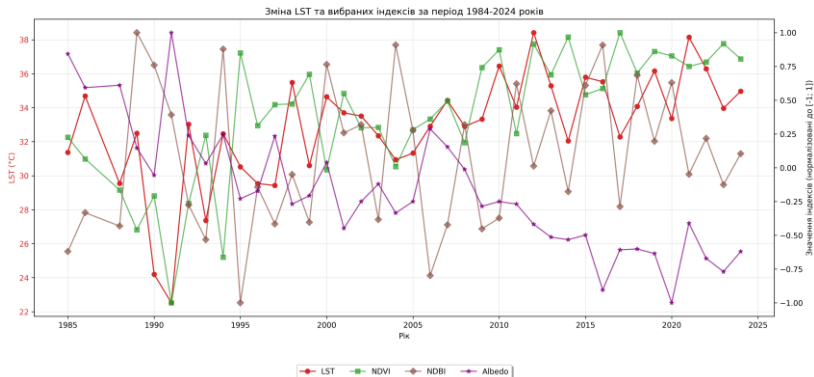


Рис. 1. Динаміка річних середніх значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки

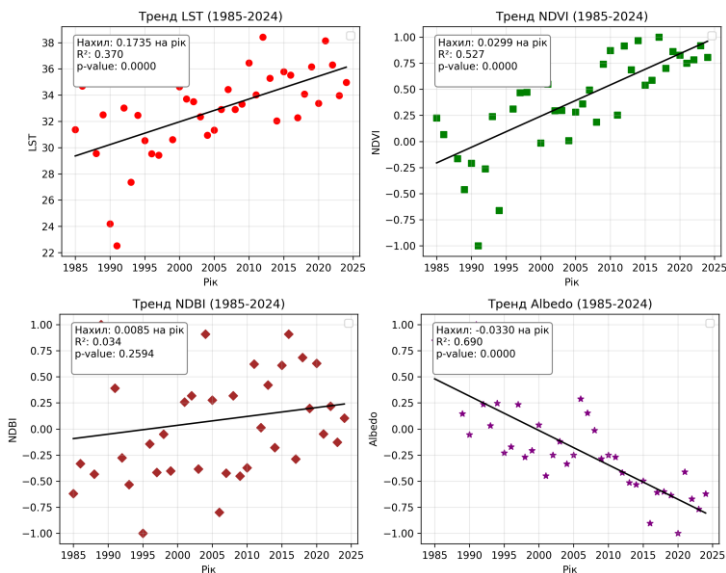


Рис. 2. Аналіз трендових значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки

Лінія NDVI відображає зміни у щільності та здоров'ї рослинного покриву. Оскільки аналізуються літні місяці (період максимальної вегетації), значення NDVI переважно високі. Значення NDVI коливаються у верхній частині діапазону нормалізованих індексів, що свідчить про

значну частку вегетації в межах міста (парки, сквери, приватна забудова із зеленими насадженнями). Спостерігаються річні коливання, які можуть бути пов'язані з погодними умовами конкретного року, що впливають на вегетацію. Середнє значення NDVI за весь період 0.53, мінімальне 0.46, а максимальне 0.57. Тренд **зростає** $+0.0229/\text{рік}$, що вказує на збільшення зелених зон або інтенсифікацію вегетації).

Лінія NDBI відображає ступінь забудови території. Високі значення NDBI характерні для щільно забудованих районів. Значення NDBI на графіку, показують середній рівень забудови для всієї досліджуваної території міста Луцьк. Тренд демонструє слабке зростання $+0.0085/\text{рік}$.

Лінія альbedo відображає середню відбивну здатність поверхні міста. Низьке альbedo (темніші поверхні) сприяє нагріванню, тому очікується негативна кореляція з LST. Візуально лінія Альbedo може ефективно відображати зміни у типах покриття, що переважають в місті з часом (наприклад, збільшення темних асфальтових поверхонь). Тренд **зменшується** на $-0.0330/\text{рік}$. Зниження альbedo свідчить про заміну світлих поверхонь (трава, вода) на темніші (збудова, асфальт).

Кореляційний аналіз

Для оцінки взаємозв'язку між річними середніми значеннями температури земної поверхні (LST) та річними середніми значеннями розрахованих спектральних індексів для міста Луцьк за період 1984-2024 років було проведено кореляційний аналіз Пірсона. Результати аналізу представлені у вигляді кореляційної матриці (Рис. 3) та графіків розсіювання (Рис. 4), де відображено коефіцієнти кореляції між усіма парами показників.

Аналіз кореляційної матриці виявив наступні зв'язки між LST та дослідженими спектральними індексами: LST та NDVI (Нормалізований різницевий вегетаційний індекс): Коефіцієнт кореляції між LST та NDVI становить 0.573. Це вказує на помірний позитивний лінійний зв'язок. Зазвичай, для міських територій та природних ландшафтів очікується сильна негативна кореляція між LST та NDVI, оскільки більш щільна та здорова рослинність сприяє охолодженню поверхні за рахунок тіні та евапотранспірації.

Кореляція між LST та NDBI виявилася дуже слабкою позитивною, коефіцієнт складає 0.072. Очікується, що NDBI, як індикатор щільності забудови, матиме позитивну кореляцію з LST, оскільки штучні поверхні сильніше нагріваються. Низьке значення коефіцієнта може свідчити про те, що в межах всієї території міста (як усередненого значення) вплив NDBI не є домінуючим фактором у формуванні річного середнього LST порівняно з іншими факторами, або ж про складний просторовий розподіл цих характеристик.

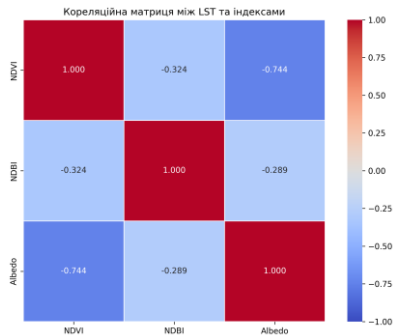


Рис. 3. Кореляційна матриця

Отриманий позитивний зв'язок є нетиповим і може потребувати додаткового аналізу або пояснень у контексті специфіки даних або території дослідження за даний період. Графік розсіювання LST vs NDVI (Рис. 4.) візуально підтверджує цю тенденцію, показуючи розкид точок, що схиляється до зростання LST при зростанні NDVI.

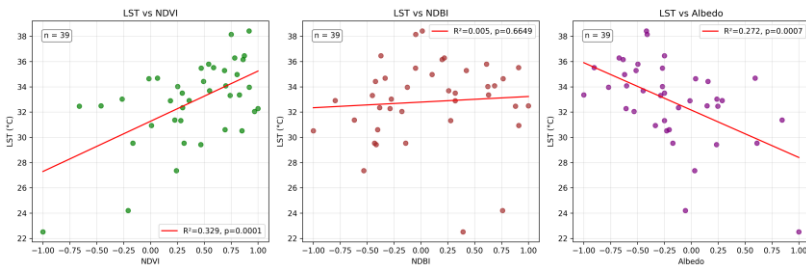


Рис. 4. Аналіз кореляційних зв'язків LST та обчислених спектральних індексів.

Між LST та нормалізованим Альбедо спостерігається помірний негативний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом -0.522 . Це відповідає фізичним принципам: поверхні з низьким альбедо (темніші) поглинають більше сонячної радіації і, як наслідок, сильніше нагріваються (вища LST), тоді як поверхні з високим альбедо (світліші) відбивають більше радіації і залишаються прохолоднішими (нижча LST).

Висновки

Результати кореляційного аналізу виявили очікуваний негативний зв'язок між LST та Альбедо, що свідчить про важливість відбивної здатності поверхні для її нагріву.

Однак, отримані позитивні кореляції між LST та вегетаційним індексом NDVI [18], а також дуже слабкий зв'язок з індексами забудови (NDBI) є неочікуваними та суперечать типовим результатам подібних досліджень для міських територій. У більшості випадків щільна рослинність та висока забудова є ключовими факторами, що зумовлюють формування "островів тепла" (позитивна кореляція LST з NDBI) та "островів прохолоди" (негативна кореляція LST з NDVI).

Нетипові результати можуть бути викликані низкою причин, які потребують подальшого дослідження

Використання річних середніх значень по всій території міста може усереднювати просторові варіації, де зв'язки між LST та індексами можуть бути різними (наприклад, у центрі міста та на околицях). Просторово-диференційований кореляційний аналіз міг би надати більш детальну картину.

Незважаючи на нетипові результати для деяких індексів, сильні негативні кореляції з альбедо підтверджують їх важливу роль у регулюванні температури поверхні міста. Це вказує на необхідність збереження та збільшення площі водних поверхонь та використання матеріалів з високим альбедо при міському плануванні для пом'якшення ефекту міського "острову тепла".

Кореляційний аналіз виявив значущі зв'язки між LST та спектральними індексами для міста Луцьк у період 1984-2024 років. Негативна кореляція з Альбедо вказує на важливість відбивної здатності поверхні. Однак, неочікувані позитивні кореляції з вегетаційним індексом (NDVI) та слабкі зв'язки з індексами забудови (NDBI) потребують подальшого детального аналізу та інтерпретації з урахуванням просторових особливостей та інших факторів, що впливають на формування міського теплового режиму в даному регіоні.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Це дослідження було профінансовано Deutscher Akademischer Austauschdienst у рамках програми Future Ukraine: Research Grants for Ukrainian Master's students and researchers, 2024/2025 (57755101)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті. Додаткові матеріали можуть бути надані за особистим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Kashtan, V. I., Serhieieva, K. L., Korobko, O. V., et. al. Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images. *Systemni tekhnolohii*. 2023. Vol. 3, No. 146. C. 87–98.
2. Lischenko, L., Kudryashov, A. The results of the study of spatio-temporal changes in surface temperatures of Zaporizhya based on satellite data. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2021. Vol. 8, No. 3. C. 27–36.
3. Ul, A. V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., ta in. Ohliad spektralnykh indeksiv dlia dystantsiinykh doslidzhen urbanizovanykh terytorii. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2024. No. 21. C. 253–270.
4. Ul, A. V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., ta in. Dystantsiinyi monitorynh teplovoho rezhymu v mistakh: teoretychni osnovy. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2023. No. 20. C. 144–157.
5. Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., ta in. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. C. 1199–1210.
6. Melnyk, O., Brunn, A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth* 2025, Vol. 6, Page 28. 2025. Vol. 6, No. 2. C. 28.
7. Muhaimin, M., Fitriani, D., Adyatma, S., ta in. Mapping build-up area density using the normalized difference built-up index (NDBI) and urban index (UI) in the wetland of the city of Banjarmasin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1089, No. 1. C. 012036.
8. Guha, S., Govil, H., Dey, A., ta in. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, No. 1. C. 667–678.
9. He, T., Liang, S., Wang, D., ta in. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+ +, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. C. 181–196.
10. Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., ta in. Free access to Landsat imagery. / *United States, United States*: 2008. 1011 p.
11. Landsat Science: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (data zvernennia: 19.05.25).
12. Landsat Collections in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers: URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat> (data zvernennia: 19.05.25).
13. Earth Engine and Geemap - Geospatial Data Science with Python: URL: <https://locatopress.com/book/gee> (data zvernennia: 19.05.25).

14. Crippen, R. E. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34, No. 1. C. 71–73.
15. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., та ін. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. C. 127–147.
16. Wan, Z. та ін. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
17. Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2008. Vol. 13, No. 2. C. 51–63.
18. V. Rasiun, V. Voloshyn, O. Rudyk, O. Melnyk, A. Vovk. Doslidzhennia vykorystannia metodiv DZZ dlia monitorynhu ta kartohrafuvannia torfovyyshch. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, 2025. Vol. I(49). C. 201–2011.

Література

1. Kashtan, V. I., Serhieieva, K. L., Korobko, O. V., **et. al.** Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images. *Системні технології*. 2023. Vol. 3, No. 146. C. 87–98.
2. Lischenko, L., Kudryashov, A. The results of the study of spatio-temporal changes in surface temperatures of Zaporizhya based on satellite data. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2021. Vol. 8, No. 3. C. 27–36.
3. Уль, А. В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., та ін. Огляд спектральних індексів для дистанційних досліджень урбанізованих територій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2024. No. 21. C. 253–270.
4. Уль, А. В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., та ін. Дистанційний моніторинг теплового режиму в містах: теоретичні основи. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2023. No. 20. C. 144–157.
5. Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., та ін. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. C. 1199–1210.
6. Melnyk, O., Brunn, A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth* 2025, Vol. 6, Page 28. 2025. Vol. 6, No. 2. C. 28.
7. Muhaimin, M., Fitriani, D., Adyatma, S., та ін. Mapping build-up area density using the normalized difference built-up index (NDBI) and urban index (UI) in the wetland of the city of Banjarmasin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1089, No. 1. C. 012036.
8. Guha, S., Govil, H., Dey, A., та ін. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, No. 1. C. 667–678.

9. He, T., Liang, S., Wang, D., та ін. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+ +, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. С. 181–196.
10. Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., та ін. Free access to Landsat imagery. / United States, United States: 2008. 1011 p.
11. Landsat Science: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата звернення: 19.05.25).
12. Landsat Collections in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers: URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat> (дата звернення: 19.05.25).
13. Earth Engine and Geemap - Geospatial Data Science with Python: URL: <https://locatepress.com/book/gee> (дата звернення: 19.05.25).
14. Crippen, R. E. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34, No. 1. С. 71–73.
15. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., та ін. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. С. 127–147.
16. Wan, Z. та ін. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
17. Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2008. Vol. 13, No. 2. С. 51–63.
18. В. Расюн, В. Волошин, О. Рудик, О. Мельник, А. Вовк. Дослідження використання методів ДЗЗ для моніторингу та картографування торфовищ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*,. 2025. Vol. I(49). С. 201–2011.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 28.05.2025	Received 28.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2025	Received in revised form 29.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A.V. Uhl

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5249-0828>
 Department of Geodesy, Land Management and Cadastre
 Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

O.V. Melnyk

Ph.D. in Engineering, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>
 Department of Geodesy, Land Management and Cadastre
 Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

Yu.A. Melnyk*

Ph.D. in Engineering, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>
 Department of Building and Civil Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

L.A. Vakulyuk

Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-3927>

Department of Geodesy, Land Management and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

*corresponding author e-mail: y.melnik@lntu.edu.ua

The relationship between land surface temperature and land cover characteristics in Lutsk: time series analysis of Landsat satellite indices.

How to Cite:

Uhl, A.V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., Vakulyuk, L. A. (2025). The relationship between land surface temperature and land cover characteristics in Lutsk: time series analysis of Landsat satellite indices. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 353-369. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-31)

Abstract. Rapid urban population growth exacerbates the urban heat island effect (UHI), which has significant environmental and health implications. Understanding the dynamics of land surface temperature (LST) and its relationship with land cover types is crucial to achieving sustainable urban development. Remote sensing of the Earth is a valuable tool for monitoring and studying the temperature regime of urban areas, as it allows LST information to be acquired over large areas with high spatial and temporal resolution. Unlike traditional weather stations, satellites provide a synoptic overview of an area, which is crucial for studying the spatial patterns of the UHI effect. The Landsat satellites are particularly important as they have provided long-term archival records since the 1980s, and their thermal channels are suitable for calculating LST. They also have channels in the visible, near-infrared and short-wave infrared ranges for studying land cover characteristics. This study analyses the long-term dynamics of the annual average LST values and the NDVI and NDBI spectral indices for Lutsk between 1984 and 2024, using Landsat satellite data (5, 7, 8, and 9) and the Google Earth Engine platform. Time series analysis and linear trend, and correlation analysis methods were applied. Significant annual fluctuations in LST were found, as well as a general trend towards growth (+0.17°C/year). A positive trend in NDVI and a negative trend in albedo were observed. Correlation analysis revealed the anticipated strong negative correlation between LST and albedo. However, the positive correlations of LST with vegetation indices and the weak relationships with built-up/bare land indices warrant further investigation into spatial patterns. The results of the study are important for assessing the microclimate and supporting urban planning decisions.

Keywords: land surface temperature, spectral indices, time series, correlation, Landsat, Google Earth Engine