

<https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.2.305>

УДК 528.8:004.94:551.521

Оцінювання випромінювальної здатності земної поверхні на основі класифікації Dynamic World для побудови температурних карт

М. С. Лубський,* <https://orcid.org/0000-0002-3545-0007>

І. О. Пестова, <https://orcid.org/0000-0003-2981-7826>

А. Р. Лисенко, <https://orcid.org/0000-0003-2923-8648>

А. В. Хижняк, <https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

Т. А. Орленко, <https://orcid.org/0000-0002-4933-7750>

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, вул. Олесь Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Температура земної поверхні є однією з ключових характеристик, що використовуються для моделювання стану та динаміки розвитку геосистем, особливо в умовах антропогенного навантаження та ландшафтних перетворень. За десятиліття розвитку систем дистанційного зондування Землі на орбіту було виведено низку супутникових сенсорів, призначених для отримання даних температурного картування, зокрема в тепловому інфрачервоному спектральному діапазоні 3–14 мкм. До них належать сенсори MODIS (супутники Terra та Aqua), TM, ETM+ і TIRS (супутники серії Landsat), а також ASTER (супутник Terra).

Особливістю дистанційних досліджень теплового випромінювання, що принципово відрізняє їх від традиційних оптичних досліджень, у межах яких визначаються коефіцієнти спектрального відбиття, є необхідність вимірювання характеристик випроміненого земною поверхнею енергетичного потоку. Це зумовлює додаткову нетривіальну задачу визначення випромінювальної здатності земної поверхні у спектральному діапазоні, що відповідає діапазону реєстрації теплового випромінювання.

Одним з найбільш успішних підходів до визначення випромінювальної здатності земної поверхні є метод TES (Temperature/Emissivity Separation), реалізований для п'ятиканальних даних довгохвильового інфрачервоного діапазону сенсора ASTER. На його основі було створено геопросторовий продукт Global Emissivity Dataset (ASTER GED), який, зокрема, використовується для формування температурних даних за знімками супутників серії Landsat, однак, ASTER GED має суттєві недоліки, які значно обмежують його використання для отримання детальних, точних та актуальних даних розподілу температур. З урахуванням зазначених обмежень ASTER GED у статті запропоновано статистичний підхід до формування зображень просторового розподілу випромінювальної здатності на основі даних оптичного знімання Sentinel-2, використовуючи інформацію про тип земної поверхні, визначеного за результатами класифікації Dynamic World. В роботі запропонована методика отримання актуальних, фізично обґрунтованих та інформативних даних випромінювальної здатності з подальшим використанням разом із даними довгохвильового інфрачервоного випромінювання, отриманими супутниками серії Landsat. Попередня оцінка точності визначення температури свідчить, що приблизно у 90 % випадків відхилення температури, отриманої за оновленою методикою, не перевищує 0,5 °C відносно референтних значень.

Ключові слова: коефіцієнт теплового випромінювання, температура земної поверхні, класифікація земної поверхні, Dynamic World, ASTER GED

© М. С. Лубський, І. О. Пестова, А. Р. Лисенко, А. В. Хижняк, Т. А. Орленко, 2026

Вступ

Можливість визначення температури поверхні за характеристиками теплового випромінювання обґрунтована оберненим законом Планка для «сірого тіла», тобто тіла з незмінною випромінювальною здатністю (Tang and Li, 2014):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon_\lambda c_1}{\lambda^5 L_\lambda} + 1 \right)}, \quad (1)$$

де T – температура земної поверхні; L_λ – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні, ε_λ – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання; c_1 та c_2 – перша і друга константи закону Планка, λ – спектральний діапазон, в якому визначається температура.

Під час оброблення даних космічного знімання земної поверхні випромінювальна здатність земної поверхні інтерпретується як спектральні коефіцієнти

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: M. Lubskey / М. С. Лубський / nickolo1990@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

теплого випромінювання (КТВ), тобто, в кожному пікселі такого зображення міститься значення випромінювальної здатності, що відповідає певному спектральному діапазону теплого випромінювання, за яким надалі визначається температура земної поверхні.

Рівняння (1) в різному вигляді адаптують для використання даних супутникових сенсорних систем (Rozenstein et al., 2014). Зручність цього закону полягає в тому, що він містить лише дві невідомі величини: спектральна густина енергетичної яскравості, яка, власне, визначається сенсорною системою, та випромінювальна здатність земної поверхні. Незалежність випромінювальної здатності тіл від їх спектральних характеристик робить задачу її визначення складною та нетривіальною, а її ігнорування не дає змоги з високою точністю визначити температуру земної поверхні. Додатково ще накладається вимога виконання атмосферної корекції даних спектральної густини енергетичної яскравості (Jiménez-Muñoz et al., 2010), при цьому включення випромінювальної здатності земної поверхні виконується саме на етапі атмосферної корекції (Barsi et al., 2003).

Найбільш поширений продукт випромінювальної здатності, який являє собою набір зображень розподілу спектральних КТВ ASTER GED, використовується для формування температурних зображень за даними Landsat, але має суттєві недоліки (Hu et al., 2023), детально описаних нижче. Додаткова складність визначення випромінювальної здатності земної поверхні впливає з відсутності її залежності від спектральних характеристик об'єктів, саме від їх типу, що дає змогу застосувати дані класифікації земної поверхні для визначення розподілу випромінювальної здатності, зокрема Dynamic World (Brown et al., 2022) представлений на платформі Google Earth Engine (GEE). При цьому класи земної поверхні та їх спектральні характеристики є чітко пов'язаними, що дає змогу сформуванню залежності спектральних характеристик певних класів земної поверхні з їх випромінювальною здатністю. Самі спектральні характеристики можна отримати за даними оптичного знімання Sentinel-2 та Landsat, на основі яких і створено класифікацію Dynamic World.

Таким чином, метою дослідження є розроблення методики отримання статистичної залежності спектральних характеристик земної поверхні, одержаними за оптичними даними від їх випромінювальної здатності, отриманої ASTER GED з подальшим залученням отриманих залежностей для обчислення випромінювальної здатності земної поверхні за даними Sentinel-2. Це дасть змогу нівелювати недоліки ASTER GED та отримувати актуальні та точні розподіли температур за даними Landsat.

Проблема використання ASTER GED для картування поверхневої температури

ASTER GED є п'ятиканальним глобальним продуктом, що містить дані про розподіл КТВ

із просторовою розрізненістю 100 м. Спектральні діапазони відповідають п'яти каналам довгохвильового інфрачервоного діапазону сенсора ASTER (канали 10–14). Цей продукт є статичним, тобто єдиним в часовому вимірі, сформованим із композиту середніх значень випромінювальної здатності за період 2000–2008 рр., отриманих із безхмарних зображень. Також для кожного каналу розрахований розподіл середньоквадратичних відхилень вимірювання випромінювальної здатності. Крім того, ASTER GED використовує маску водної поверхні, для якої встановлюється константне значення КТВ (Hulley et al., 2015). ASTER GED періодично оновлюється із залученням даних MODIS Emissivity з метою виявлення певних ландшафтних змін, зокрема, для врахування динаміки рослинного покриву (NASA, 2020).

ASTER GED на сьогодні є основою для визначення розподілу температури за даними Landsat, вони були адаптовані до спектрального діапазону 10 каналу. Однак, цей продукт має низку фундаментальних недоліків (Рис. 1):

часто через брак даних або хмарність над певною територією в період сканування утворюються великі прогалини;

часто формуються різкі переходи від одного періоду отримання даних до іншого та, відповідно, різкі відмінності КТВ;

великі часові проміжки між оновленнями даних, що може внести некоректності до результуючої температури земної поверхні через невідповідність характеристик поверхні (густина чи наявність рослинності, снігового покриву, певні структурні зміни ландшафтів) між даними КТВ та даними довгохвильового інфрачервоного діапазону;

оновлення розподілу КТВ із залученням даних MODIS впливає лише на рослинний покрив і несуттєво відображає загальні зміни випромінювальної здатності земної поверхні;

ASTER GED – статичний продукт, зібраний із композитів за період 2000–2008 рр., що суттєво обмежує точність визначення температури через неврахування змін, що відбувались в період отримання даних;

отримання даних для ASTER GED припинилось у 2008 році, що також значно обмежує точність визначення температури;

просторова розрізненість у 100 м не дає змоги детально досліджувати ландшафти із високою гетерогенністю.

Оскільки ASTER GED є основою для отримання зображень поверхневої температури за даними Landsat та інтегрований у дуже популярний геопросторовий продукт Landsat Level 2 Collection 2, перспективним підходом до значного підвищення інформативності результуючої температури земної поверхні є заміщення даних про КТВ від ASTER GED. Актуальність задачі підтверджується також тим, що Landsat на сьогодні є єдиним широкодоступним

продуктом температури земної поверхні із просторовою розрізненістю ≈ 100 м.

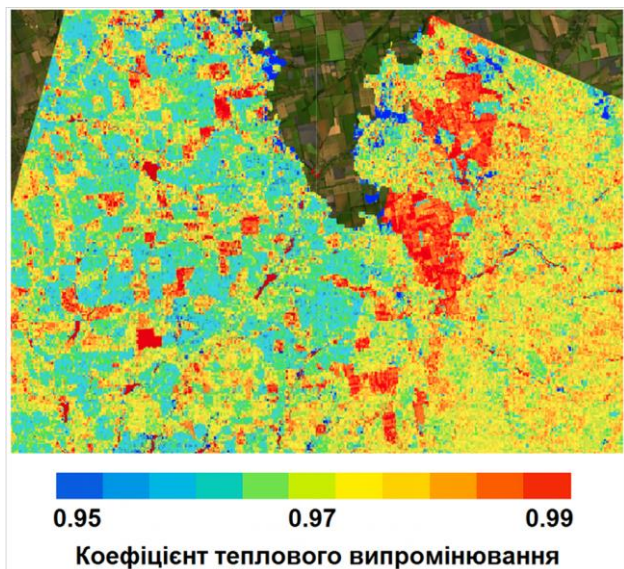


Рис. 1. Зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання за даними ASTER у продукті Landsat Level 2 Collection 2 для території Кривого Рогу: видно великі прогалини через відсутність даних та різкі переходи між даними, отриманими в різні періоди часу

Вдосконалення методики отримання розподілу КТВ земної поверхні

Вдосконалення розробленого методу буде базуватись на комбінуванні статистичного підходу до визначення взаємозв'язку між значеннями КТВ, отриманими із продукту ASTER GED, та різними спектральними індексами, застосованими до різних типів земної поверхні, а типи земної поверхні будуть визначатись за допомогою існуючих геопросторових продуктів класифікації земної поверхні, зокрема, DynamicWorld.

Для визначення функціонального взаємозв'язку КТВ від спектральних індексів необхідно залучити оптичні дані, які за часовими характеристиками відповідають продукту ASTER GED. Для цього було використано усереднений безхмарний композит зображень, отриманих супутниками Landsat-5 та 7 за період 2000–2008 р., що відповідає періоду отримання усередненого продукту ASTER GED. При цьому спектральні діапазони даних ASTER GED мають відповідати спектральному діапазону цільового каналу, за яким буде визначатись температура земної поверхні, для чого необхідно провести інтеграцію даних спектральної чутливості сенсора ASTER для відповідності спектральній чутливості даних Landsat, за якими буде розраховано поверхневу температуру.

Даним каналу 10 сенсора TIRS/TIRS-2 відповідають канали 13 і 14 сенсора ASTER (Рис. 2). Інтегральне обчислення перекриття показало, що канал 10 сенсора TIRS/TIRS-2 перекриває канал 13 сенсора ASTER на 70%, а канал 14 на 36%. Таким чином,

співвідношення перекриття для кожного каналу становить 66% для каналу 13 та сенсора ASTER – 34%.

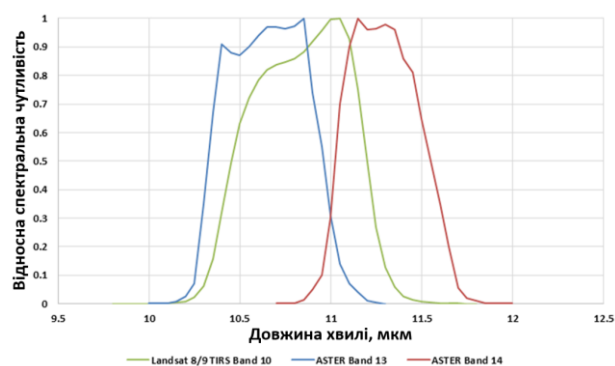


Рис. 2. Функції спектральної чутливості каналу 10 сенсора TIRS/TIRS-2 та каналів 13 і 14 сенсора ASTER

На наступному етапі обчислюється узгоджена з каналом 10 сенсора TIRS/TIRS-2 випромінювальна здатність для сенсора ASTER:

$$\varepsilon_{LS} = \varepsilon_{A13} \cdot 0.66 + \varepsilon_{A14} \cdot 0.34, \quad (2)$$

де ε_{LS} – випромінювальна здатність в спектральному діапазоні каналу 10 сенсора TIRS/TIRS-2; ε_{A13} – випромінювальна здатність в спектральному діапазоні каналу 13 сенсора ASTER; ε_{A14} – випромінювальна здатність в спектральному діапазоні каналу 14 сенсора ASTER.

Отримання функцій залежності КТВ від спектральних характеристик земної поверхні

Етап отримання функцій залежності КТВ від спектральних характеристик земної поверхні, який залучає усереднений композит оптичних даних Landsat за період 2000–2008 рр. для статистичного визначення залежності оптичних характеристик земної поверхні від їх випромінювальної здатності, отриманої на основі архівних даних ASTER GED, що був отриманий також за період 2000–2008 рр. Він складається з підетапів:

Крок 1. Визначення базових класів, які можуть бути отримані за класифікацією Dynamic World.

Як класифікацію земної поверхні обрано геопросторовий продукт Dynamic World (Brown et al., 2022). Dynamic World – це глобальний продукт класифікації покриву земної поверхні з високою просторовою розрізненістю (10 м), розроблений у співпраці між Google Earth Engine та World Resources Institute (WRI). Дані створюються на основі супутникових знімків Sentinel-2 MSI місії Copernicus та публікуються як відкритий набір у сервісі Google Earth Engine https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/GOOGLE_DYNAMICWORLD_V1.

Кожен піксел даних DynamicWorld має дев'ять значень, що відповідають імовірності належності до кожного з класів (у діапазоні 0–1). Такий підхід дає змогу інтерпретувати продукт як спектрально змішане зображення, де значення в каналах відображають ступінь присутності кожного типу покриву, а не лише

категорійну належність. Часова розрізненість продукту динамічна і відповідає частоті спостережень Sentinel-2 (зазвичай 2–5 днів для середніх широт). Це забезпечує практично оперативне оновлення класифікації земної поверхні.

Продукт надає ймовірнісну класифікацію для дев'яти категорій покриття земної поверхні: Water (Вода), Trees (Деревна рослинність), Grass (Трав'яна рослинність), Flooded vegetation (Підтоплена рослинність), Crops (Сільськогосподарські культури), Shrub and scrub (Чагарники), Built area (Забудовані території), Bare ground (Відкритий ґрунт), Snow and ice (Сніг та лід).

Виконується оптимізація цієї класифікації, що включає видалення зайвих класів та об'єднання схожих за властивостями класів. Так, з дев'яти класів було видалено клас Сніг та лід та виконано об'єднання класів: Трав'яна рослинність, Підтоплена рослинність, Сільськогосподарські культури, Чагарники в один клас Трав'яна рослинність. Таким чином, отримано 5 класів: Водна поверхня, Деревна рослинність, Трав'яна рослинність, Забудовані території, Відкриті ґрунти.

Крок 2. Відбір репрезентативної характеристики кожного класу, заснованої на її спектральних сигнатурах, отриманих за даними оптичного знімання.

Для класу Водна поверхня така характеристика не обиралася, оскільки значення КТВ для води обрано константою 0.988.

Для класу Трав'яна рослинність репрезентативною характеристикою обрано індекс NDVI (Valor and Caselles, 1996).

Для класу Деревна рослинність обрано індекс листкової поверхні, обчислений із його залежності від індексу NDVI (Pontailleur et al., 2003):

$$LAI = -1.323 \cdot \ln((0.88 - NDVI) / 0.714), \quad (3)$$

де LAI – індекс листкової поверхні; $NDVI$ – нормалізований диференційований вегетаційний індекс.

Для класу відкритих ґрунтів обрано індикатор альbedo з методики зваженого накопичення значень спектрального відбиття Tasseled Cap (Gottuk et al., 2025):

$$B1 \cdot 0.3443 + B2 \cdot 0.4057 + B3 \cdot 0.4667 + B4 \cdot 0.5347 + B5 \cdot 0.3936 + B6 \cdot 0.2412, \quad (4)$$

де $B1$ – значення спектрального відбиття у синьому каналі; $B2$ – значення спектрального відбиття у зеленому каналі; $B3$ – значення спектрального відбиття у червоному каналі; $B4$ – значення спектрального відбиття у ближньому інфрачервоному каналі; $B5$ – значення спектрального відбиття у першому короткохвильовому інфрачервоному каналі (спектральний діапазон $\approx 1,6$ мкм); $B6$ – значення спектрального відбиття у другому короткохвильовому інфрачервоному каналі (спектральний діапазон $\approx 2,2$ мкм).

Вказані спектральні діапазони відповідають каналам даних супутників Landsat-5 та 7, які будуть

використані при обчисленні розподілів репрезентативних характеристик.

Для класу забудованих територій як репрезентативну характеристику обрано відношення Band Ratio for Built-up Area (BRBA) (Waqar et al. 2012) виду

$$BRBA = RED / SWIR1, \quad (5)$$

де RED – значення спектрального відбиття у червоному каналі; $SWIR1$ – значення спектрального відбиття у першому короткохвильовому інфрачервоному каналі (спектральний діапазон $\approx 1,6$ мкм).

Крок 3. Формування усередненого композитного оптичного зображення на основі даних Landsat-5 та 7, яке відповідає періоду отримання даних для продукту ASTER GED, тобто за період 2000–2008 рр. Для цієї задачі підготовлений аналогічний продукт, який складається із усередненого зображення даних Landsat-4, 5 та 7, отриманих за період 2000–2008 рр., за винятком хмарних областей. У композит включуються всі канали, необхідні для визначення репрезентативних характеристик земної поверхні. Зображення фільтруються за вмістом хмар на зображенні з використанням побітової маски якості зображення 'QA_PIXEL' для виключення пікселів із хмарністю та тінями від хмар. Вплив імовірного снігового покриття із зимових зображень нівелюється високою концентрацією хмарності в зимовий період і, відповідно, виключенням таких зображень. Хоча поодинокі зображення із сніговим покривом можуть впливати на усереднений спектр земної поверхні, цього вимагає необхідність формування обох продуктів (усередненого багатоспектрального зображення та розподілу випромінювальної здатності) в однакових умовах. Приклад розподілу класів на композиті даних Landsat зображено на Рис. 3.



Рис. 3. Приклади відображення елементів репрезентативних класів на композиті даних Landsat

Крок 4. Інтегральне формування розподілу КТВ із продукту ASTER GED на основі спектральних діапазонів, що відповідають спектральному діапазону каналу Landsat, за яким буде визначатися поверхнева

температура (узгодження функцій спектральної чутливості) з використанням функції (2).

Крок 5. Злиття даних, отриманих на кроках 3 та 4 та визначення статистичної залежності КТВ кожного з базових класів за даними ASTER GED та їх репрезентативних характеристик за даними Landsat. Дає змогу оцінити середні значення КТВ та значення репрезентативної характеристики кожного класу для однієї території. Для цього використовуються прямокутні полігони, які охоплюють територію від 3x3 до 8x8 пікселів зображення Landsat, в межах яких визначається середнє значення репрезентативної характеристики відповідного типу земної поверхні, що відповідають відібраним класам, КТВ та значення їх середньоквадратичного відхилення (СКВ) у межах полігона. СКВ випромінювальної здатності не має перевищувати цільове значення, яке становить 0,01, що є оцінкою абсолютної похибки визначення випромінювальної здатності продукту ASTER GED (Hulley et al., 2015), а для репрезентативної характеристики визначається індивідуально. Операції виконуються у середовищі Google Earth Engine (Рис. 4).



Рис. 4. Приклад визначення залежності середнього значення LAI для ділянки лісу та її КТВ в середовищі Google Earth Engine і контроль значень СКВ для розподілу

Крок 6. Збір статистики співвідношень значень репрезентативної характеристики та її значення КТВ та отримання їх функціональних залежностей.

Для трав'яної рослинності накопичено значення залежності випромінювальної здатності від значення NDVI із 49 полігонів, СКВ для NDVI < 0,02. Отримано функціональну залежність вигляду (Рис. 5):

$$\varepsilon_{Grass} = 0.0228 \cdot NDVI + 0.9597; R^2 = 0.466, \quad (6)$$

де ε_{Grass} – випромінювальна здатність трав'яної рослинності; R^2 – коефіцієнт детермінації.

Для деревної рослинності накопичено значення залежності випромінювальної здатності від значення LAI (етап 2.4) із 49 полігонів (Рис. 6), СКВ для LAI < 0,2. Отримано функціональну залежність вигляду (Рис. 6):

$$\varepsilon_{Forest} = 0.0014 \cdot LAI + 0.9743; R^2 = 0.382, \quad (7)$$

де ε_{Forest} – випромінювальна здатність деревної рослинності, R^2 – коефіцієнт детермінації.

Для ґрунтового покриву накопичено значення залежності випромінювальної здатності від значення альbedo з 38 полігонів, СКВ для альbedo < 0,05. Отримано функціональну залежність вигляду (Рис. 7):

$$\varepsilon_{Soil} = -0.3291 \cdot A^3 + 0.6397 \cdot A^2 - 0.4148 \cdot A + 1.0488; R^2 = 0.752, \quad (8)$$

де ε_{Soil} – випромінювальна здатність ґрунтового покриву; A – альbedo ґрунтового покриву; R^2 – коефіцієнт детермінації.

Для забудованих територій та штучних поверхонь накопичено значення залежності випромінювальної здатності від значення індексу BRBA з 50 полігонів, СКВ для індексу BRBA < 0,02. Отримано функціональну залежність вигляду (Рис. 8):

$$\varepsilon_{Built} = -0.03 \cdot BRBA + 0.9844; R^2 = 0.69, \quad (9)$$

де ε_{Built} – випромінювальна здатність забудованої території та штучних поверхонь; $BRBA$ – індекс BRBA; R^2 – коефіцієнт детермінації.

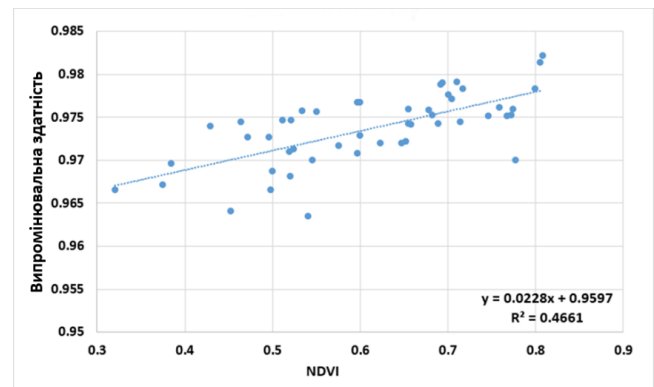


Рис. 5. Функціональна залежність випромінювальної здатності трав'яної рослинності від її значення NDVI

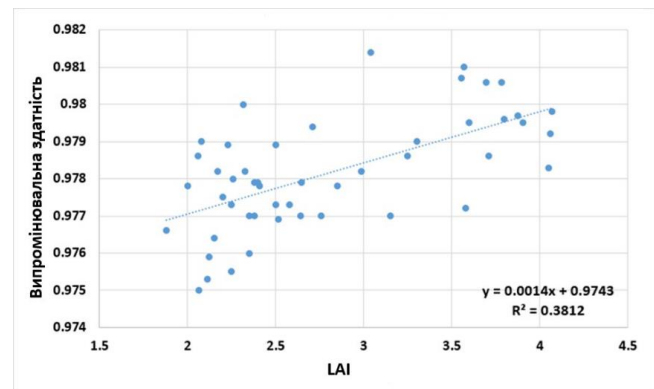


Рис. 6. Функціональна залежність випромінювальної здатності деревної рослинності від значення LAI

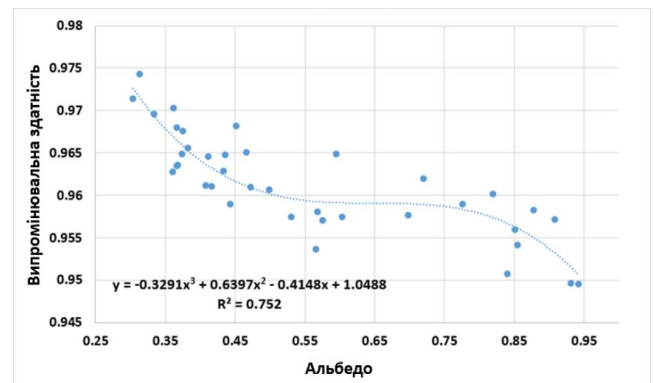


Рис. 7. Функціональна залежність випромінювальної здатності ґрунтового покриву від значення альbedo

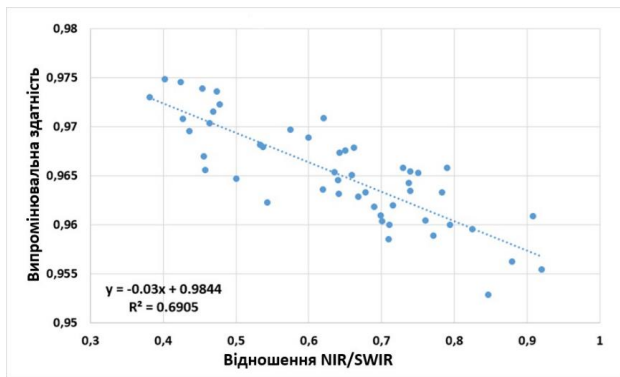


Рис. 8. Функціональна залежність випромінювальної здатності штучних поверхонь від значення індексу BRBA

Етап отримання розподілів КТВ

Етап отримання розподілів КТВ передбачає безпосереднє отримання розподілу КТВ із застосуванням функцій (6)–(9) для зображення Sentinel-2 для визначення температури за певну дату, в яку було отримано дані теплового випромінювання Landsat:

1) отримання розподілів репрезентативних характеристик на основі оптичних даних Sentinel-2 за дату, яка є близькою до дати, за яку планується отримати цільове зображення розподілу поверхневої температури (вважається нормою відхилення між датами отримання даних Sentinel-2 та Landsat не більше, ніж місяць);

2) формування розподілу КТВ для кожного з базових класів за оптичними даними Sentinel-2 із застосуванням функцій (6)–(9);

3) використання розподілу ймовірностей класів Dynamic World та інтеграція в них розподілів КТВ для кожного окремого класу в єдине зображення КТВ:

$$\epsilon_S = 0.988 \cdot P_{Water} + \epsilon_{Grass} \cdot P_{Grass} + \epsilon_{Forest} \cdot P_{Forest} + \epsilon_{Grass} \cdot P_{Grass} + \epsilon_{Soil} \cdot P_{Soil} + \epsilon_{Built} \cdot P_{Built}, \quad (10)$$

де ϵ_S – випромінювальна здатність земної поверхні; P_{Water} – імовірність класу Водна поверхня із даних; P_{Grass} – імовірність класу Трав'яна рослинність; P_{Forest} – імовірність класу Деревна рослинність; P_{Soil} – імовірність класу Ґрунтовий покрив; P_{built} – імовірність класу Штучні поверхні.

Отриманий розподіл КТВ далі використовується для обчислення розподілу поверхневої температури, основою для обчислення якої є геоінформаційний продукт Landsat Level 2 Collection 2 в каталозі даних Earth Engine та отриманий розподіл КТВ з даними Sentinel-2. Для цього спочатку виконується атмосферна корекція (Barsi, 2003):

$$L_\lambda = \tau_\lambda \left[\epsilon_\lambda L_{up\lambda} + (1 - \epsilon_\lambda) L_\lambda^\downarrow \right] + L_\lambda^\uparrow, \quad (10)$$

де L_λ – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні; $L_{up\lambda}$ – спектральна густина енергетичної яскравості верхньої межі атмосфери; L_λ^\uparrow – спектральна густина енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку

сенсора; L_λ^\downarrow – спектральна густина енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі; τ_λ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; ϵ_λ – спектральний КТВ.

Далі отримані дані L_λ використовуються для одержання температури за адаптованою до даних Landsat формули (1) вигляду:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (11)$$

де T – температура досліджуваної поверхні (K).

Значення констант K_1 і K_2 для всіх інфрачервоних сенсорів супутників серії Landsat наведено в Табл. 1 (Chander et al., 2009).

Таблиця 1. Константи для розрахунку температури сенсорів супутників серії Landsat

	Landsat TM (band 6)	Landsat ETM+ (band 6-1)	Landsat TIRS (band 10)	Landsat TIRS (band 11)
K_1	607,76	666,09	774,89	480,89
K_2	1260,56	1282,71	1321,08	1201,14

Ця методика реалізована на платформі хмарного оброблення даних космічного знімання Earth Engine, оскільки каталог даних цієї платформи містить усі необхідні дані для реалізації, а вбудовані функції та алгоритми дають змоги повністю реалізувати методику. При цьому доступ до даних та оброблення повністю відбуваються в хмарному середовищі, тобто не потребують завантаження даних та не залежать від обчислювальної потужності комп'ютерних систем, з яких виконується оброблення.

Програмний код скрипту для оцінювання статистичної залежності випромінювальної здатності земної поверхні за даними ASTER GED, адаптованої до 10 каналу даних супутника Landsat: <https://code.earthengine.google.com/2ed7586187cf0203f2fe54f229fc5d01>, у середовищі Google Earth Engine.

Програмний код скрипту для обчислення поверхневої температури за вдосконаленою методикою: <https://code.earthengine.google.com/b34263ee67c1d13d98e969eaa930a271>, з використанням засобів Google Earth Engine.

Оцінка точності та підвищення просторової розрізненості

Для оцінювання точності визначення температури земної поверхні визначено співвідношення значень температур за базовим продуктом Landsat та температур, отриманих за розробленою методикою. Для цього взято чотири зображення Landsat для отримання спектральної густини енергетичної яскравості для оцінювання температури, та зображення для отримання розподілу випромінювальної здатності для території Києва. Оцінювались значення

температур за базовим продуктом і з даних, отриманих за вдосконаленою методикою на 20 точках для кожного з п'яти класів на об'єктах і територіях, по 5 точок для кожного класу на кожен дослідну дату, що покривають площу більшу за 4 піксели базового температурного продукту, щоб нівелювати вплив підвищення розрізненості на результат.

Оцінка розбіжності значень температур показала, що лише в 9 точках вона становить більше 1 К, найнижче середнє відхилення для класу лісів – 0.3865 К, найвища – для штучних поверхонь – 0.658 К. Для водної поверхні середнє відхилення становило 0.5565 К, для трав'яної рослинності – 0.463 К, для ґрунтового покриву – 0.604 К.

Ця методика значно вдосконалює попередню методику, розроблену в ході виконання науково-дослідної роботи «Розробка нових методів обробки та аналізу супутникових зображень в інтересах вирішення задач сталого розвитку і раціонального природокористування», яка базувалась на пороговому обмеженні статистичних залежностей і використовувала розділення лише на три базових класи без врахування імовірностей класів. Вона є більш точною також завдяки врахуванню типу земної поверхні, який отримується із класифікації Dynamic World. Її головною перевагою, окрім актуалізації даних розподілу КТВ, є значне підвищення деталізації як самих розподілів КТВ (Рис. 9), так і результуючих температурних зображень (Рис. 10).

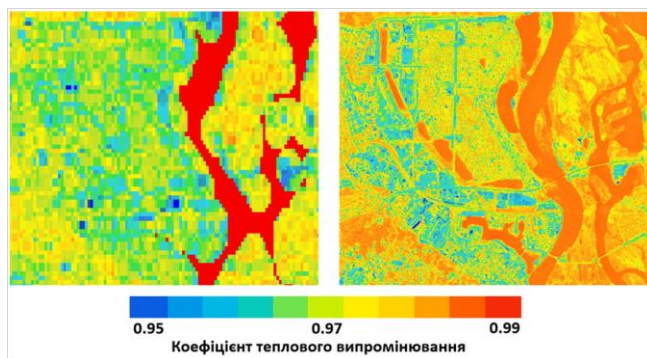


Рис. 9. Порівняння деталізації базового розподілу випромінювальної здатності земної поверхні за даними ASTER GED (ліворуч) та отриманого за даними Sentinel-2 (праворуч)

Розроблена методика оцінювання випромінювальної здатності земної поверхні на основі класифікації земної поверхні Dynamic World надає нові можливості для екологічних досліджень і моніторингу стану гетерогенних систем. Температура земної поверхні є одним із основних абіотичних факторів впливу на екологічний стан довкілля. Просторово-часові температурні аномалії безпосередньо пов'язані з деградацією рослинного покриву, посиленням забруднення урбосистем поллютантами, ущільненням житлової забудови, змінами гідрологічного режиму та формуванням теплових островів. У сукупності ці процеси призводять до порушення енергетичного балансу ландшафтів, зниження екосистемних послуг та

зростання екологічних ризиків в умовах кліматичних змін.

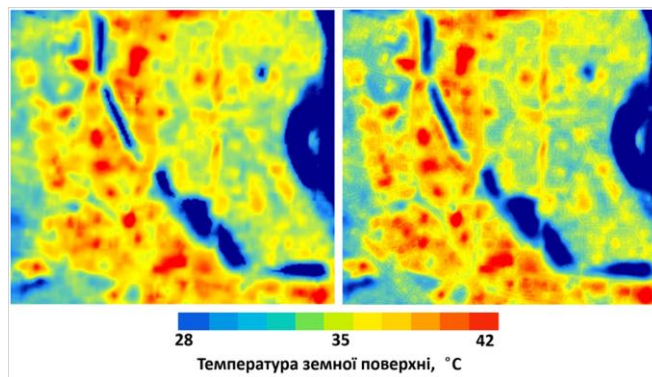


Рис. 10. Порівняння деталізації базової температури земної поверхні на основі зображення Landsat-8 від 30 серпня 2025 року (ліворуч) та отриманої за вдосконаленою методикою (праворуч) на прикладі північної частини правобережжя Києва

Застосування запропонованого підходу дає змогу отримувати просторово детальні та актуальні дані про температурні поля, придатні для ідентифікації зон підвищеного теплового навантаження та екологічного стресу. Ця проблема є особливо актуальною для територій, які мають високу просторову неоднорідність земного покриву, інтенсивне антропогенне навантаження, урбанізацію, деградацію ґрунтів і водних екосистем. Інтеграція даних про випромінювальні здатності земної поверхні з результатами класифікації земної поверхні Dynamic World дає змогу не тільки підвищити актуалізацію та деталізацію даних, а й інтерпретувати температурні аномалії у зв'язку з конкретними типами покриву, а не розглядати їх як ізольований параметр. Тому з'являється можливість аналізувати вплив різних типів землекористування на тепловий режим територій, оцінювати ефективність зелених насаджень при зниженні температури поверхні, а також виявляти ділянки із потенційно несприятливими екологічними умовами.

У практичному значенні результати, викладені у статті, отримані за розробленою методикою, можна використати для моніторингу теплових островів міських територій, оцінювання стану рослинного та ґрунтового покриву, аналізу змін у прибережних і водних екосистемах. Оперативне отримання актуальних температурних оцінок особливо важливо для моніторингу швидких змін, спричинених антропогенним впливом або екстремальними погодними явищами.

Подальші дослідження потрібно спрямувати на оцінювання точності розробленої методики та уточнення отриманих функціональних залежностей випромінювальної здатності земної поверхні від репрезентативних характеристик класів земної поверхні.

Висновки

Описана методика отримання розподілу КТВ земної поверхні є результатом подальшого вдосконалення методики (Lubskiy et al., 2025), яка базувалася на застосуванні взаємозв'язку КТВ з вегетаційними індексами. Ключовим вдосконаленням є включення в модель отримання КТВ класифікації земної поверхні DynamicWorld, яка дає змогу нівелювати головну невизначеність методики – тип земної поверхні. При цьому тип земної поверхні визначається за даними із просторовою розрізненістю значно вищою за базові дані ASTER GED – 10 м за рахунок використання як для класифікації DynamicWorld, так і КТВ даних Sentinel-2.

Таким чином, заміщення даних ASTER GED результатами оброблення даних за описаною методикою дає змогу нівелювати всі їх недоліки, однак, при цьому дані ASTER GED дають можливість статистично визначити залежність КТВ від інших параметрів земної поверхні, завдяки чому вони не втрачають актуальності й сьогодні. Точність визначення температури, що в 9 точках із 100, відмінність температури між базовими даними Landsat та результатами, отриманими за розробленою методикою, становить більше 1 К. Однак, методика потребує більш якісного оцінювання точності, зокрема виконання підсупутникових вимірювань температури земної поверхні в ході подальших досліджень.

Отримана методика стане надзвичайно корисною під час дослідження та моніторингу теплових островів міських агломерацій за рахунок значного підвищення просторової розрізненості результуючих температурних даних та можливості постійної актуалізації температурних даних для виконання моніторингу.

Внесок авторів: Концептуалізація – М. С. Лубський та А. В. Хижняк; методологія – М. С. Лубський; формальний аналіз та оброблення даних – А. Р. Лисенко та Т. А. Орленко; дослідження – М. С. Лубський, А. Р. Лисенко та Т. А. Орленко; підготовка тексту статті – Пестова І. О.; рецензування та редагування – Пестова І. О. та М. С. Лубський. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.
Фінансування: Описана методика розроблена в рамках виконання НДР «Розробка та вдосконалення методів обробки даних дистанційного зондування для геопросторового моделювання при вирішенні задач раціонального природокористування», державний реєстраційний номер 0124U000360.

Розкриття інформації про ШІ: при формуванні тексту статті використовувалась мовна модель GPT-4 для коригування назви публікації, систематизації її плану та для пошуку і корегування граматичних, пунктуаційних, синтаксичних помилок.

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні Національній академії наук України за підтримку цього дослідження. Ми також вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Author Contributions: Conceptualization – M. Lubskiy and A. Khyzhniak; Methodology – M. Lubskiy; Formal Analysis and Data Processing – A. Lysenko and T. Orlenko; Investigation – M. Lubskiy, A. Lysenko and T. Orlenko; Writing – Original Draft Preparation – I. Piestova; Writing – Review & Editing – M. Lubskiy and I. Piestova. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Described technique is developed under the research Development and improvement of remote sensing data processing methods for geospatial modeling in solving problems of rational environmental management, governmental registration number 0124U000360.

Disclosure of AI use: The GPT-4 language model was employed to improve the title, systematize the outline, and proofread the text for grammatical, punctuation, and syntactic accuracy.

Data Availability Statement: Data available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments: The authors are grateful to the National Academy of Sciences of Ukraine for supporting this research. We are also grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Література / References

- Barsi, J. A., Barker, J. L., Schott J. R. (2003). An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-sensing instrument. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS'03): Proceedings of the International conference (Toulouse, France, 21–25 July)*. *IEEE*, 3014–3016. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294665.
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B. et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9, 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007.
- Hu, T., Hulley, G. C., Mallick, K., Szantoi, Z., Hook, S. (2023). Comparison between the ASTER and ECOSTRESS global emissivity datasets. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103227. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103227.
- Hulley, G. C., Hook, S. J., Abbott, E., Malakar, N., Islam, T., Abrams, M. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial scale. (2015). *Geophysical Research Letters*, 42, 7966–7976. DOI: 10.1002/2015GL065564.
- Gottuk, J., Stuenzi, S. M., Runge, A., Boike, J. (2025). Assessing midsummer snow-free land surface albedo variability across multiple Arctic sites using the Harmonized Landsat and Sentinel-2 product. *Science of Remote Sensing*, 12, 100283. DOI: 10.1016/j.srs.2025.100283.
- Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A.; Mattar, C.; Franch, B. (2010). Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2195–2210. DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.022.
- Lubskiy, M., Khyzhniak, A., Piestova, I., Orlenko, T. (2025). Land surface emissivity estimation technique based on NDVI/ASTER GED data correlation. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and*

- Ecological Condition of the Environment*. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510040.
- NASA LP DAAC. (2020). ASTER Global Emissivity Dataset (GED): User Guide Version 3. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, SD. URL: https://lpdaac.usgs.gov/documents/120/ASTERGED_User_Guide_V3.pdf.
- Pontailier, J.-Y., Hymus, G. J., Drake, B. G. (2003). Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(3), 381–387. DOI: 10.5589/m03-009.
- Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., Karnieli, A. (2014). Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. *Sensors*, 14(4), 5768–5780. DOI: 10.3390/s140405768.
- Tang, H., Li, Z.-L. (2014). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications*. Berlin: Springer-Verlag. 281 p. ISBN 978-3-642-42026-9.
- Valor, E., Caselles, V. (1996). Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167–184. DOI: 10.1016/0034-4257(96)00039-9.
- Waqar, M. M., Mirza, J. F., Mumtaz, R., Hussain, E. (2012). Development of New Indices for Extraction of Built-Up Area & Bare Soil from Landsat Data. *Open Access Scientific Reports*, 1, 136. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/scientificreports.136>.

LAND SURFACE EMISSIVITY ASSESSMENT FOR TEMPERATURE MAPPING USING DYNAMIC WORLD CLASSIFICATION

Lubskiy M. S., <https://orcid.org/0000-0002-3545-0007>

Piestova I. O., <https://orcid.org/0000-0003-2981-7826>

Lysenko A. R., <https://orcid.org/0000-0003-2923-8648>

Khyzhniak A. V., <https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

Orlenko T. A., <https://orcid.org/0000-0002-4933-7750>

State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Olesia Honchara str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

The temperature of the Earth's surface is one of the key characteristics used in modeling the state and dynamics of geosystem development, especially under anthropogenic load and landscape transformations. Over the decades of development of Earth remote sensing systems, a number of satellite sensors have been launched into orbit to obtain temperature mapping data, in particular in the thermal infrared spectral range of 3–14 μm . These include MODIS sensors (Terra and Aqua satellites), TM, ETM+, and TIRS (Landsat series satellites), as well as ASTER (Terra satellite).

A feature of remote thermal radiation studies, which fundamentally distinguishes them from traditional optical studies, within which spectral reflectance coefficients are determined, is the need to measure the characteristics of the energy flux radiated by the Earth's surface. This creates an additional non-trivial task: determining the emissivity of Earth's surface in the spectral range corresponding to the range of thermal radiation registration.

One of the most successful approaches to determining the emissivity of the Earth's surface is the TES (Temperature/Emissivity Separation) method, applied to five-channel data in the long-wave infrared range from the ASTER sensor. On this basis, the geospatial product Global Emissivity Dataset (ASTER GED) was created, which, in particular, is used to generate temperature data from images of Landsat satellites; however, ASTER GED has a number of significant shortcomings that significantly limit its use for obtaining detailed, accurate, and up-to-date temperature distribution data. Taking into account the above-mentioned limitations of ASTER GED, the article proposes a statistical approach to generating images of the spatial distribution of emissivity based on Sentinel-2 optical imagery, using information on the type of the earth's surface derived from the Dynamic World classification. The paper proposes a methodology for obtaining up-to-date, physically justified, and informative emissivity data for subsequent use, together with long-wave infrared radiation data from Landsat satellites. A preliminary assessment of temperature determination accuracy showed that in approximately 90% of cases, the deviation of the temperature obtained using the updated method does not exceed 0.5 $^{\circ}\text{C}$ relative to the reference values.

Keywords: land surface emissivity, land surface temperature, land cover classification, Dynamic World, ASTER GED.

Рукопис статті отримано 23.03.2026

Надходження остаточної версії: 03.05.2026

Публікація статті: 29.05.2026

Received 23.03.2026

Revised 03.05.2026

Accepted 29.05.2026