

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему:

Геоінформаційний моніторинг теплових островів міських територій

Косенко Іван Тарасович

Київ – 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

проф., д.т.н.

Юрій КАРПІНСЬКИЙ

“3” грудня 2025 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Геоінформаційний моніторинг теплових островів міських територій

Виконав студент групи ГСТм-24
193 «Геодезія та землеустрій»
Геоінформаційні системи і технології
Косенко Іван Тарасович

Керівник: Плющ Т. М.
старший викладач
Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

доцент., к.т.н. Нестерненко О. В.

“3” грудня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Косенко Іван Тарасович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Геоінформаційний моніторинг теплових островів міських територій

затверджена наказом ректора КНУБА № 1844/22/25 від «31» жовтня 2025 року

2. Керівник роботи Плющ Тетяна Миколаївна, старший викладач
(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту: «4» грудня 2025 р.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Розділ 1. Дослідження предметної сфери.

Розділ 2. Методичні засади здійснення геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій.

Розділ 3. Дослідна реалізація геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій та його результати

5.Графічний матеріал за розділами

Р. 1. -

Р. 2. -

Р. 3. Тематичні карти інтенсивності УНІ Донецької області з 2011 по 2025 рр.

6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)
Розділ 1. Дослідження предметної сфери. Визначення міських теплових островів, основні елементи та індекси. Стан і тенденції розвитку. Досвід реалізації у світі. Огляд наукових досліджень. Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу міських теплових островів в Україні.	27.10.2025
Розділ 2. Методичні засади здійснення геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій. Обґрунтування обраних методів дослідження та програмного забезпечення. Концептуальна та функціональна модель геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій.	10.11.2025
Розділ 3. Дослідна реалізація геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій та його результати. Розроблення методики. Практична реалізація алгоритму. Аналіз отриманих результатів. Оцінка можливості використання методики.	27.11.2025
Остаточне оформлення роботи	02.12.2025
Попередній захист роботи на кафедрі	04.12.2025
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	08.12.2025

7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			

8. Дата видачі завдання _____

Зав. кафедри _____ Юрій КАРПІНСЬКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Тетяна ПЛЮЦ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ Іван КОСЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary) <i>До атестаційної випускної роботи студента:</i>		Косенко Іван Тарасович	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Геоінформаційний моніторинг теплових островів міських територій		
<i>Освітній ступінь</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики і фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія і землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи та технології		
<i>Керівник</i>	Плющ Тетяна Миколаївна, старший викладач		
<i>Обсяг роботи:</i>	<i>Пояснювальна записка, стор.</i>	<i>Розділів</i>	<i>Графічних матеріалів</i>
	86	3	5
<i>Розділ 1</i>	<p>Проведено дослідження предметної сфери міських теплових островів: визначено базові поняття (UHI, SUHI, LST), описано ключові чинники формування теплових аномалій та основні індекси для їх оцінювання. Проаналізовано світові тенденції, практичні приклади пом'якшення UHI та узагальнено сучасні наукові підходи й прогалини у дослідженнях. Розділ сформував теоретичне підґрунтя для подальшої розробки методики геоінформаційного моніторингу.</p>		
<i>Розділ 2</i>	<p>Обґрунтовано вибір методів та джерел даних для здійснення геоінформаційного моніторингу міських теплових островів на території Донецької області. Основу методики становить інтегроване використання супутникових даних Landsat, MODIS та інструментів Google Earth Engine, що забезпечують багатоспектральний аналіз, розрахунок LST та просторову класифікацію поверхонь. Детально описано етапи підготовки даних, обчислення індексів, картографування SUHI та статистичну оцінку просторових температурних закономірностей. Також наведено обмеження методу, пов'язані з хмарністю, часовою дискретністю та різною просторовою роздільною здатністю супутникових систем.</p>		

<p><i>Розділ 3</i></p>	<p>У ході дослідної реалізації методики було виконано повний цикл геоінформаційного аналізу теплових островів міських територій на основі супутникових даних MODIS у середовищі Google Earth Engine. Отримані медіанні LST-зображення для 2011, 2014, 2020, 2022 та 2025 років дозволили оцінити просторово-часову динаміку нагріву урбанізованих територій та виявити найбільш стабільні зони підвищеної температури. Розрахований індекс UHI та його класифікація показали суттєве збільшення площ інтенсивних теплових аномалій у найбільших містах області, зокрема у Донецьку, Маріуполі та Горлівці. Аналіз багаторічних показників продемонстрував тенденцію до загального росту температур та посилення теплових островів, а також локальні аномалії, пов'язані з наслідками бойових дій. Отримані результати підтверджують ефективність розробленої методики та її придатність для подальшого моніторингу, просторового планування й оцінки впливу урбанізації на мікроклімат.</p>
<p><i>Висновки по роботі:</i></p>	<p>Розроблено методику геоінформаційного моніторингу міських теплових островів, що поєднує супутникові дані та інструменти Google Earth Engine. Проведений аналіз дозволив виявити просторово-часові закономірності формування UHI у Донецькій області та визначити зони підвищеної теплової інтенсивності. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу і можуть бути використані для подальшого моніторингу та підтримки рішень у сфері міського планування.</p>
<p>Ключові слова : MODIS, Landsat, UHI, SUHI, GEE, Google Earth Engine, LST, Дистанційне зондування Землі, Донецьк, Російсько-українська війна Keywords: MODIS, Landsat, UHI, SUHI, GEE, Google Earth Engine, LST, Remote sensing, Donetsk, Russo-Ukrainian war</p>	

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ	13
1.1 Визначення міських теплових островів, основні елементи та індекси	14
1.2 Стан і тенденції розвитку. Досвід реалізації у світі.	16
1.3 Огляд наукових досліджень	19
1.4 Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу міських теплових островів в Україні	22
2 МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ЗДІЙСНЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВИХ ОСТРОВІВ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ	26
2.1 Обґрунтування обраних методів дослідження та програмного забезпечення	27
2.2 Концептуальна та функціональна модель геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій	35
3 ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВИХ ОСТРОВІВ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ТА ЙОГО РЕЗУЛЬТАТИ	39
3.1 Розроблення методики	40
3.2 Практична реалізація алгоритму	47
3.3 Аналіз отриманих результатів	66
3.4 Оцінка можливості використання методики	81
ВИСНОВОК	84
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	87
ДОДАТКИ	94

ВСТУП

У сучасному світі процеси урбанізації, інтенсивного будівництва, перетворення поверхні землі - коли температура поверхні або повітря в межах міста істотно вища, ніж у навколишній менш забудованій зоні.

Такі підвищені температури створюють ряд небажаних наслідків: підвищене споживання енергії на охолодження, погіршення комфорту мешканців, загострення теплового стресу, зростання ризиків для здоров'я, зменшення ефективності зеленої інфраструктури, зміна мікрохімії та гідрології міської поверхні. Наприклад, всюдисуша забудова з імпермеабельними поверхнями, низький рівень озеленення та активне випромінювання тепла вночі створюють умови для тривалого нагрівання міських територій.

Водночас розвиток дистанційного зондування Землі (далі - ДЗЗ), теплової інфрачервоної зйомки, а також геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє системно, оперативно і на великій території здійснювати моніторинг температурної поведінки міських ландшафтів. Останні дослідження вказують на те, що показники температури поверхні землі (Land Surface Temperature, LST), які можуть бути отримані з супутникових даних, корелюють із факторами забудови, зелених зон і можуть виступати важливими індикаторами міського теплового навантаження.

Отже, тема геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій є не просто актуальною, а дедалі більш необхідною в контексті сталого розвитку міст, адаптації до змін клімату, удосконалення містобудівної політики та підвищення життєвих стандартів мешканців.

Метою даної магістерської роботи є розробка методики та здійснення геоінформаційного моніторингу теплових островів обраної міської території з використанням даних ДЗЗ та ГІС-інструментів для оцінки просторово-часової динаміки температурної поведінки, а також надання рекомендацій для міського планування з урахуванням отриманих результатів.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішити такі завдання:

- Провести огляд теоретичних засад феномена міського теплового острова: його природи, чинників виникнення, впливів на міське середовище;
- Проаналізувати сучасні методи моніторингу теплових островів із використанням ДЗЗ та ГІС-технологій (включно з визначенням LST, індексів зелених зон, імпермеабельних поверхонь);
- Вибрати і описати джерела даних (супутникові знімки, аерофотозйомка, метеостанції), здійснити їх попередню обробку: атмосферна корекція, маскування хмар, побудова карт температури поверхні;
- Реалізувати ГІС-аналіз для обраної міської території: побудувати карту температурної поверхні (LST), просторово оцінити зони нагріву (теплові острови), проаналізувати зміну цих зон у часовому розрізі за останні 14 років;
- Виконати кількісний аналіз взаємозв'язку між температурою поверхні, забудовою, покриттям зелених зон та іншими факторними показниками, визначити «гарячі» зони та потенціал їх корекції.

Об'єкт дослідження: урбанізовані території Донецької області.

Предмет дослідження: зміна міських теплових островів на урбанізованих територіях Донецької області з 2011 по 2025 роки.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції високоточних супутникових даних, сучасних алгоритмів розрахунку температури поверхні та геоінформаційного аналізу з акцентом на міські теплові острови в обраній території, що для цього регіону може бути недостатньо висвітлено. Практичне значення полягає в тому, що результати дослідження можна використати для підтримки рішень міської влади та планувальників щодо підвищення стійкості міського середовища до перегрівання, оптимізації зелених зон, зменшення енерговитрат на охолодження та покращення комфорту мешканців.

Для реалізації роботи будуть застосовані такі методи: дистанційне зондування Землі, розрахунок температури поверхні (LST), розрахунок УНІ, просторово-часовий аналіз у ГІС-середовищі, статистичний аналіз факторів, картографування результатів.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ СФЕРИ

1.1 Визначення міських теплових островів, основні елементи та індекси

У цьому підпункті розглянемо базові поняття, що стосуються феномена міських теплових островів (МТО), а також ключові індекси і показники, які використовуються у геоінформаційному дослідженні цього явища.

Під поняттям міського теплового острова (МТО) зазвичай розуміють ситуацію, коли міська територія має вищі температури (поверхні або повітря) порівняно з навколишніми менш урбанізованими зонами [40].

Для розуміння у подальшому при перегляді роботи, розглянемо декілька визначень:

Імпермеабельна поверхня - це будь-яка поверхня, яка не пропускає або майже не пропускає воду у ґрунт, тобто має низьку або нульову водопроникність.

У дослідженнях дистанційного зондування використовується поняття поверхневої міської теплової острови (Surface Urban Heat Island, SUHI) - коли оцінка виконується за температурою земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) [37].

Ще одне важливе поняття - температура поверхні землі (Land Surface Temperature, LST) - температура, яку випромінює або має поверхня землі чи будівель, що фіксується тепловими інфрачервоними каналами супутників [23].

Основними компонентами в цій роботі є:

Матеріали поверхні та забудова: Урбанізовані території характеризуються великою часткою імпермеабельних/будівельних матеріалів (асфальт, бетон, дахові покриття), які мають низький альbedo, високу теплопровідність і здатність акумулювати тепло. Це сприяє накопиченню й утриманню тепла, що відрізняє міські ландшафти від більш природних [38].

Озеленення та водні об'єкти: Присутність дерев, зелених ґрунтових поверхонь і водних площин забезпечує охолодження через випаровування, тінь, високий альbedo порівняно з асфальтом. Зменшення озеленення чи водних елементів - значущий чинник посилення МТО [35].

Геометрія міської тканини і урбаністична морфологія: Висота будівель, щільність забудови, орієнтація вулиць, провітрюваність, наявність «коридорів тіней» - усе це впливає на нагрів і охолодження міста [30].

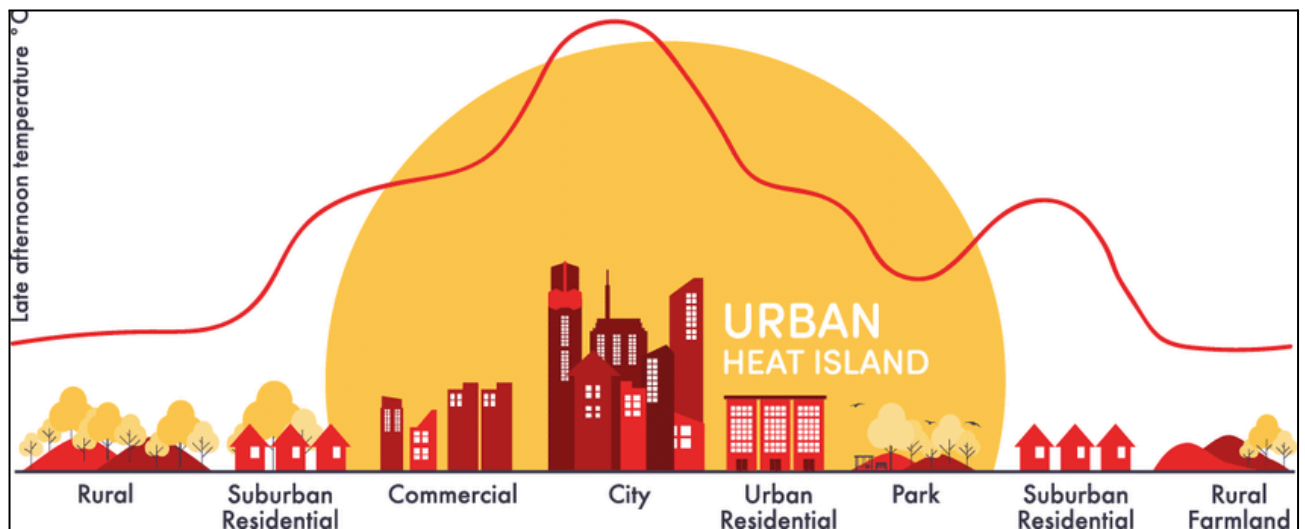


Рисунок 1.1.1. Залежність УНІ від поверхні [24]

Енергетичні витоки (антропогенне тепло): Виділення тепла системами кондиціонування, автомобілями, промисловими діями також підвищує температуру повітря в місті, хоча для SUHI оцінювання через LST акцент часто ставиться на поверхню [34].

У геоінформаційному визначенні міських теплових островів ми будемо використовувати індекси, і ось наведено їх перелік який на знадобиться:

Інтенсивність міського теплового острова (Urban Heat Island Intensity, UHI)- різниця температур (повітря чи поверхні) між міською зоною та прилеглою сільською чи менш забудованою територією [18].

Індекс нормалізованої різниці вегетації (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) - часто використовується для оцінки зелених зон і встановлення зв'язку між ступенем озеленення та LST [32].

Індекс забудованості (Normalized Difference Built-up Index, NDBI) - показник урбанізації, який допомагає співвідносити з LST [14].

Індекс стресу поверхні (Urban Thermal Field Variance Index, UTFVI) - ще один показник, що використовує дані LST і інші параметри поверхні для оцінки стресового нагріву міської території [31].

Альbedo та емісійність поверхні (Surface Albedo, ϵ - емісійність) - важливі параметри для розрахунку LST із супутникових даних, що впливають на точність оцінок [41].

Також є три зв'язки та значення які дають нам змогу точніше визначити температурні перепади :

- 1) Було встановлено, що чим вища частка імпермеабельної поверхні, тим вища LST і, відповідно, інтенсивність SUNI [42].
- 2) На противагу - чим більша доля озеленення, тим нижча температура поверхні; наприклад, дослідження показали зниження температури на $\sim 3-4$ °C у добре озеленених ділянках порівняно з неозеленими [36].
- 3) Методи ДЗЗ (дистанційного зондування) та ГІС-аналіз забезпечують можливість моніторингу просторового й часового розподілу теплових островів на великих територіях [29].

Узагальнюючи цей пункт, ми визначили базову термінологію (МТО/UHI, SUNI, LST), виділили ключові чинники, які формують теплові острови в міських територіях, описали основні індекси та показники, що використовуються для їх оцінки, та надали підґрунтя для подальшого методичного і практичного аналізу в дослідженні геоінформаційного моніторингу.

1.2 Стан і тенденції розвитку. Досвід реалізації у світі.

За останні два десятиліття кількість досліджень, присвячених міським тепловим островам (UHI/SUNI), різко зросла - це охоплює як методи моніторингу (LST з Landsat, MODIS, Sentinel), так і моделювання впливу міської морфології, зелених насаджень і антропогенного тепла на міський мікроклімат. Останні глобальні дослідження показують різноспрямовані тренди: у багатьох містах спостерігається зростання LST унаслідок урбанізації та глобального потепління, тоді як у частині міст інтенсивність SUNI в останні роки може сповільнюватися внаслідок широкомасштабних заходів адаптації та озеленення. Висновки про глобальні тренди залежать від вибору даних (днем чи вночі, поверхнева чи повітряна температура) і часових інтервалів дослідження [43].

Ключові напрямки розвитку методологій моніторингу являються перехід від точкових метеоспостережень до поєднання супутникових LST-даних і наземної верифікації (гібридні підходи), що дозволяє відстежувати SUHI у просторі і часі з кращою роздільною здатністю [26].

Інтеграція індексів (NDVI, NDBI, UTFVI) для багатовимірного аналізу впливу зелених територій, забудови та матеріалів поверхні на температурне поле [28].

Розвиток моделей та сценарних оцінок впливу заходів пом'якшення (cool/reflective roofs, green roofs, urban forestry, permeable surfaces) на локальні та міські температури, а також їхнього впливу на енергоспоживання і здоров'я населення [16].

В світовому досвід зафіксовано багато практичні стратегії та їхня ефективність. Досвід міст світу демонструє, що поодинокі заходи приносять локальний ефект, але найбільш помітне зниження температури досягається при комбінованих підходах:

Зелені насадження та зміна структури відкритих просторів. Масштабні програми озеленення (вуличні дерева, парки, «зелена інфраструктура») показують стабільне охолоджувальне діяння через тінь і випаровування; зв'язність зелених масивів підвищує ефективність охолодження [17].

Холодні та зелені дахи. Поєднання покриттів з високим альбедо та рослинних дахів знижує нагрівання поверхонь і покращує тепловий комфорт у сусідніх будівлях. Ефект найбільш помітний на локальному рівні, але у великих масштабах дахи можуть зменшувати міську температуру на долі градуса (кількість залежить від покриттів та щільності впровадження) [22].

Світлі/рефлексивні поверхні (cool pavements, reflective façades). Застосування матеріалів з підвищеним відбиттям сонячного випромінювання знижує локальну температуру поверхонь і впливає на попит на охолодження будівель [39].

Комплексні міські заходи (комбінація інтервенцій). Моделювання та емпіричні дослідження вказують, що сукупність заходів - озеленення, холодні

дахи і поверхні, перехід до більш «дихаючих» матеріалів - дає синергетичний ефект і забезпечує найкраще співвідношення витрат та результату [27].

Розглянемо декілька реальних прикладів країн:

Сінгапур - системний підхід до охолодження міста: політика «City in a Garden», програми cool roofs, зелені фасади й інтегроване планування водних елементів; існує каталог міських заходів і багато пілотів для масштабування рішень. Реалізація показала помітне зниження температури на локальних ділянках і підвищення якості життя [15].

Нью-Йорк (США) - великі дослідження та моделювання (в т.ч. NYSERDA) показали, що стратегія, що поєднує висадку дерев, зелені дахи та світлі покриття, найбільш ефективна у зниженні близької до поверхні температури повітря і зменшенні енергоспоживання будівель під час спеки [19].

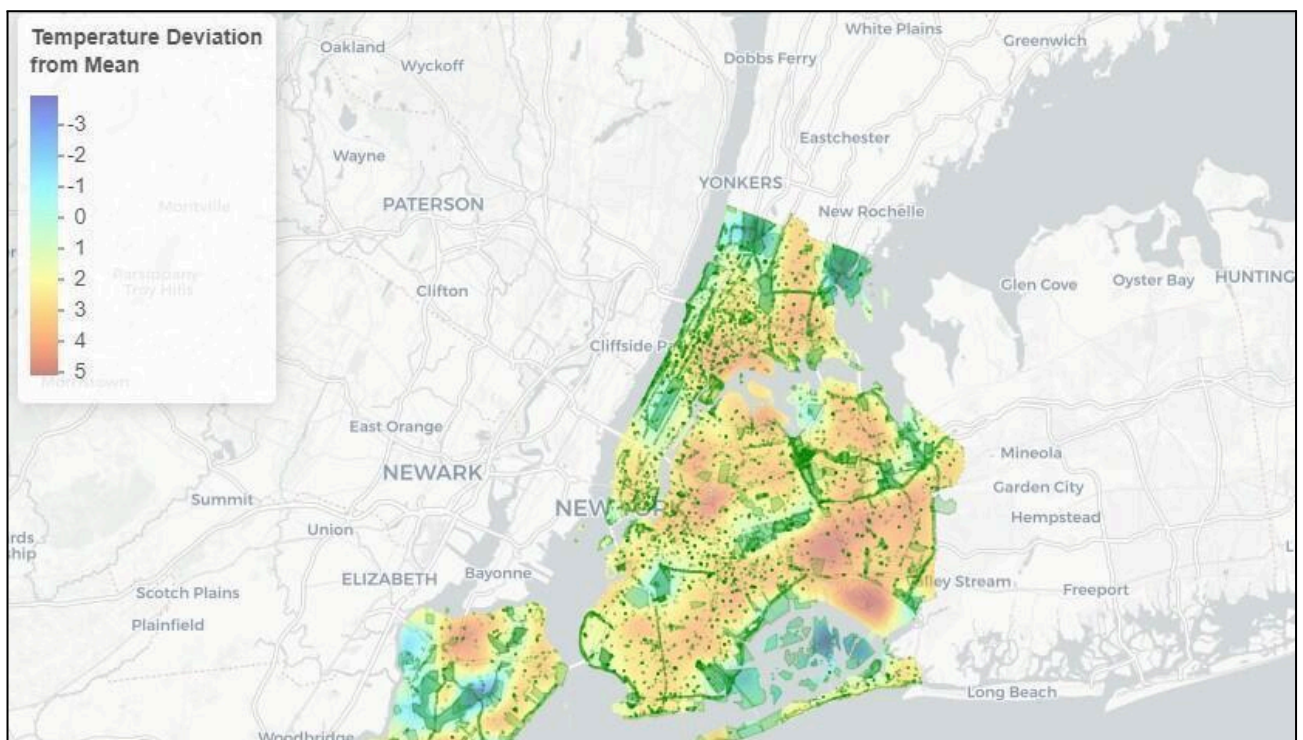


Рисунок 1.2.1. УНІ для Нью-Йорка [44]

Європа (Париж, Ліон та ін.) - місцеві уряди впроваджують «cool islands», масштабні програми деревопосадок і реконструкції громадських просторів; у ряді випадків (Ліон) створення мережі зелених «островів» вже показує зниження локальних температур і покращення мікроклімату районів [10].

Китай - національна та міська політика включає масштабні заходи лісонасадження і трансформації міських просторів; дослідження за 2000–2020 роки показали, що такі інтервенції можуть пом'якшувати ефект теплових хвиль у міських зонах [9].

Зараз перед світом стає багато викликів з якими потрібно буде зустрітися, якщо не зараз, то в не далекому майбутньому точно:

Оцінка довгострокової ефективності: потрібні уніфіковані методики для порівняння ефективності заходів у різних містах (різні кліматичні умови, міська морфологія) [6].

Верифікація супутникових даних наземними спостереженнями: синхронізація LST із повітряними температурами і станціями спостереження для точнішої інтерпретації впливу інтервенцій [8].

Соціально-економічні аспекти: питання фінансування, пріоритизації районів з найбільшою вразливістю населення, інтеграція заходів у політику міської реконструкції [7].

1.3 Огляд наукових досліджень

У цьому підпункті здійснюється узагальнення ключових напрямків і результатів наукових досліджень щодо явища міських теплових островів (UHI/SUHI), із виокремленням основних тем, методів, тенденцій і наявних прогалин у знаннях.

Зараз розглянемо основні напрямки досліджень як проводилися при розгляді міських теплових островів:

Моніторинг температури поверхні та атмосфери

- Широко використовується супутникове дистанційне зондування для оцінки температури поверхні землі (LST) в міських районах. Наприклад, у систематичному огляді декількох десятків досліджень було показано, що до ~54 % робіт використовували дані супутника Landsat TM/ETM для побудови моделей UHI.

- Дослідження також розрізняють два типи УНІ: повітряний (Canopy UHI) та поверхневий (Surface UHI / SUHI). Наприклад, у огляді 2023 р. акцентовано на тому, що SUHI не завжди прямо корелює з комфортом людини, оскільки температура поверхні і температура повітря біля землі можуть відрізнятись.

Аналіз факторів виникнення УНІ

- Дослідження систематично вказують на такі чинники: зменшення зелених насаджень, збільшення імпермеабельних поверхонь, щільність забудови, антропогенні теплові витоки, геометрія міської тканини. Наприклад, у систематичному огляді вказано: озеленення згадувалось у ~44 % досліджень, забудова - ~28 % досліджень.
- Також враховуються кліматичні та географічні умови: як-от міста у засушливих чи напівзасушливих районах мають значно інші показники різниці температур, ніж вологі чи помірні кліматичні зони.

Методології моделювання та аналізу

- У сучасних роботах застосовуються регресійні моделі, просторові кореляції, методи класифікації покриттів, моделі міського мікроклімату (наприклад, урбаністичні «canopy» чи «urban canopy model»).
- Моделювання також виходить за межі «міста vs. сільська околиця» і враховує просторову неоднорідність (local climate zones, LCZ), час доби (день/ніч) тощо.

Оцінка впливу та заходи пом'якшення

- Багато досліджень зосереджені на впливі УНІ на тепловий комфорт людей, енергоспоживання будівель, якість повітря, здоров'я населення. Наприклад, огляд 2023 р. присвячений впливу УНІ на зовнішній тепловий комфорт.

— Заходи пом'якшення включають: збільшення озеленення, встановлення «холодних дахів/покриттів», світлих або відбиваючих поверхонь, зміни у матеріалах покриттів, реконструкція міських просторів. Огляд 2021 р.

досліджень у країнах арабського півострова показав різницю температур між зонами з озелененням та без нього до 5 °С.

У наш час розвиток сягає вершин і навіть не збирається зупинятися. Єдине що зупиняє цей розвиток це проблематика та специфіка окремих галузей, але і ц вирішується. Перед дослідженням міських теплових островів також є тенденції та виклики і зараз перечислимо деякі з них:

- Зростає інтердисциплінарний підхід: аналіз УНІ все частіше включає соціо-економічні аспекти, планування міста, здоров'я населення.
- Підвищується роздільна здатність даних: супутники з кращими показниками, безперервні серії, включення ночі/день, LCZ-класифікація.
- Посилюється увага до впливу кліматичних змін і екстремальних подій (теплових хвиль) у поєднанні з УНІ.
- Однак існують значні прогалини:
 - недостатня кількість довготермінових (декади) досліджень, особливо в регіонах, що швидко урбанізуються;
 - невідповідність між показниками LST (теплова картинка поверхні) і температурою повітря, яка безпосередньо впливає на людей;
 - нестача досліджень у малих і середніх містах, а також у країнах з низьким доходом;
 - недостатня оцінка економічної ефективності заходів пом'якшення в різних кліматичних умовах.

Загалом, наукова спільнота має потужний базис знань про механізми, фактори, методи вивчення та пом'якшення міських теплових островів. Проте для теми «геоінформаційний моніторинг теплових островів міських територій» актуальні такі моменти: використання новітніх супутникових даних, інтеграція ГІС-аналізу з «земними» даними, адаптація методів до конкретного міста або

агломерації, увага до локальних зон та часової динаміки. Це створює можливість внести новий вклад - наприклад, за рахунок аналізу динаміки LST у обраній міській території, або зв'язку LST з міською морфологією та імпермеабельними поверхнями.

1.4 Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу міських теплових островів в Україні

Нормативно-правове забезпечення моніторингу міських теплових островів в Україні перебуває на етапі становлення. Основна увага чинного законодавства зосереджена на регулюванні загального екологічного моніторингу, контролю стану атмосферного повітря, земель та енергоефективності, однак **чітко визначених положень щодо контролю температурного поля міських територій та ефекту “міського теплового острова” (УНІ) наразі немає.**

До ключових документів, які створюють базу для подальшої розробки нормативів у цій сфері, належать:

– **Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища”** (1991 р.) [1] - визначає правові засади охорони довкілля, включаючи необхідність проведення моніторингу та інформування населення про стан природного середовища.

– **Закон України “ Про моніторинг навколишнього природного середовища ”** [2] (2001 р.) - формує структуру державної системи екологічного моніторингу, однак не конкретизує методи або індикатори спостереження за мікрокліматичними параметрами міських територій.

– **Постанова Кабінету Міністрів України № 391 від 30.03.1998 р. “Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля”** [4]- регламентує порядок організації спостережень, обміну інформацією та взаємодії між державними органами, але не містить вимог щодо використання

даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) або геоінформаційних систем (ГІС) для моніторингу температурного поля поверхні.

– **Закон України “Про Національну інфраструктуру геопросторових даних”** [3] (2020 р.) - створює нормативну основу для використання просторової інформації, що може бути базою для інтеграції даних УНІ-моніторингу в національні геоінформаційні ресурси.

Таким чином, чинна нормативно-правова база є **непрямою**, тобто забезпечує лише загальні правові рамки для проведення геоінформаційного моніторингу довкілля, але не регламентує окремо процеси збору, обробки та аналізу температурних характеристик міських територій.

Також існують галузеві та підзаконні акти які дуже важливі для досліджень подібного типу як у цій дипломній роботі.

Тож підзаконні та галузеві акти - це окремі документи, дотичні до теми моніторингу міських теплових островів, стосуються сфер кліматичної політики, енергоефективності та сталого розвитку міст:

– Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України № 1163 від 21.12.2023 р. “Про затвердження Методики розроблення місцевих енергетичних планів” [6] - передбачає врахування кліматичних ризиків та оцінку енергоефективності міських територій, що опосередковано пов’язано з питанням зменшення ефекту теплових островів.

– Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року (затверджена розпорядженням КМУ № 454-р від 20.10.2021 р.) [5] - містить положення про необхідність розробки систем кліматичного моніторингу на урбанізованих територіях, у тому числі із використанням супутникових даних.

– Закон України “Про регулювання містобудівної діяльності” (2011 р.) - передбачає створення систем містобудівного кадастру, який може включати дані про мікрокліматичні умови та рівень теплового навантаження.

Хоча ці документи не містять прямої термінології “тепловий острів”, вони формують інституційну основу для подальшої інтеграції теплового моніторингу у містобудівні, кліматичні та енергетичні програми.

Основними проблемами нормативного забезпечення моніторингу міських теплових островів є:

– Відсутність спеціалізованої методики - немає офіційно затверджених стандартів або інструкцій для збору та аналізу даних про температуру поверхні міських територій за допомогою ДЗЗ або ГІС.

– Нечітке розмежування повноважень між екологічними, містобудівними та кліматичними структурами на державному і місцевому рівнях.

– Недостатня інтеграція супутникових спостережень у систему державного моніторингу довкілля.

– Відсутність механізму публічного доступу до інформації про міські мікрокліматичні умови.

Для підвищення ефективності моніторингу теплових островів доцільно розробити:

– Національну методику ГІС-моніторингу міських теплових островів, затверджену Міндовкіллям або Держгеокадастром;

– Відповідні технічні стандарти щодо використання супутникових даних (Sentinel, Landsat, MODIS), визначення індексів NDVI, NDBI, LST тощо;

– Єдиний державний реєстр кліматичних показників урбанізованих територій, інтегрований у національну геоінформаційну платформу.

Аналіз нормативно-правової бази показує, що Україна має розвинене законодавство у сфері охорони довкілля, містобудування та геоінформаційних технологій, але відсутні цільові нормативні документи для моніторингу міських теплових островів.

Впровадження відповідних регламентів дозволить створити системну правову основу для інтеграції теплових карт у містобудівний кадастр, покращення енергоефективності, планування зелених зон і адаптації міст до кліматичних змін.

2 МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ЗДІЙСНЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВИХ ОСТРОВІВ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ

2.1 Обґрунтування обраних методів дослідження та програмного забезпечення

Дослідження міських теплових островів вимагає комплексного підходу, що поєднує інструменти дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційних систем (ГІС) та статистичного аналізу. Для виконання даної роботи було обрано платформу Google Earth Engine (GEE), яка є хмарним середовищем для обробки великих обсягів супутникових даних. Вибір саме цього програмного забезпечення зумовлений кількома ключовими перевагами.

Однією з головних причин вибору Google Earth Engine (GEE) є доступ до глобальних супутникових архівів, що охоплюють дані багатьох космічних місій - *Landsat 5, 7, 8, 9, Sentinel-2 (ESA), MODIS (Terra/Aqua), VIIRS* тощо. Ця перевага дозволяє досліднику оперативно отримувати багатоспектральні зображення високої якості для будь-якої точки земної поверхні без необхідності попереднього завантаження чи зберігання даних на локальному комп'ютері. В межах одного середовища можна проводити повноцінний багаточасовий аналіз змін температури поверхні (LST), оцінювати динаміку урбанізованих зон і взаємозв'язок із рослинним покривом чи антропогенним навантаженням. Це особливо важливо для територій із великою площею, як Донецька область, де щільність спостережень і часовий обсяг даних становлять тисячі супутникових сцен. Без використання GEE така аналітика потребувала б значних обчислювальних і технічних ресурсів, тоді як у хмарному середовищі усі архіви доступні миттєво та безкоштовно.

Другою вагомою перевагою є висока обчислювальна потужність та масштабованість обробки даних, що забезпечується хмарною архітектурою Google. Усі розрахунки - від фільтрації зображень до побудови статистичних моделей і розрахунку індексів (NDVI, NDBI, LST) - виконуються на серверній стороні, без залучення локальних ресурсів користувача. Це дозволяє аналізувати великі території (області, регіони чи навіть держави) у короткий проміжок часу. Наприклад, при обробці десятків сцен Landsat за різні роки GEE автоматично

виконує атмосферну корекцію, маскування хмар і створює композитні зображення, що значно підвищує точність результатів. Завдяки цьому можна ефективно відслідковувати просторово-часову динаміку теплових аномалій та формувати інтерактивні карти теплових островів, які оновлюються майже в реальному часі.

Ще однією суттєвою перевагою є те, що Google Earth Engine функціонує як інтегроване середовище для геоінформаційного аналізу, поєднуючи можливості програмування, статистичного обчислення, картографування та експорту результатів у популярні ГІС-формати. Платформа дозволяє фільтрувати дані за часовими, просторовими та тематичними критеріями, виконувати регресійні чи кластерні аналізи, будувати графіки та діаграми трендів. Готові результати можна експортувати у форматах GeoTIFF, shapefile, CSV, що забезпечує їхню сумісність із такими системами, як QGIS, ArcGIS, або іншими аналітичними інструментами. Це робить GEE не лише платформою для первинної обробки, але й повноцінною лабораторією для виконання всіх етапів дослідження - від завантаження даних до створення картографічних моделей і візуалізацій. Таким чином, інтегрованість середовища значно підвищує ефективність досліджень і дає змогу забезпечити безперервність аналітичного процесу від отримання даних до їх практичного застосування.

Основним джерелом даних у дослідженні стали супутникові знімки Landsat 8–9 (OLI/TIRS). Ці місії забезпечують високу якість мультиспектральних і теплових даних, що дає можливість точно обчислювати температуру поверхні землі (Land Surface Temperature - LST). Завдяки тепловим інфрачервоним каналам (Bands 10 і 11) можливо виявляти просторові відмінності температури в межах урбанізованих територій та оцінювати інтенсивність ефекту теплових островів. Просторова роздільна здатність 30 м дозволяє детально аналізувати структуру міських ландшафтів і локальні температурні аномалії.

Перевагами даних Landsat є їх безкоштовна доступність, довготривалий часовий ряд (з 1980-х років), висока стабільність калібрування та наявність корекційних алгоритмів у GEE. Недоліками є періодичність зйомки (16 днів), що

зменшує частоту спостережень, а також чутливість до хмарності, яка може суттєво обмежувати кількість придатних для аналізу сцен, особливо у весняно-осінній сезон.

Другим важливим джерелом стала супутникова система Sentinel-2 MSI (Multispectral Instrument), що надає зображення у 13 спектральних каналах із роздільною здатністю від 10 до 60 м. Ці дані використовувалися для розрахунку індексів NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) і NDBI (Normalized Difference Built-up Index), які дозволяють оцінити ступінь озеленення та забудови територій. Sentinel-2 забезпечує високу спектральну чутливість у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що дає змогу відокремити природні поверхні від імпермеабельних покриттів.

Основними перевагами цього набору є висока просторово-часова деталізація (повторність зйомки - 5 днів), стабільне калібрування та сумісність із Landsat. Недоліками виступають відсутність теплових каналів, тому Sentinel-2 не придатний для безпосереднього визначення LST, а також вплив хмарності та атмосферних умов, що вимагає попередньої фільтрації сцен.

Для перевірки регіональних температурних закономірностей застосовувалися дані MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) із супутників *Terra* та *Aqua*. MODIS надає добові продукти температури поверхні з роздільною здатністю 1 км, що дозволяє простежити великомасштабні тренди та сезонну динаміку SUHI. Використання цього набору є важливим для валідації результатів, отриманих із даних Landsat, а також для заповнення часових прогалин у періоди відсутності безхмарних знімків.

Перевагами MODIS є висока частота спостережень (до двох разів на добу) та стабільна радіометрична якість даних. Недоліки - низька просторова роздільна здатність, через що не можна проводити детальний аналіз міських мікроструктур, а також складність точного зіставлення з об'єктами середнього масштабу.

Допоміжним джерелом інформації у роботі стали відкриті дані OpenStreetMap (OSM). Вони використовувалися для уточнення меж урбанізованих територій, виявлення транспортної інфраструктури, густоти забудови та

локальних орографічних особливостей. OSM надає змогу інтегрувати просторову інформацію, створену спільнотою користувачів, у супутникові аналітичні продукти, що підвищує точність і геометричну узгодженість меж.

Серед переваг OSM варто відзначити відкритість, постійне оновлення та можливість використання в автоматизованих ГІС-процесах. Недоліки полягають у неоднорідній якості покриття територій, можливих неточностях або відсутності атрибутів у малонаселених районах, що потребує додаткової перевірки та узгодження з офіційними картографічними джерелами.

Для просторової локалізації меж дослідження та агрегації статистичних показників було використано дані кадастрових і адміністративно-територіальних одиниць України, отримані з відкритих державних геопорталів. Вони дозволили чітко визначити контури Донецької області, межі населених пунктів і розподіл міських агломерацій, що стало основою для побудови масок урбанізованих територій у GEE.

До переваг цього джерела належать офіційний статус, висока точність геометрії та повнота охоплення адміністративних меж. Водночас недоліком є обмежена деталізація деяких межових ліній і відсутність оперативного оновлення, особливо на територіях, де ведуться активні адміністративно-територіальні зміни або відбуваються військові дії.

Донецька область обрана як територія дослідження через низку чинників, що роблять її показовою для аналізу явища міських теплових островів. Регіон характеризується високим рівнем урбанізації, оскільки тут зосереджено значні промислові центри - Донецьк, Маріуполь, Краматорськ, Покровськ, які формують густу мережу забудови та потужні антропогенні джерела тепла. Територія області поєднує урбанізовані зони та природні ландшафти, що створює чіткий контраст температурних полів і дозволяє простежити просторову структуру теплових аномалій. Крім того, для цього регіону доступні відкриті супутникові архіви (зокрема Landsat, Sentinel, MODIS), що забезпечують можливість багаторічного моніторингу температурної динаміки поверхні за період 2015–2024 рр. Важливим чинником вибору є також наявність потужних промислових і енергетичних

об'єктів, які створюють локальні теплові потоки та істотно впливають на мікрокліматичні умови, роблячи регіон актуальним прикладом для вивчення інтенсивності та просторових особливостей ефекту міських теплових островів.

Попередня підготовка даних.

Першим етапом дослідження стало формування вихідного масиву супутникових даних для території Донецької області. У середовищі Google Earth Engine (GEE) виконувалася фільтрація сцен за часовими межами та умовами хмарності, оскільки наявність хмар значно впливає на точність подальших теплових розрахунків. Для забезпечення надійності аналізу були обрані лише безхмарні або мінімально зашумлені знімки, що дозволяє уникнути спотворень температурного фону. Територія дослідження була визначена шляхом створення ROI (Region of Interest) на основі офіційних меж області з кадастрових та адміністративних джерел. Подальше обрізання зображень за цими межами дало змогу зосередити аналіз виключно на урбанізованих ділянках і прилеглих природних територіях. На цьому ж етапі здійснювалося перетворення одиниць вимірювання, приведення спектральних діапазонів і нормалізація даних для подальшого порівняльного аналізу.

Розрахунок індексів NDVI та NDBI.

Другим етапом стало визначення вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та індексу забудови NDBI (Normalized Difference Built-up Index), які є ключовими для ідентифікації типів поверхонь. Розрахунок NDVI здійснювався за формулою $(NIR - RED)/(NIR + RED)$ із використанням каналів Sentinel-2 або Landsat, що дозволяє визначити щільність та стан рослинного покриву. NDBI обчислювався за виразом $(SWIR - NIR)/(SWIR + NIR)$, який відображає інтенсивність забудови та частку імпермеабельних поверхонь. Ці індекси слугують аналітичною базою для подальшої інтерпретації ефекту теплових островів, адже території з низьким NDVI і високим NDBI, як правило, демонструють вищу температуру поверхні. Крім того, на основі поєднання обох індексів у GEE формувалися класифікаційні карти території, де виділялися

урбанізовані, зелені та водні ділянки, що значно полегшує подальше картографування SUHI.

Обчислення температури поверхні (LST).

На цьому етапі здійснювався розрахунок Land Surface Temperature (LST) - температури поверхні землі, що є основним параметром для аналізу міських теплових островів. Для цього використовувалися теплові інфрачервоні канали (TIRS) супутників Landsat 8-9. Розрахунок включав декілька кроків: перетворення цифрових значень пікселів у спектральну яскравість, подальше обчислення яскравісної температури (Brightness Temperature) та внесення поправки на емісійність поверхні (ϵ). Для підвищення точності було застосовано емпіричну формулу, що враховує відмінності теплових властивостей рослинних, водних і забудованих покриттів. Результатом цього етапу стало отримання растрових шарів температури поверхні, які стали основою для подальшого просторового аналізу.

Картографування SUHI.

Четвертий етап полягав у побудові теплових карт міських територій та визначенні інтенсивності ефекту Surface Urban Heat Island (SUHI). Для цього виконувалося зіставлення температурних полів урбанізованих ділянок із навколишніми сільськими або природними територіями, які приймалися за базовий фон. У результаті було сформовано карти просторового розподілу температури поверхні, де теплові аномалії відображалися у вигляді зон підвищеної температури. Карти дозволили виявити найгарячіші ділянки області - промислові райони, щільно забудовані квартали та транспортні вузли. Для візуалізації використовувалися теплові кольорні шкали та ізотермічні контури, які чітко показують межі впливу SUHI. Додатково створювалися графіки температурного градієнта для різних типів ландшафтів, що дало змогу оцінити ступінь теплового контрасту між містом і периферією.

Статистичний аналіз.

П'ятий етап передбачав кількісну оцінку просторових закономірностей, отриманих у процесі картографування. Для ключових населених пунктів Донецької області (Донецьк, Горлівка, Маріуполь, Краматорськ, Слов'янськ,

Бахмут та Покровськ) обчислювалися середні, мінімальні та максимальні значення LST, а також стандартне відхилення для оцінки варіабельності температурних показників. Статистичні розрахунки дозволили визначити, які саме урбанізовані зони демонструють найвищу теплову інтенсивність, а також простежити залежність температури від ступеня забудови та густоти зелених насаджень. На цьому етапі здійснювалося також кластерне групування даних, що допомогло виділити типові класи територій за рівнем нагрівання.

Валідація даних.

Завершальний етап дослідження включав перевірку достовірності отриманих результатів. З цією метою проводилося порівняння даних LST із показниками температури повітря, зафіксованими на метеостанціях Донецької області, а також з результатами незалежних супутникових вимірювань (наприклад, MODIS). Така валідація дозволила визначити середню різницю між розрахунковими та фактичними температурами, що є критично важливим для оцінки точності моделей. Крім того, проводилася візуальна перевірка географічної узгодженості даних, аналіз розподілу температурних аномалій і порівняння отриманих карт із відомими промисловими або транспортними зонами. Завдяки цьому етапу було підтверджено адекватність методики та її придатність для подальшого використання у моніторингових дослідженнях.

Попри численні переваги використання Google Earth Engine (GEE), під час дослідження необхідно враховувати низку обмежень, що впливають на точність і деталізацію результатів. Одним із головних факторів є наявність хмарності у супутникових сценах, яка особливо часто спостерігається у весняно-осінній період і може значно спотворювати температурні показники поверхні. Також просторова роздільна здатність даних - 30 метрів для знімків *Landsat* і близько 1 км для *MODIS* - не завжди забезпечує можливість детального аналізу дрібномасштабних урбаністичних структур, таких як окремі вулиці чи квартали. Важливо враховувати, що температура поверхні (LST) не є прямим аналогом температури повітря, тому отримані значення слід розглядати переважно у

контексті просторового розподілу теплових аномалій, а не як абсолютні температурні показники.

Крім того, GEE має технічні обмеження щодо обробки надто великих масивів даних або територій із високою роздільною здатністю. Це зумовлює потребу у зонуванні регіону дослідження або використанні агрегованих статистичних методів, які дозволяють зберегти точність аналізу при оптимізації продуктивності обчислень. Врахування цих чинників є важливою умовою для забезпечення достовірності результатів та адекватності подальших інтерпретацій у межах геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій.

Отримані результати мають широке прикладне значення й можуть бути використані для оцінки просторової структури теплових аномалій у межах міст та промислових зон. Це дозволяє виявляти локальні осередки підвищеної температури, визначати їхню площу, інтенсивність і взаємозв'язок із типом земного покриву, що є важливим для подальшого просторового планування.

Важливим напрямом практичного використання результатів є розробка рекомендацій щодо озеленення та оптимізації міського простору. На основі теплових карт можна обґрунтувати потребу у створенні зелених зон, парків, бульварів або водних об'єктів у районах із надмірним тепловим навантаженням, що сприятиме зниженню інтенсивності міських теплових островів і покращенню мікроклімату.

Також результати дослідження можуть бути інтегровані в регіональні кліматичні стратегії адаптації, оскільки вони відображають закономірності формування температурних аномалій та допомагають оцінити потенційні ризики перегріву урбанізованих територій у контексті зміни клімату.

Крім того, отримані дані можуть слугувати основою для попередньої оцінки енергоефективності міських територій, адже підвищена температура поверхні безпосередньо впливає на енергоспоживання будівель і навантаження на системи кондиціонування. Таким чином, результати дослідження можуть бути використані у сфері містобудівного планування, екологічного моніторингу та енергетичної політики.

2.2 Концептуальна та функціональна модель геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій

У процесі побудови системи геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій важливим етапом є формування концептуальної та функціональної моделей, які відображають структуру дослідження, послідовність дій і взаємозв'язки між основними компонентами. Розробка цих моделей забезпечує методологічну цілісність дослідження, а також дозволяє створити логічну схему збору, обробки, аналізу й інтерпретації геопросторових даних у межах обраної території - Донецької області.

Концептуальна модель відображає загальну архітектуру геоінформаційної системи, що реалізує процес моніторингу міських теплових островів, поєднуючи в собі основні компоненти дослідження. Об'єктом виступають урбанізовані території Донецької області, які характеризуються високою щільністю забудови, промисловим навантаженням і недостатньою кількістю зелених насаджень. Джерельну базу становлять супутникові дані Landsat 8–9, Sentinel-2, MODIS, допоміжні набори OpenStreetMap, кадастрові та адміністративні шари, а також кліматичні показники метеостанцій. Інструментальна частина представлена хмарною платформою Google Earth Engine (GEE), що забезпечує обробку великих обсягів супутникових зображень, і системою QGIS, яка використовується для візуалізації, уточнення меж та оформлення картографічних результатів. У межах методології дослідження застосовуються індекси NDVI (оцінка рослинності), NDBI (ступінь забудови) та LST (температура поверхні), які дозволяють визначати просторові закономірності формування зон SUHI.

Таким чином, концептуальна модель визначає загальну логіку системи геоінформаційного моніторингу, де обрані джерела даних, аналітичні методи та інструменти поєднуються в єдину структурну схему. Її головна мета полягає у забезпеченні послідовності, узгодженості й відтворюваності всіх етапів дослідження - від збору вихідної інформації до прийняття практичних рішень щодо зменшення впливу міських теплових островів на довкілля та мікроклімат.



Рис. 2.1 Концептуальна модель

Функціональна модель визначає послідовність етапів, які забезпечують повний цикл геоінформаційного моніторингу теплових островів - від отримання даних до практичного їх використання. Спочатку здійснюється збір супутникових і допоміжних геопросторових даних у середовищі Google Earth Engine (GEE). Далі проводиться попередня обробка, що включає фільтрацію сцен за датами, маскування хмар і обрізання меж досліджуваної території. На наступному етапі виконується аналітична обробка — розрахунок індексів NDVI, NDBI та LST, побудова теплових карт і моделей взаємозв'язків між показниками рослинності, забудови та температури поверхні.

Після цього проводиться картографування й валідація результатів — створюються карти SUHI, зіставляються температурні значення з даними метеостанцій, оцінюється точність і стабільність отриманих моделей. Завершальний етап включає інтерпретацію та практичне використання результатів, зокрема визначення критичних зон перегріву, формування рекомендацій для містобудівного планування, розвитку зелених насаджень і підвищення енергоефективності міських територій. Така структура

функціональної моделі забезпечує логічність, відтворюваність і можливість автоматизації моніторингу в межах єдиного просторово-аналітичного середовища GEE.

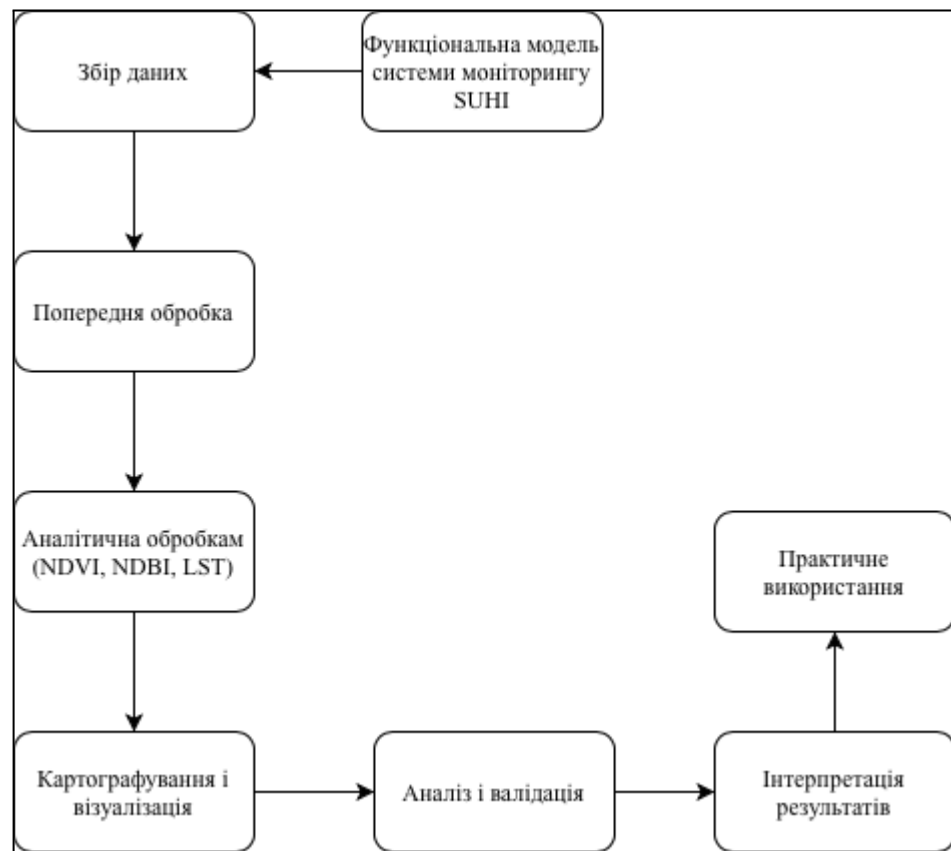


Рис. 2.2 Функціональна модель

Обґрунтування побудови концептуальної та функціональної моделей базується на принципах інтегрованого підходу до аналізу геопросторових даних, який передбачає поєднання різномірних джерел інформації, аналітичних методів і технічних інструментів у єдину логічну систему. Концептуальна модель формує стратегічне бачення дослідження, визначає основні об'єкти, дані, методи та очікувані результати. Вона слугує своєрідною “картою” проєкту, що узгоджує наукові завдання з можливостями сучасних геоінформаційних технологій. Завдяки такій структурі можна чітко простежити, як із сирих супутникових знімків формується аналітична інформація про просторові закономірності явища міських теплових островів, а також як отримані дані переходять у стадію практичного використання для планування міського розвитку.

Функціональна модель, у свою чергу, забезпечує операційний рівень реалізації дослідження - описує алгоритм дій, порядок обробки даних і логіку побудови результатів. Вона є інструментом, який трансформує концептуальні положення в конкретні етапи: збір, фільтрацію, аналіз, картографування, перевірку та інтерпретацію результатів. Обрана структура дозволяє не лише підвищити точність і відтворюваність аналізу, а й адаптувати систему до майбутніх удосконалень - наприклад, додавання нових джерел супутникових даних, розширення часових рядів або впровадження автоматизованого оновлення карт теплових островів у реальному часі. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку ГС-моніторингу та забезпечує стійкість, масштабованість і практичну цінність отриманих результатів.

**3 ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ
ТЕПЛОВИХ ОСТРОВІВ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ТА ЙОГО
РЕЗУЛЬТАТИ**

3.1 Розроблення методики

Методика геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій (Urban Heat Islands, UHI) розроблена на основі аналізу супутникових даних Landsat та MODIS з використанням ГІС-платформи Google Earth Engine (GEE). Вона дозволяє оцінити просторовий розподіл температурних аномалій у міських районах та відстежувати динаміку UHI протягом багаторічного періоду. Методика включає кілька ключових етапів: підготовку даних, побудову урбанізованих масок, розрахунок середньої поверхневої температури, індексу UHI, класифікацію інтенсивності UHI, а також обчислення багаторічних метрик та аномалій.

Методика передбачає інтеграцію геоінформаційного аналізу та обробки супутникових даних для отримання кількісних показників температурних аномалій поверхні землі. Використання платформи GEE забезпечує обробку великих обсягів даних у режимі реального часу та автоматизацію багаторічних аналізів. Це дозволяє проводити порівняння між роками, оцінювати вплив урбанізації, кліматичних факторів та військових дій на інтенсивність теплових островів.

3.1.1 Визначення області дослідження

Область дослідження (Region of Interest, далі - ROI) формується на основі адміністративних меж території області. Для цього використовується колекція FAO GAUL Simplified (рівень 1), яка фільтрується за координатами точки, що лежить у межах області.

```
var roi = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level1")  
  .filterBounds(geometry);
```

Використання такого набору даних гарантує точність геопросторового аналізу та уніфікує результати між різними джерелами даних вектору. ROI визначає просторову область для всіх наступних обчислень, що дозволяє

порівнювати результати різних років у межах потрібної області та уникати впливу зовнішніх територій.

3.1.2 Формування урбанізованої маски

Для виділення міських територій застосовується набір даних Dynamic World про землекористування, який включає в себе маркування із дев'яти класів, де пікселі зі значенням «6» відносяться до урбанізованих територій [20].

Урбанізовані пікселі об'єднуються таким чином, щоб максимально покрити всю міську територію незалежно від року. Маска застосовується для обмеження аналізу температурних даних лише територіями міст.

```
var urban =  
ee.ImageCollection("GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1")  
  .select('label')  
  .filterDate(time_startu, time_endu)  
  .filterBounds(roi)  
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))  
  .mode().eq(6);  
Map.addLayer(urban.clip(roi), [], 'urban')
```

Маска урбанізованих територій дозволяє відокремити пікселі, які належать до міських зон, від інших категорій. Це необхідно для точного обчислення УНІ, оскільки індекс має відображати лише температурні аномалії на території міст, виключаючи вплив навколишніх сільських або зелених зон. Вибір методу `.mode()` забезпечує стійкий результат у межах одного класу і усуває випадкові шумові пікселі у колекції даних Dynamic World.

3.1.3 Завантаження та обробка термічних даних

Першочергово для оцінки температури поверхні можна було використати термічний канал ST_B6, у Landsat 8 та 9, проте він має низку обмежень для нашого дослідження на рівні області.

По-перше, у доступних знімках Landsat спостерігаються відсутні дані у великій смузі від Маріуполя у північно-східному напрямку, що робить неможливим отримати повне покриття ROI (рисунок 3.1.3.1).



Рисунок 3.1.3.1. – Відображення відсутності даних на території Донецької області

По-друге, Landsat має вищу просторову роздільну здатність (30 м), що забезпечує детальніші локальні вимірювання на рівні окремих міст, але для багаторічного аналізу території області це стає дуже ресурсоємним.

Використання MODIS забезпечує регулярне глобальне покриття та достатню роздільну здатність (1 км) для оцінки середньорічних характеристик УНІ на рівні області. Крім того, MODIS дозволяє формувати стійкі медіанні композиції за рік, що зменшує вплив викидів та хмарності, забезпечуючи надійні результати для багаторічного аналізу. На платформі GEE дані для MODIS доступні починаючи з 18.02.2000 року, та по теперішній час оновлюються.

Таким чином, вибір MODIS обґрунтований потребою отримати повне покриття ROI, забезпечити обробку всієї території та оцінити динаміку теплових островів на рівні області, що відповідає цілям даного дослідження. Хоча Landsat ST_B6 забезпечує вищу просторову деталізацію і може бути використаний для

локальних досліджень окремих міст, для оцінки UHI на території Донецької області MODIS є оптимальним вибором.

Для оцінки UHI використовуються термічний канал колекції даних **MOD11A2.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km**, яка представляє дані про температуру поверхні землі (LST) за 8 днів [38]. Після завантаження проводиться фільтрування за періодом відбору знімків, за областю дослідження, корекція значень температури за допомогою метаданих `multiply` та `subtract` для отримання фізично коректних значень поверхневої температури та переходу від Кельвінів, у яких подана температура в термічному каналі, до градусів Цельсія (°C).

```
var modColl1 =  
ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1k  
m')  
  
.filterDate(time_start11, time_end11)  
.filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))  
.filterBounds(roi)  
.map(function(img) {  
  return img.multiply(0.02).subtract(273.15)  
    .copyProperties(img,  
img.propertyNames());  
  })
```

Використання MODIS LST дозволяє отримати регулярні 8-денні спостереження температури поверхні землі, що є достатнім для оцінки середньорічної температури та UHI. Корекція значень забезпечує перехід від цифрових одиниць датчика до фізично коректних градусів Цельсія, що робить результати зрозумілими для інтерпретації та порівняння з іншими дослідженнями.

3.1.4 Розрахунок середньорічної температури та індексу UHI

Середня LST (MEAN) обчислюється для всієї області дослідження, тобто Донецькій області. Індекс UHI визначається як відносна нормалізована аномалія температури [25]:

$$UHI = \frac{TIR - MEAN}{MEAN} \quad (3.1.4)$$

де *TIR* – локальна обчислюється лише на урбанізованих територіях, *MEAN* – середня температура для ROI.

У результаті отриманий індекс відображає перевищення температури міських територій над середньою.

```
var tir_img_modis11 = modColl11.median();
var tir_img_modis_u11 =
tir_img_modis11.updateMask(urban);
var tir_mean_modis11 =
ee.Number(tir_img_modis_u11.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale:
100
  })).values().get(0);
var uhi_modis11 = tir_img_modis_u11.expression('(tir -
mean)/mean',{
  'tir': tir_img_modis_u11, 'mean': tir_mean_modis11
}).rename('uhi_modis 11');
```

Метод `.median()` дозволяє створити медіанну композицію із відібраних знімків за обраний період спотереження;

`.updateMask(urban)` – обираємо значення лише ті які лежать у межах урбанізованої маски;

`ee.Number(...)` – дозволяє отримати результат у числовому форматі даних;

`.rename('uhi_modis 11')` – призвоємо ім'я шару, що був створений у цій змінній.

Використання медіанної композиції `.median()` дозволяє зменшити вплив викидів і нетипових погодних явищ на результати, забезпечуючи більш стабільну оцінку температури. Обчислення середньої температури ROI та UHI забезпечує чітке виділення «островів», який дозволяє порівнювати різні міські території та роки незалежно від абсолютних значень температури.

3.1.5 Класифікація інтенсивності UHI

Для спрощення аналізу UHI класифікується на п'ять класів за інтенсивністю:

1. Weak – Слабкий;
2. Middle – Помірний;
3. Strong – Сильний;
4. Stronger – Дуже сильний;
5. Extreme – Екстремальний.

Ця класифікація дозволяє візуально та аналітично оцінювати просторове розподілення теплових островів на території міста.

```
var uhi_class_modis11 =  
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis11.gte(-0.18).and(uhi_  
modis11.lt(-0.05)), 1)  
  
.where(uhi_modis11.gte(-0.05).and(uhi_modis11.lt(0)), 2) /  
  
.where(uhi_modis11.gte(0).and(uhi_modis11.lt(0.055)), 3)  
  
.where(uhi_modis11.gte(0.055).and(uhi_modis11.lt(0.13)),  
4)  
  
        .where(uhi_modis11.gte(0.13), 5)  
        .updateMask(urban)
```

Метод `.where()` дозволяє задати діапазон значень для кожного з класів створюючи умову яких значень може набувати шар з UHI.

Класифікація УНІ за інтенсивністю забезпечує легку для візуальної та аналітичної інтерпретації карту міських теплових островів. Вона дозволяє оцінити територіальний розподіл теплового стресу, ідентифікувати райони з високим ризиком перегріву та планувати заходи щодо зелених зон або урбаністичного моделювання. Використання п'яти рівнів інтенсивності забезпечує достатню деталізацію без надмірного ускладнення карти.

3.1.6 Аналіз результатів

3.1.6.1 Мультирічний аналіз та обчислення характеристик

У методику включено проведення порівняння УНІ у різні роки. Для кожного року обчислюються такі характеристики:

- Мінімальна, середня та максимальна LST;
- Аналіз площі УНІ по класах інтенсивності;
- Мапи УНІ для кожного з років;
- Середні УНІ по містах Донецької області відповідно до року дослідження.

Ці показники дозволяють оцінити динаміку теплових міських островів та просторові зміни інтенсивності міського нагріву землі.

3.1.6.2 Візуалізація та аналіз результатів

Результати аналізу будуть відображено у вигляді:

- Тематичних карт УНІ та їх класів;
- Таблиця площі УНІ по класах інтенсивності та гістограма;
- Графіки середнього УНІ для міст Донецької області;

– Динаміки середньої температури впродовж 14 років.

Це дозволяє наочно візуалізувати тенденції розширення чи зменшення теплових островів, вплив воєнних дій на території області та оцінити ефективність урбаністичного планування та вплив зелених зон на локальні температури. Візуалізація даних за допомогою карт, графіків розподілу та середніх значень по містах забезпечує наочне сприйняття та дозволяє робити висновки про ефективність заходів планування та управління міським середовищем. Період спостережень до 14 років дозволяє оцінити довгострокові тенденції та аномалії температурного режиму, під час початку військових дій ще у 2014 році, так і з початком повномасштабного вторгнення.

На рисунку 3.1.6.2.1 представлено блок-схему алгоритму реалізації.

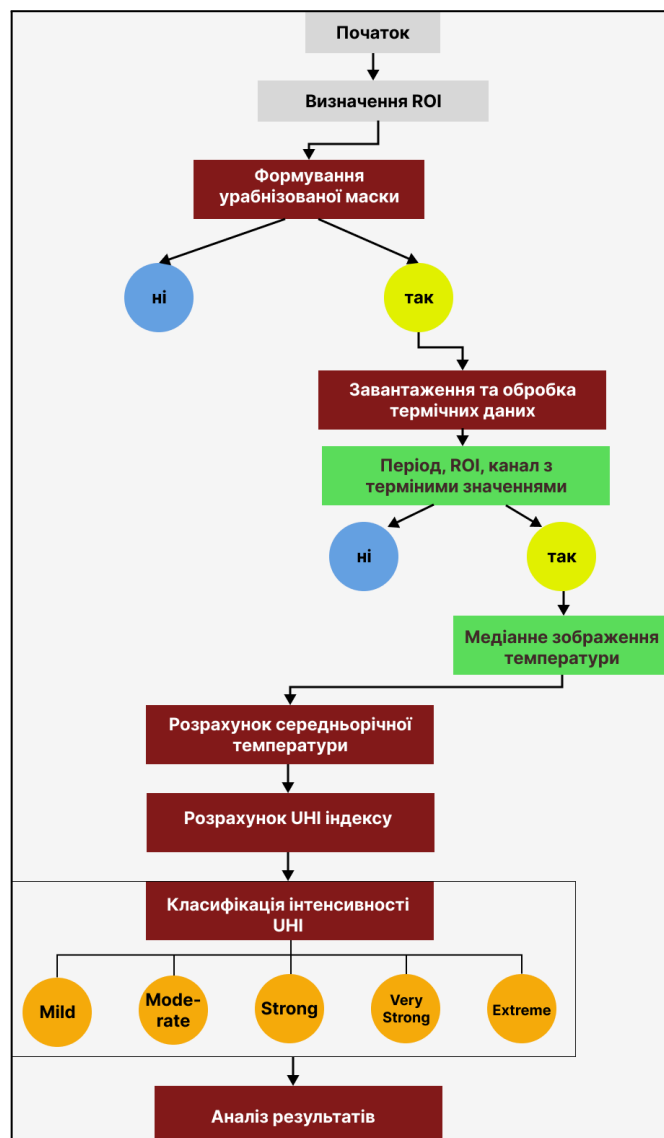


Рисунок 3.1.6.2.1. Блок-схема алгоритму реалізації

3.2 Практична реалізація алгоритму

У цьому розділі представлено практичну реалізацію методики геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій за допомогою супутникових даних MODIS та інструментів платформи GEE. Послідовність етапів відповідає структурі алгоритму, поданого у розділі 3.1, та включає визначення меж дослідження, формування урбанізованої маски, обробку термічних даних, розрахунок індексу UHI, класифікацію інтенсивності та візуалізацію отриманих результатів.

Скрипт для реалізації методики за 14 років, а саме за роки : 2011, 2014, 2020, 2022 та 2025, наведено у Додатку А.

3.2.1 Визначення області дослідження

На першому етапі було сформовано просторові межі області дослідження (Region of Interest, ROI). Для цього використано адміністративні межі рівня 1 із набору даних **FAO GAUL**. Отримані межі дозволяють коректно обмежити обчислення температури поверхні землі та індексу теплових островів у межах Донецької області.

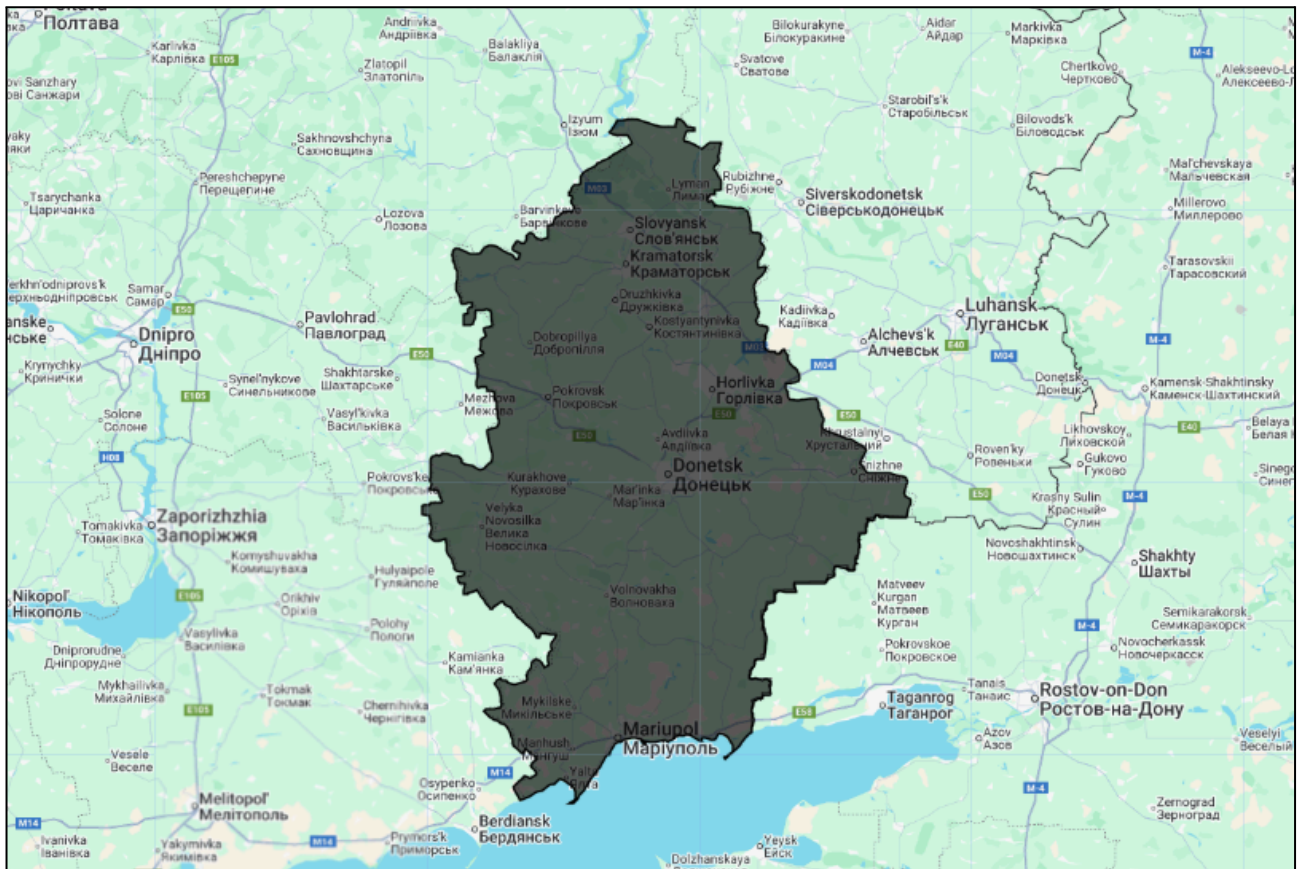


Рисунок 3.2.1.1 – Межі ROI, сформовані на основі даних FAO GAUL (рівень 1)

3.2.2 Формування урбанізованої маски

Маска буде використовуватись для всіх років одна і та сама, станом на 2016 рік. Території міст фактично не змінились, а після початку повномасштабного вторгнення варто надати особливу увагу територіям, які частково втратили землі категорії «urban» в наслідок масштабних руйнувань.

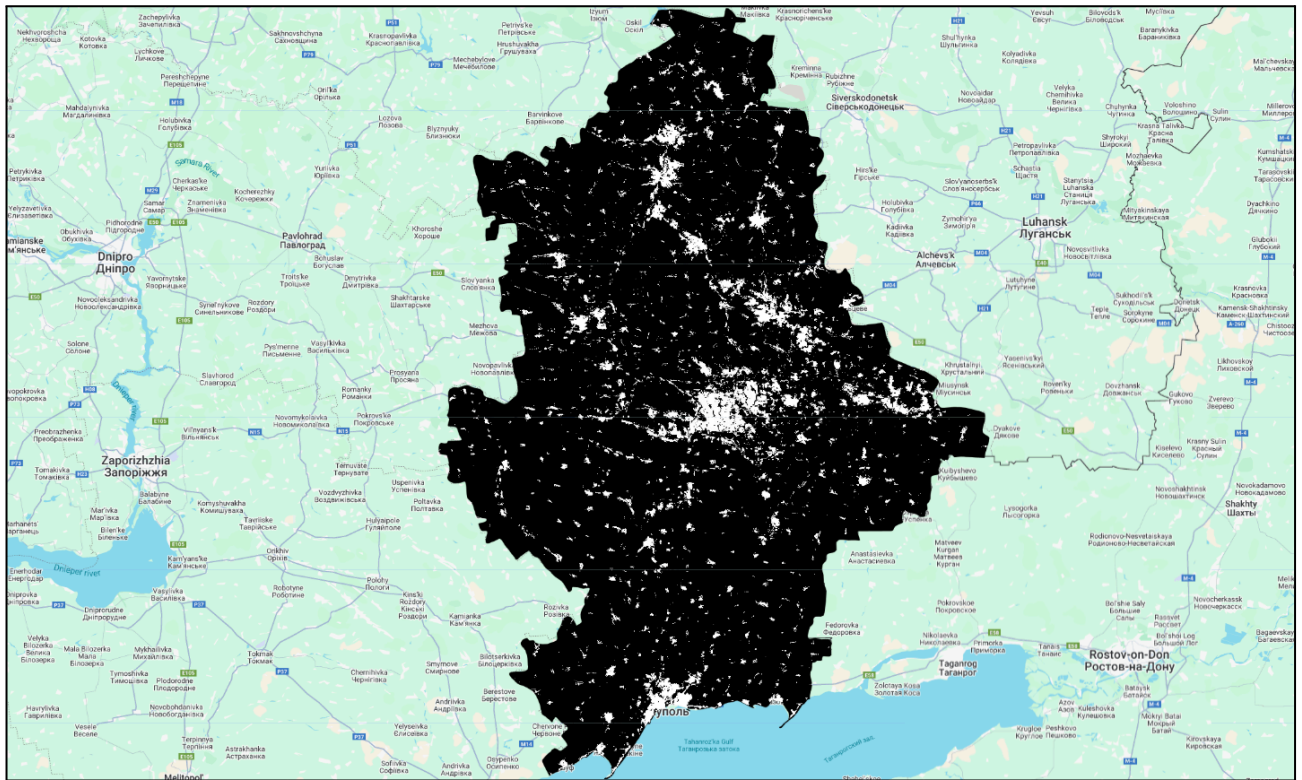


Рисунок 3.2.2.1 – Урбанізована маска на основі даних Dynamic World

Серед маски можна виділити зони великих міст, таких як Донецьк, Горлівка, Маріуполь, Краматорськ, Слов'янськ, Бахмут та Покровськ. Далі ці міста будуть розглядатись більш детально за показником температури та теплових островів.

3.2.3 Завантаження та обробка термічних даних

Для розрахунку температурних характеристик використано продукт MOD11A2.061 Terra LST 8-Day, який містить температуру поверхні (LST) із просторовою роздільною здатністю 1 км та 8-денним періодом оновлення.

Виконано такі операції:

- Фільтрування за періодом травень–вересень для мінімізації сезонних різниць.
- Масштабування значень LST множенням на 0.02. Замість зберігання десяткових чисел MODIS зберігає масштабовані цілі значення, щоб зменшити обсяг даних.
- Перетворення температури з Кельвінів у °C.
- Побудова медіанного зображення для річного узагальнення.

Медіанне зображення формується з допомогою методу `.median()`. Функція `Map.addLayer` дозволяє відобразити результат, з можливістю обмеження по ROI, заданням палетки та назвою, що буде відображена у легенді шарів.

```
var tir_img_modis11 = modCol11.median();  
Map.addLayer(tir_img_modis11.clip(roi), {min: 15, max:  
45, palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red',  
'brown']}, 'tir_median_modis 11')
```

Такі зображення формуються для кожного з обраних років, відображення яких представлено на рисунках 3.2.3.1-3.2.3.5.



Рисунок 3.2.3.1- Медіанна LST за 2011 рік

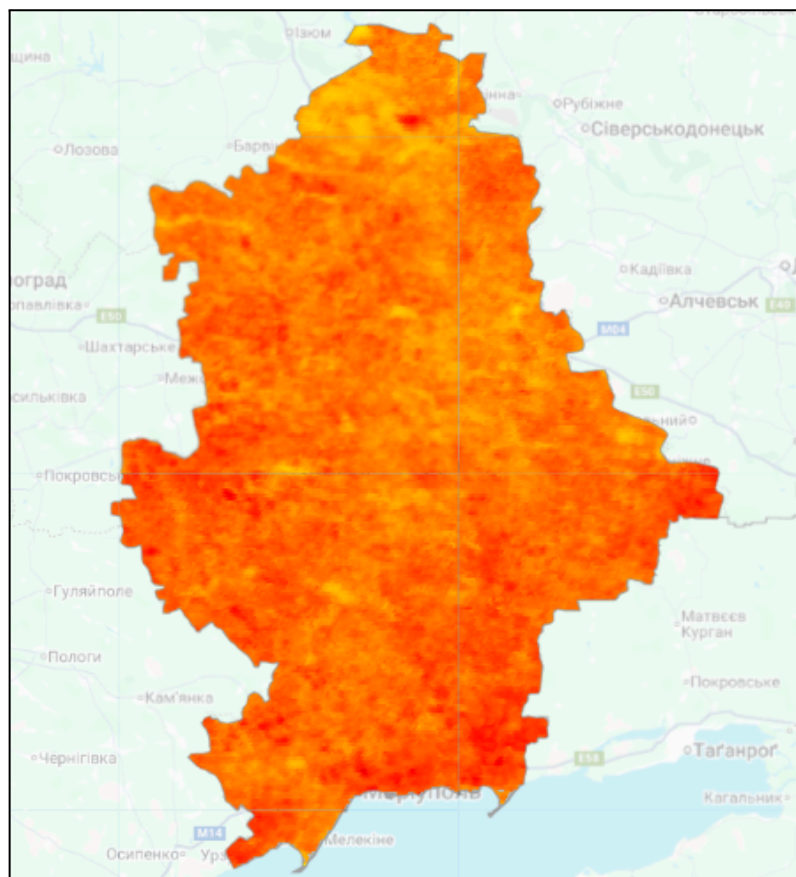


Рисунок 3.2.3.2 – Медіанна LST за 2014 рік

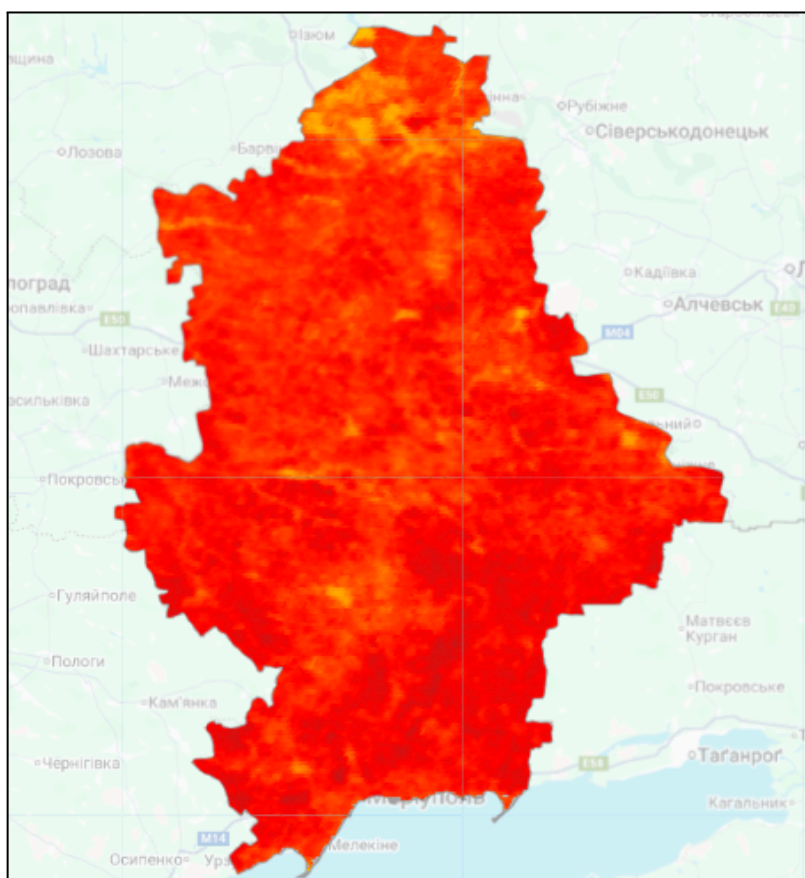


Рисунок 3.2.3.3 – Медіанна LST за 2020 рік

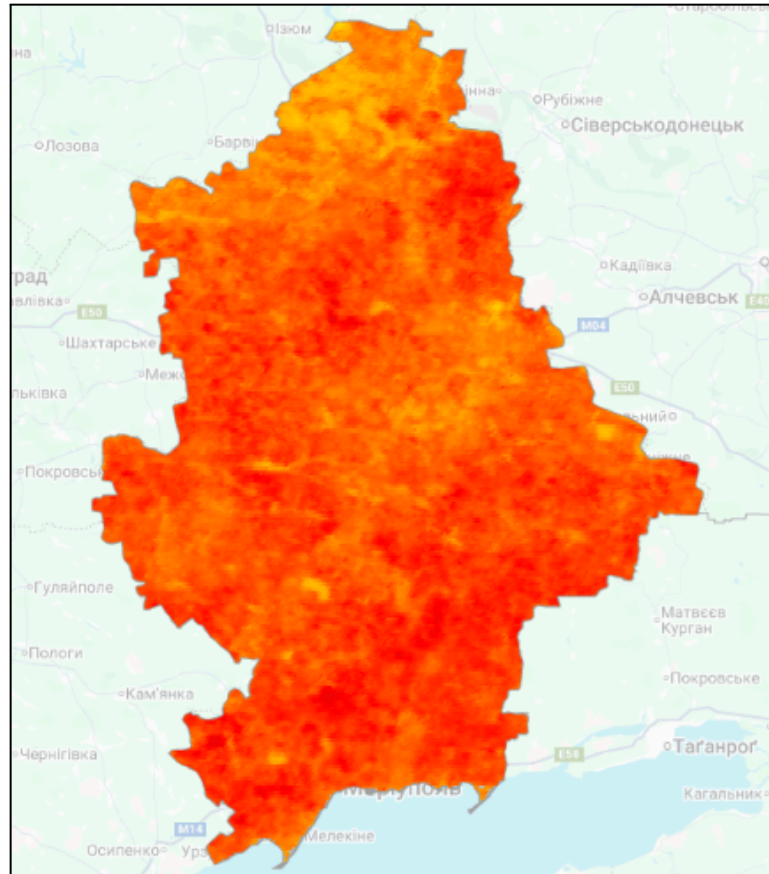


Рисунок 3.2.3.4 – Медіанна LST за 2022 рік

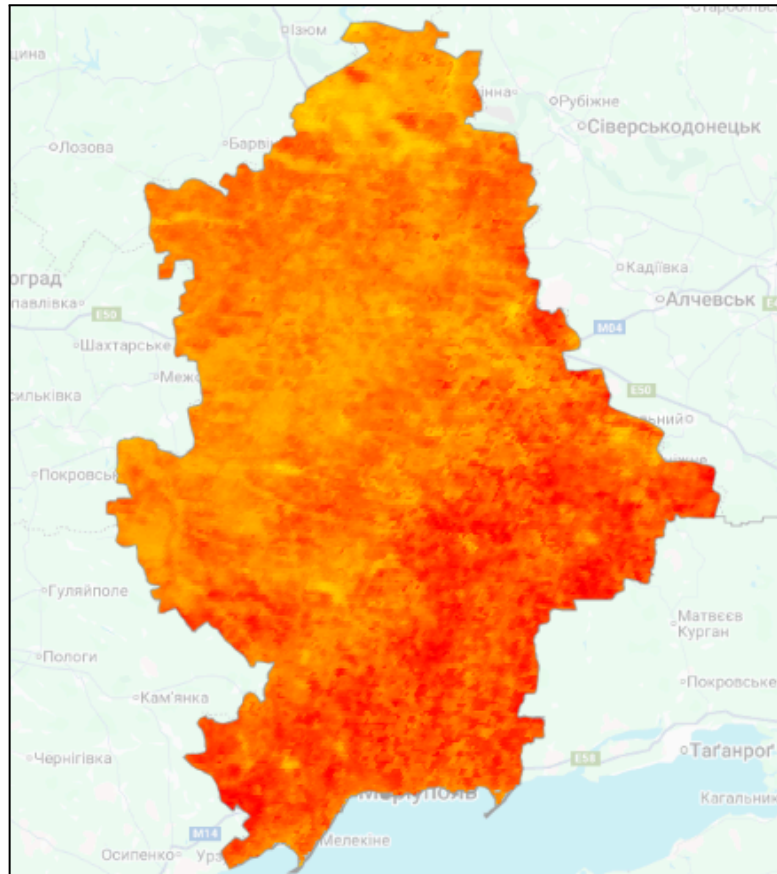


Рисунок 3.2.3.5 – Медіанна LST за 2025 рік

3.2.4 Створення медіанної LST для урбанізованих територій

Для побудови зображення медіанної LST лише для урбанізованих територій використано метод `.updateMask ()`. Таким чином утворюється зображення лише на територіях маски зі значенням «1», тобто зображення медіанної LST перетинається.

```
var tir_img_modis_u11 =
tir_img_modis11.updateMask(urban);
Map.addLayer(tir_img_modis_u11.clip(roi), {min: 10,
max: 45, palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red',
'brown']}, 'tir_median_MODIS 11')
```

Відображення подано на рисунках 3.2.4.1-3.2.4.5.

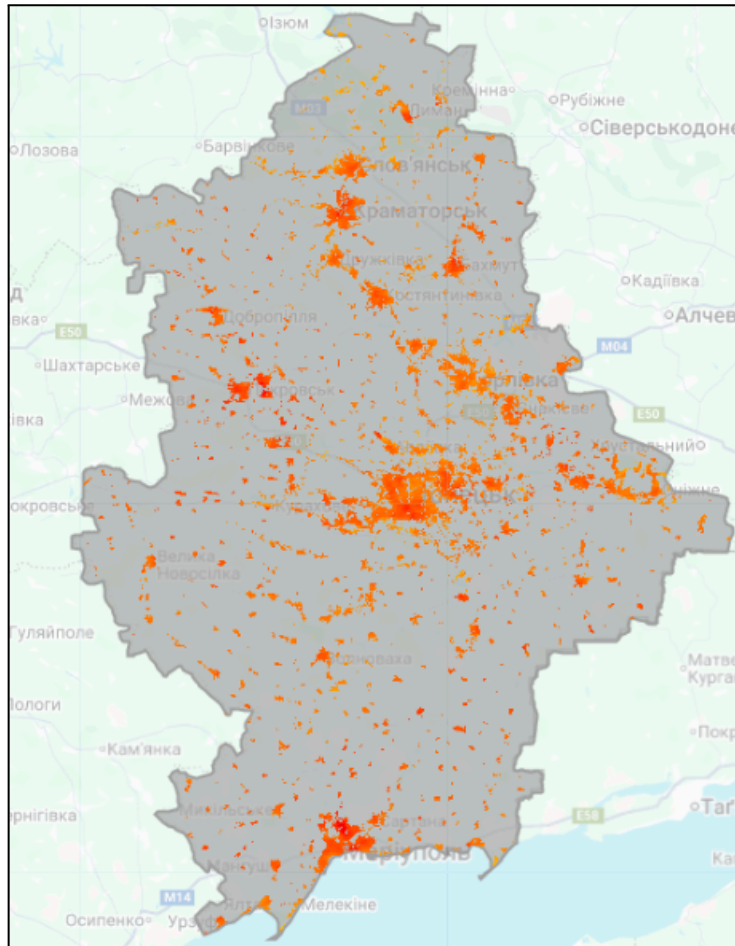


Рисунок 3.2.4.1 – Медіанна LST для урбанізованої території за 2011 рік

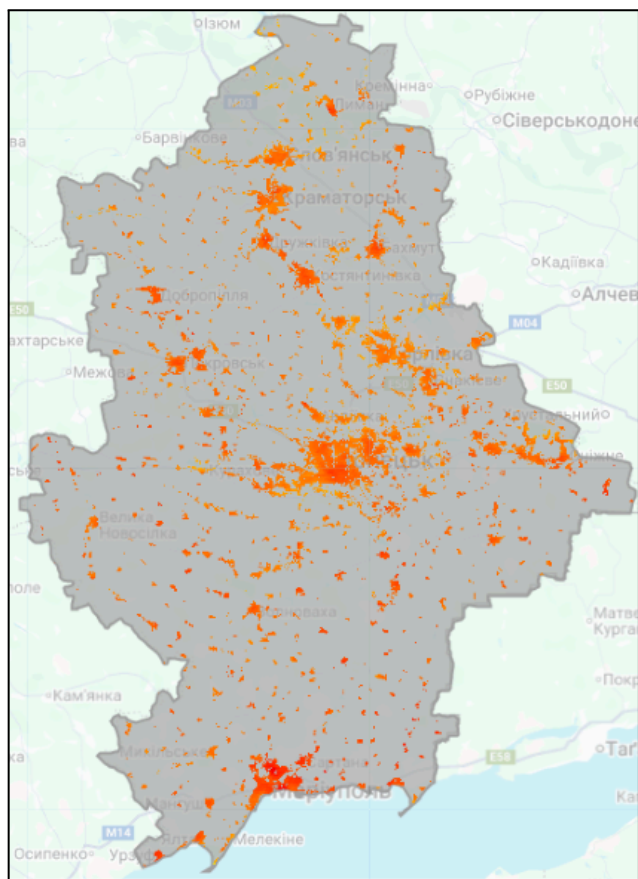


Рисунок 3.2.4.2 – Медіанна LST для урбанізованої території за 2014 рік

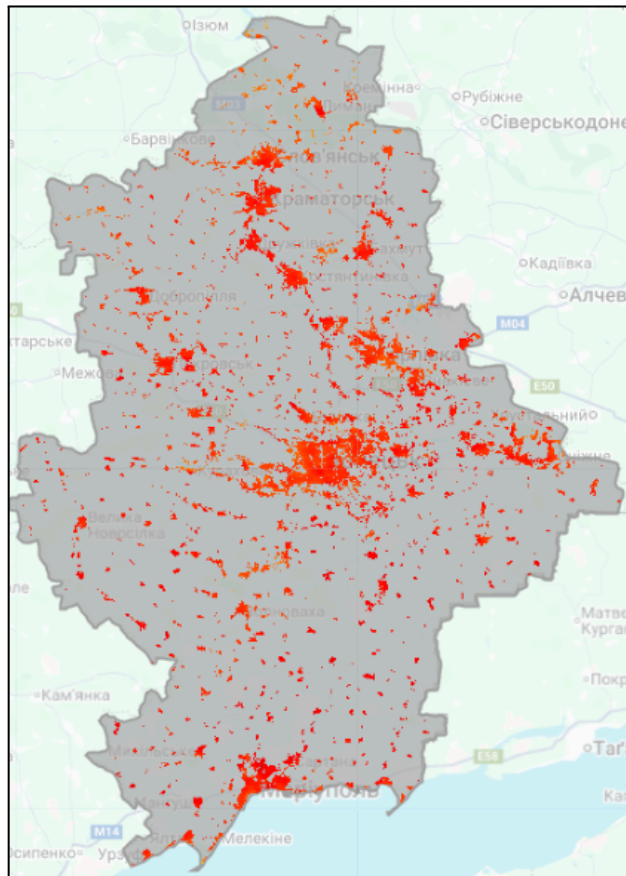


Рисунок 3.2.4.3 – Медіанна LST для урбанізованої території за 2020 рік

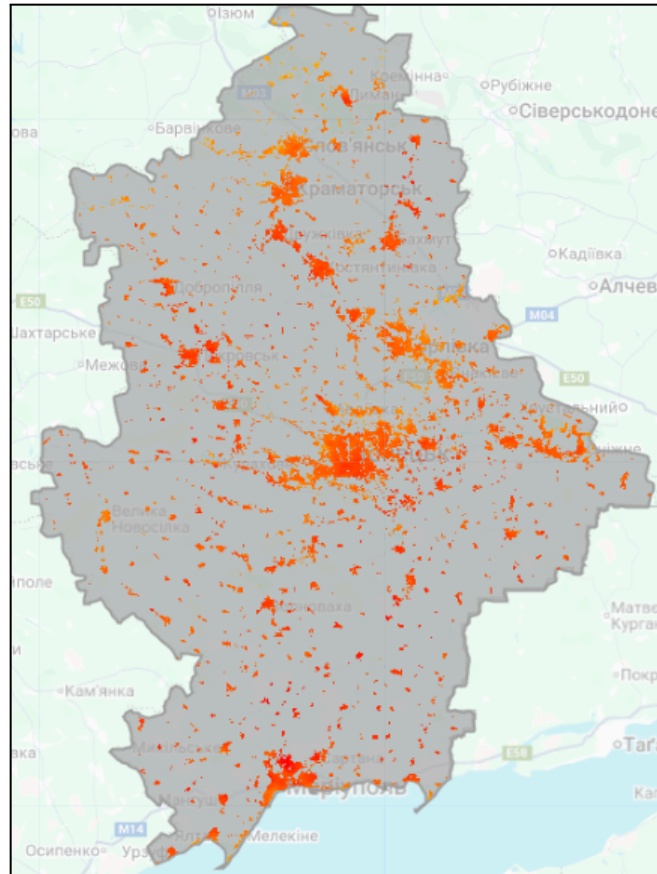


Рисунок 3.2.4.4 – Медіанна LST для урбанізованої території за 2022 рік

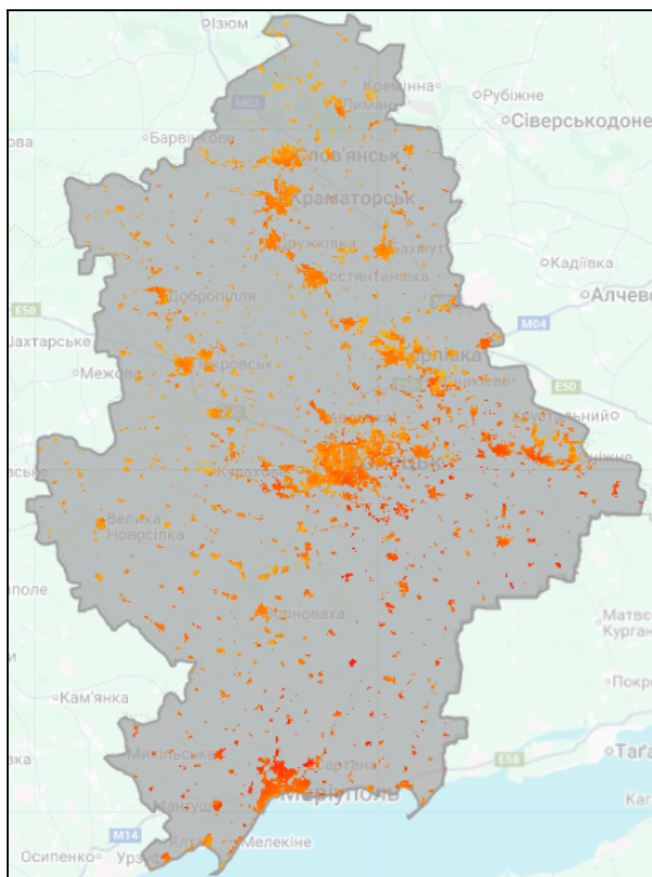


Рисунок 3.2.4.5 – Медіанна LST для урбанізованої території за 2025 рік

Для кожного року виконано розрахунок мінімальних та максимальних значень LST у межах урбанізованої території. Обчислення реалізовано за допомогою редуктора `ee.Reducer.minMax()`, який визначає найменше та найбільше значення з-поміж пікселів. Функції передано такі параметри:

- `geometry` – межі досліджуваної території;
- `scale` – просторове розділення (1000 м), відповідне роздільній здатності продукту MODIS;
- `maxPixels` – максимальна кількість пікселів для обробки, збільшена до $1e13$ для уникнення обмежень під час обчислень.

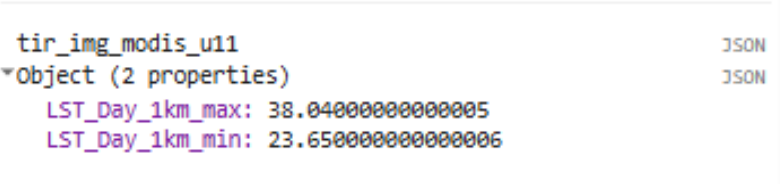
Результат було виведено у вкладку Console.

```
print('tir_img_modis_u11',
tir_img_modis_u11.reduceRegion({
```

```

reducer: ee.Reducer.minMax(),
geometry: roi,
scale: 1000,
maxPixels: 1e13
});

```



```

tir_img_modis_u11                                     JSON
▼ Object (2 properties)                               JSON
  LST_Day_1km_max: 38.040000000000005
  LST_Day_1km_min: 23.650000000000006

```

Рисунок 3.2.4.6. Максимальне та мінімальне значення температури у Console

Такий обчислення було проведено для кожного з років. Узагальнені результати подано в таблиці 3.3.1.

3.2.5 Розрахунок середньої температури та індексу теплових островів (УНІ)

Після формування медіанного зображення температури поверхні для урбанізованих територій виконується:

- Розрахунок середньої температури в межах urban;
- Обчислення індексу УНІ за формулою 3.1.4.

Розрахунок середньої температури урбанізованої території

Для отримання середнього значення LST у межах урбанізованих ділянок застосовується редуктор `ee.Reducer.mean()`, що дозволяє визначити середнє з-поміж пікселів. Параметри `geometry` та `scale` залишаються узгодженими з просторовою роздільною здатністю продукту MODIS (1 км).

```

var tir_mean_modis11 =
ee.Number(tir_img_modis_u11.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
geometry: roi,
scale: 1000
}).values().get(0));

```

У змінну `tir_mean_modis11` записується числове значення середньої температури урбанізованої території за відповідний рік. Це значення використовується на наступному етапі – розрахунок UHI.

Значення середньої температури виводиться у вкладку Console, а розрахунок для кожного обраного року проводиться послідовно.

```
print('tir average modis 11', tir_mean_modis11)
```

Узагальнені результати подано в таблиці 3.3.1.

Розрахунок індексу теплових островів (UHI)

За формулою 3.1.4, за *TIR* – приймається обраховане зображення у змінних `'tir_img_modis_u11'`, MEAN– приймається обраховане зображення у змінних `'tir_mean_modis_11'`.

У результат відображає відносне відхилення температури конкретної ділянки від середньої температури поверхні.

```
var uhi_modis11 = tir_img_modis_u11.expression('(tir -  
mean)/mean',{  
  'tir': tir_img_modis_u11, 'mean': tir_mean_modis11  
}).rename('uhi_modis 11');
```

Отримане зображення дозволяє виявити ділянки з підвищеними значеннями індексу (позитивні значення), що відповідають тепловим аномаліям міського середовища, а також ділянки зі зниженими показниками (низькі або негативні значення), які можуть відповідати зеленим зонам, відкритим водним поверхням або малозабудованим територіям.

Для проведення інтерпретації даних застосуємо класифікацію інтенсивності, визначивши окремі класи.

3.2.6 Класифікація інтенсивності UHI

Класифікація інтенсивності Urban Heat Island є одним із ключових етапів аналізу просторової структури теплових аномалій на урбанізованих територіях. Оскільки величина UHI розраховується як нормалізоване відхилення температури

пікселя від середньої температури урбанізованої зони (формула 3.1.4), отримані значення залежатимуть від реального температурного фону конкретної території.

Враховуючи значення обраховані раніше було встановлено власний діапазон для коректної класифікації інтенсивності та розподілу між класами [33].

Діапазони значень п'яти класів наведено у таблиці 3.2.6.

Таблиця 3.2. Діапазони значень УНІ

Клас	Діапазон УНІ	Класифікація
1	$(-0.18) - (-0.05)$	Weak – Слабкий
2	$(-0.05) - 0$	Middle – Помірний
3	$0 - 0.055$	Strong – Сильний
4	$0.055 - 0.13$	Stringer – Дуже сильний
5	$0.13 >$	Extreme – Екстремальний

Для побудови класифікації використано механізм поетапної заміни значень за умовами - метод `.where()`.

Початковим шаром є однобандове зображення, створене функцією `ee.Image.constant(0)`.

Це зображення містить нульові значення в кожному пікселі і слугує основою, на які поступово накладаються всі класи УНІ. Такий підхід дозволяє формувати класифікацію послідовно й уникнути перезапису вже класифікованих пікселів.

```
var uhi_class_modis11 =  
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis11.gte(-0.18).and(uhi_  
modis11.lt(-0.05)), 1)  
  
.where(uhi_modis11.gte(-0.05).and(uhi_modis11.lt(0)), 2)  
  
.where(uhi_modis11.gte(0).and(uhi_modis11.lt(0.055)), 3)  
  
.where(uhi_modis11.gte(0.055).and(uhi_modis11.lt(0.13)),  
4)  
  
.where(uhi_modis11.gte(0.13), 5)
```

```
.updateMask(urban)
```

Метод `.updateMask(urban)` гарантує, що класифікація застосовується виключно в межах урбанізованої території, визначеної на попередніх етапах.

Класифіковане зображення виведено на карту функцією `Map.addLayer`, що дозволяє відобразити результат, з можливістю обмеження по ROI, заданням палетки для 5 класів та назвою, що буде відображена у легенді шарів.

Параметр `false` встановлено для того, щоб шар не завантажувався активним за замовчуванням, що зменшує навантаження на обчислювальні ресурси та прискорює роботу карти. Для його перегляду необхідно вручну увімкнути шар у вкладці `Layers`.

```
Map.addLayer(uhi_class_modis11.clip(roi), {min: 1, max: 5, palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis 11', false)
```

Відображення класифікованого УНІ за інтенсивністю на рисунках 3.2.6.1-3.2.6.5.

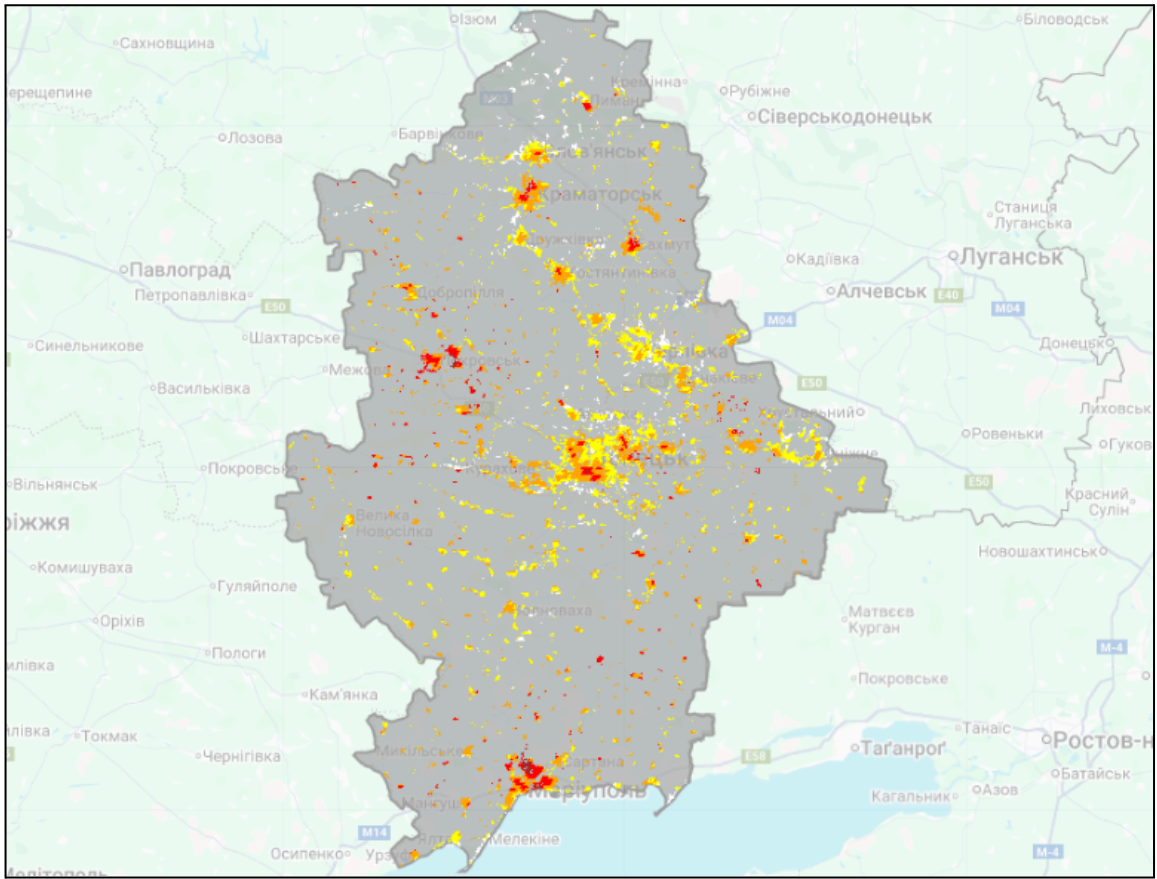


Рисунок 3.2.6.1. Інтенсивність УНІ за 2011 рік

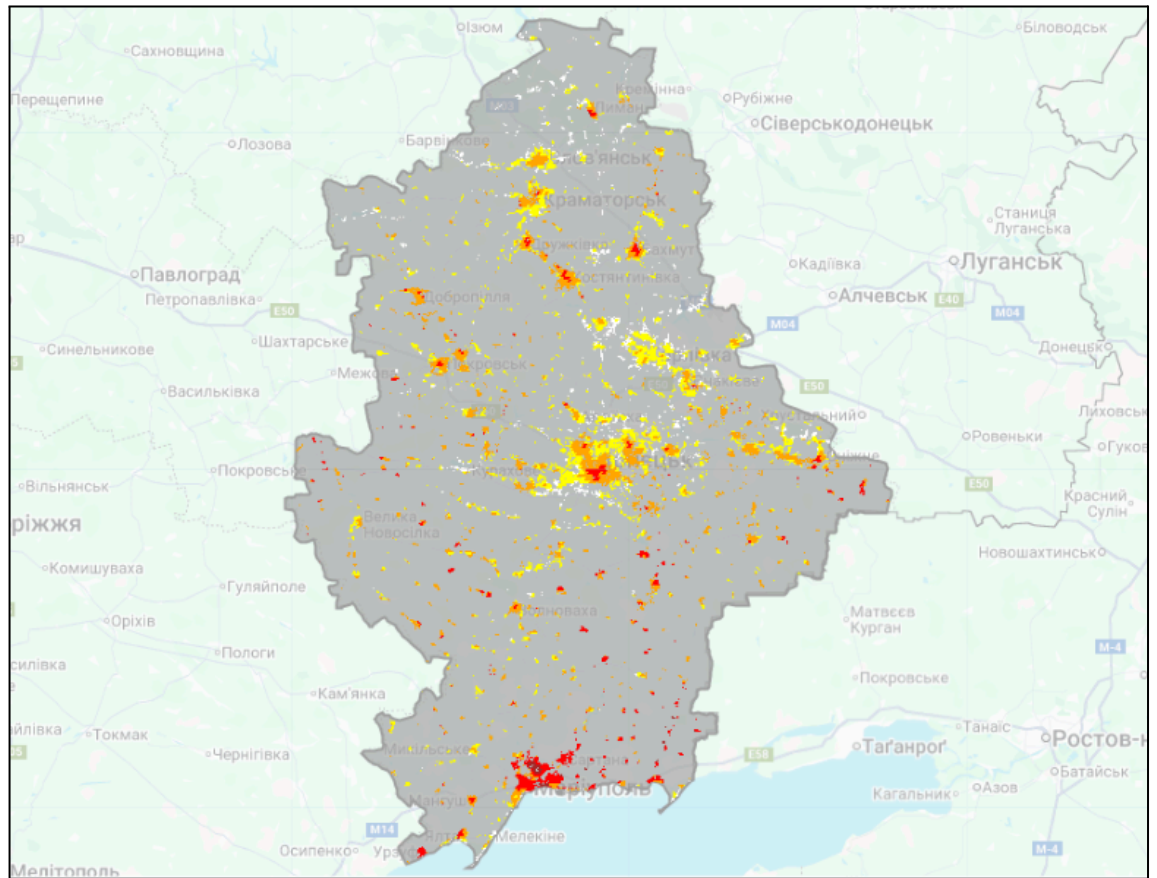


Рисунок 3.2.6.2. Інтенсивність УНІ за 2014 рік

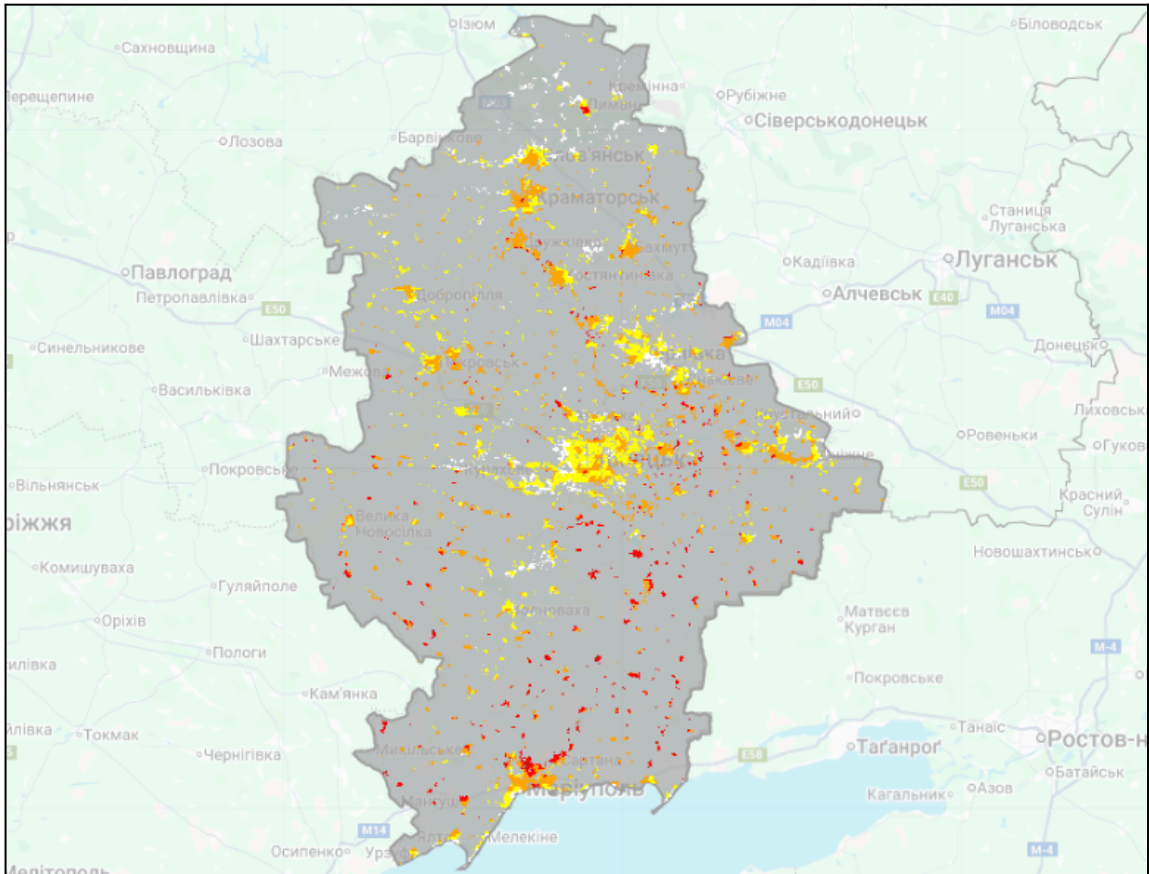


Рисунок 3.2.6.3. Інтенсивність УНІ за 2020 рік

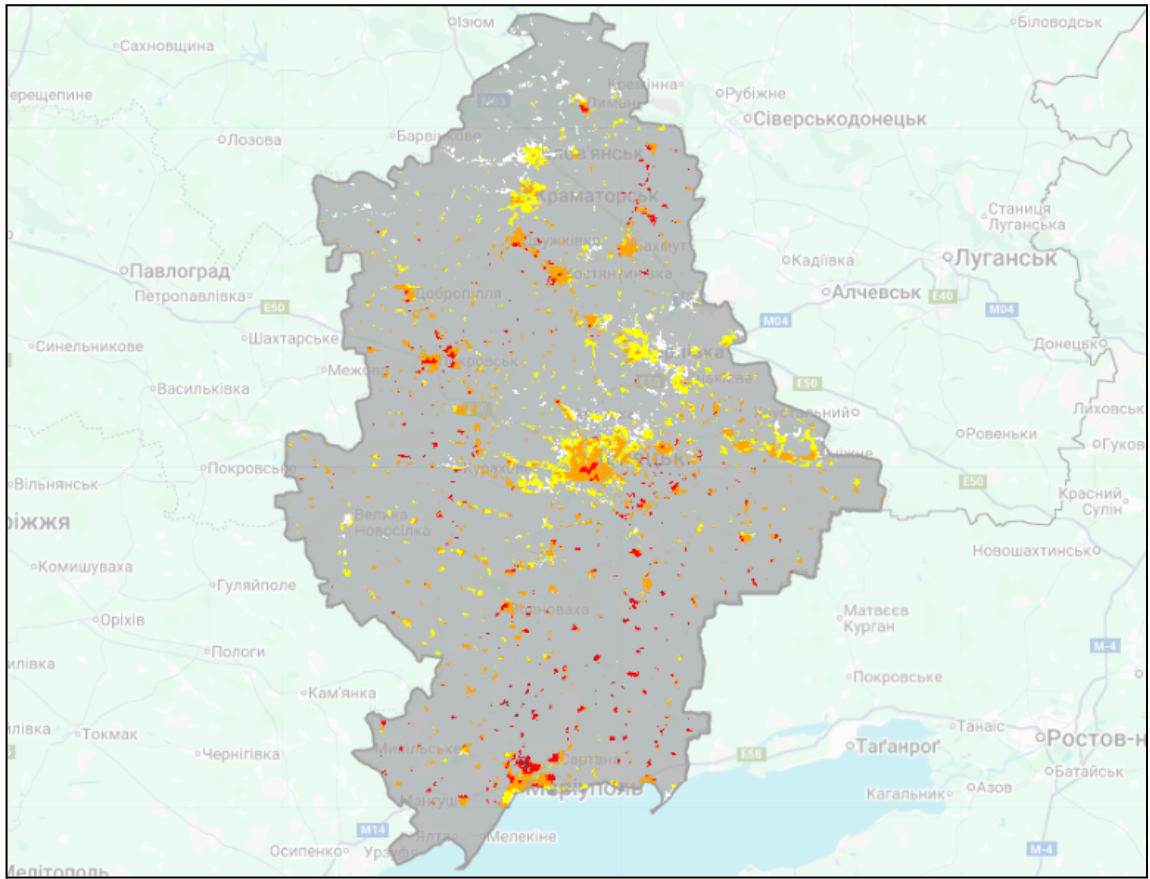


Рисунок 3.2.6.4. Інтенсивність УНІ за 2022 рік

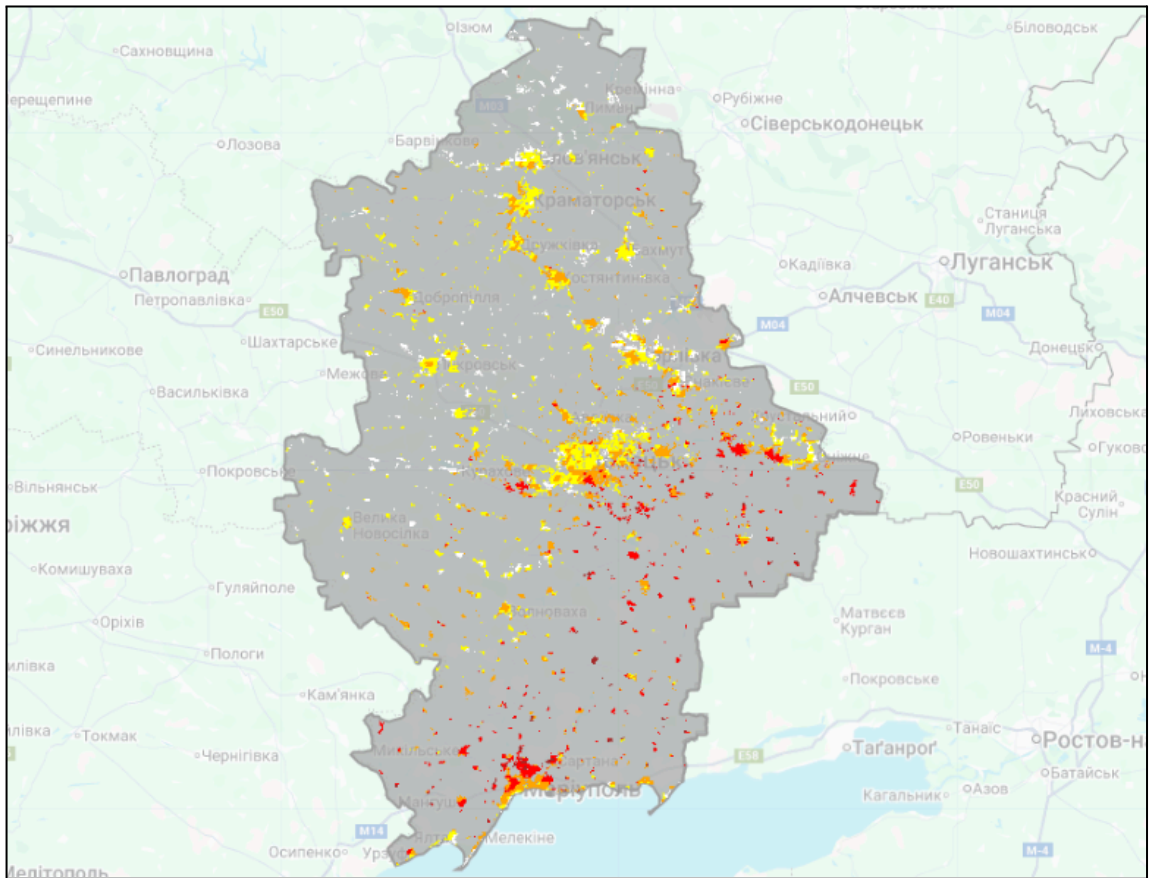


Рисунок 3.2.6.5. Інтенсивність УНІ за 2025 рік

Ці результати дають змогу виявити динаміку теплових аномалій, оцінити просторову структуру теплових осередків та визначити ділянки з найбільшою інтенсивністю формування міських теплових островів.

3.3 Аналіз отриманих результатів

3.3.1 Аналіз мінімальної, максимальної та середньої температури

Отримані дані мінімальних, максимальних та середніх значень медіанної LST наведені в узагальненій таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1. Мінімальні та максимальні значення температури на урбанізованих територіях

Рік	Мінімум, °С	Максимум, °С	Середня, °С
2011	24,88	36,92	30,42
2014	25,15	37,16	30,23
2020	27,78	39,46	34,11
2022	25,51	36,75	31,30
2025	23,79	36,61	29,48

Враховуючи кліматичні показники Донецька [11] за 2011 рік, температура поверхні землі демонструє нестабільні коливання. За даними Гідрометцентру України [12], у 2020 році в Донецькій області випала найменша кількість опадів за останні 11 років спостереження, тобто рік виявився аномально посушливим, спостерігався дефіцит опадів, а тривалість періодів посухи - зросла. Також максимальні показники температури повітря фіксували в липні саме в Донецькій області до +39°C.

Враховуючи вище вказане температуру поверхні у 2020 році, потрібно сприймати як аномалію, ніж за тенденцію. Взагалом коливання температури у всіх показниках становили до 2 °С.

2025 рік показав у всіх характеристиках найнижчі температури, ймовірно через зменшення антропогенного навантаження у воєнний період.

Динаміка середньої температури відображена у додатку Б.

3.3.2 Аналіз площі UHI за класами інтенсивності

Для проведення аналізу було обчислено площу класів відповідно до класифікованих зображень за відповідний рік за допомогою створеної функції `computeAreaPerClass`.

Було створено масив років та масив відповідних класифікованих зображень UHI, де кожне зображення містить значення класу (1–5) для кожного пікселя. Це дозволяє обробляти дані автоматично у циклі.

```
var years = [2011, 2014, 2020, 2022, 2025];
var uhi_images = [
  uhi_class_modis11,
  uhi_class_modis14,
  uhi_class_modis20,
  uhi_class_modis22,
  uhi_class_modis25 ];
```

Функція `pixelArea()` генерує зображення, де кожен піксель містить свою площу в м², так як роздільна здатність зображень 1 км, переведемо обчислення в км², у змінній `areaByClass` площа та клас UHI об'єднуються у двосмугове зображення, де одна смуга містить площу, а інша — номер класу UHI.

```
function computeAreaPerClass(uhi_img, year) {
  var areaImg = ee.Image.pixelArea().divide(1e6);
  var areaByClass =
areaImg.addBands(uhi_img.rename('class'));
```

Функція `reduceRegion()` групує площі за класами, а також використані методи `sum().group()`, які підсумовують значення площ пікселів та групують за класом. Групування відбувається у межах досліджуваної області.

```
var stats = areaByClass.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum().group({
    groupField: 1,
    groupName: 'UHI_class'
```

```

    }),
    geometry: roi,
    scale: 1000,
    maxPixels: 1e13
  });

```

Оскільки `reduceRegion` повертає список лише з тих класів, які присутні в зображенні, було створено спочатку "порожній словник":

```

var empty = {
  class1: 0, class2: 0, class3: 0, class4: 0, class5:
0
};

```

Після чого викликавши функцію, було заповнено реальними значеннями площі.

```

var groups = ee.List(stats.get('groups'));
var empty = {
  class1: 0,
  class2: 0,
  class3: 0,
  class4: 0,
  class5: 0
};
var filled = groups.iterate(function(item, acc) {
  item = ee.Dictionary(item);
  acc = ee.Dictionary(acc);
  var cls =
ee.Number(item.get('UHI_class')).format('class%d');
  var area = ee.Number(item.get('sum'));
  return acc.set(cls, area);
}, empty);

```

Таким чином якщо певного класу немає у конкретному році — таблиця залишається повною.

Заповненні значення перетворюємо в колекцію значень та функцією return заповнюємо обраховані суми площ відповідно до класу у колекцію.

```
filled = ee.Dictionary(filled);
return ee.Feature(null, {
  year: year,
  class1_km2: filled.get('class1'),
  class2_km2: filled.get('class2'),
  class3_km2: filled.get('class3'),
  class4_km2: filled.get('class4'),
  class5_km2: filled.get('class5')
});
}
```

Таким чином, у разі потреби, доповнивши значеннями масив років та масив відповідного зображення, функція підрахує значення і для нового року, що робить функцію автоматизованою. Для експорту значень викличемо її, та сформуємо таблицю значень.

```
var table = ee.FeatureCollection(
  years.map(function(y, i) {
    return computeAreaPerClass(uhi_images[i], y);
  })
);
Export.table.toDrive({
  collection: table,
  description: 'UHI_area_all_years',
  fileFormat: 'CSV'
});
```

Експортуємо таблицю на Google Drive у форматі CVS. Після запуску скрипту почати завантажування можливо у вкладці Tasks (рисунок 3.3.2.1).

Рисунок 3.3.2.1. Експорт таблиці площі значень UHI відповідно до класів інтенсивності

Площі значень UHI відповідно до класів інтенсивності подано у таблиці 3.3.2 та на гістограмі – рисунок 3.3.2.2.

Таблиця 3.3.2. Площі UHI по класах інтенсивності у 2011-2025 рр.

Рік/Клас	Слабкий, км ²	Помірний, км ²	Сильний, км ²	Дуже сильний, км ²	Екстремальний, км ²
2011	229.774	957.878	844.735	211.312	14.896
2014	272.387	906.393	821.17	242.304	16.98
2020	252.664	869.006	922.599	207.548	6.108
2022	314.619	789.259	912.609	229.201	12.893
2025	334.079	772.894	665.701	279.743	37.2

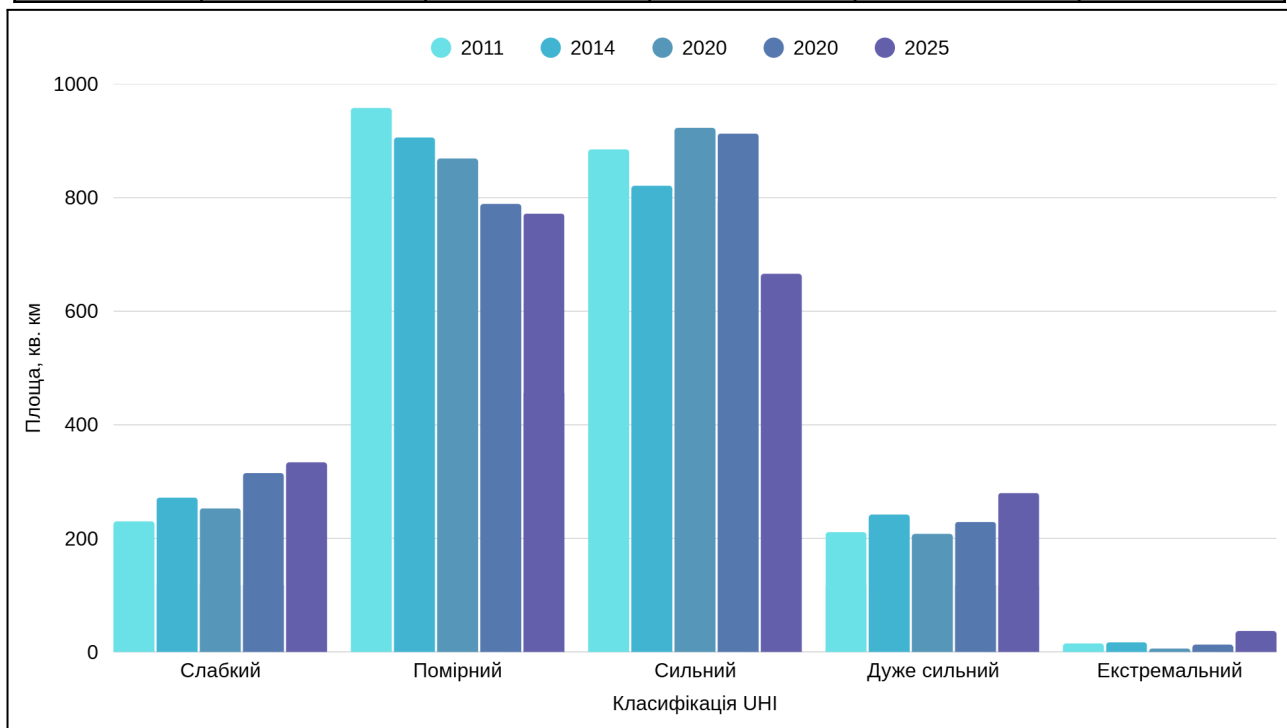


Рисунок 3.3.2. Площі UHI по класах інтенсивності

1. Слабкий UHI (Class 1)

Площі слабкого теплового ефекту поступово зростають протягом усього періоду 2011: 229.77 км², 2025: 334.08 км².

Загальне збільшення — понад 100 км².

Це свідчить про поширення зон початкового теплового збільшення, що може бути пов'язано, наприклад з поступовою урбанізацією периферійних територій або з військовими діями на території.

2. Помірний UHI (Class 2)

Площі класу 2 демонструють стале зменшення: 2011: 957.88 км² → 2025: 772.89 км². Зменшення майже на 185 км².

Така динаміка може пояснюватися тим, що частина територій переходить до інших класів — слабшого або сильнішого, що відображає структурну перебудову теплового профілю урбанізованих територій.

3. Сильний UHI (Class 3)

Цей клас демонструє хвилеподібну динаміку з піком у 2022 році:

- 2011: 844.74 км²
- 2014: спад до 821.17 км²
- 2020–2022: ріст до 912.61 км²
- 2025: різке зменшення до 665.70 км²

Падіння у 2025 р. більше ніж на 240 км² у порівнянні з 2022 р. може свідчити про зміни температурного режиму, або кліматичні особливості року, або вплив факторів, пов'язаних з воєнними діями (зниження або виведення з експлуатації активності промисловості, зменшення транспортного навантаження тощо).

4. Дуже сильний UHI (Class 4)

Площі цього класу змінюються нерівномірно, але мають тенденцію до зростання. Максимум спостерігається у 2025 році.

Загальне збільшення на 68 км² вказує на розширення зон високої теплової інтенсивності, що типово для густозаселених урбанізованих центрів.

5. Екстремальний УНІ (Class 5)

Найвищий клас має невеликі значення, але вони демонструють цікаву динаміку зменшення до 2020. Може свідчити про зменшення інтенсивності урбанізації у зв'язку з початком військових дій на території області, а подальше зростання у 2022–2025 роках спровоковане з масштабними руйнуваннями, використанням вибухової зброї, що додатково підвищує температуру урбанізованих територій. Також під час пожеж, після застосування зброї, вигорає і рослинність, що робить цю територію відкритою і більш вразливою до нагрівання.

3.3.3 Тематичні карти УНІ

На основі класифікації УНІ було побудовано карти просторового розподілу інтенсивності теплових островів для всіх досліджуваних років — 2011, 2014, 2020, 2022 та 2025 рр. Тематичні карти подано у додатках В-Є.

2011 рік

У 2011 році найбільші значення УНІ спостерігаються в Маріуполі, Покровську, Бахмуті та в деяких частинах міста Донецьк.

Це найбільші промислові міста в Донецькій області, переважна територія яких це заводи, фабрики та інші підприємства що здійснюють діяльність пов'язану з вугільною промисловістю.

2014 рік

У 2014 році тенденція зберіглась для Маріуполя, Бахмута та Покровська, проте до цього списку доєдналась Костянтинівка та Дружківка.

Донецьк показав тенденцію до зменшення температури поверхні, скоріше за все це пов'язано з окупацією міста з 2014 року, у зв'язку чим зменшилось пасажиропотік на дорогах та зупинили активність великі підприємства. Підвищення температур також спостерігається у невеликих населених пунктах, які опинились під окупацією.

2020 рік

У 2020 році найбільші значення УНІ залишились лише у Маріуполі. Великі температури продовжують спостерігатися у невеликих населених пунктах, які знаходяться під окупацією. У порівнянні з 2015 роком кількість пунктів зростає.

2022 рік

У зв'язку з початком повномасштабного вторгнення території Донецької області піддавались масштабним військовим діям.

На рисунку 3.3.3.1 відображено ситуацію лінії зіткнення станом на 28.07.2022 року (ресурс – DEEPSTATEMAP) [13].

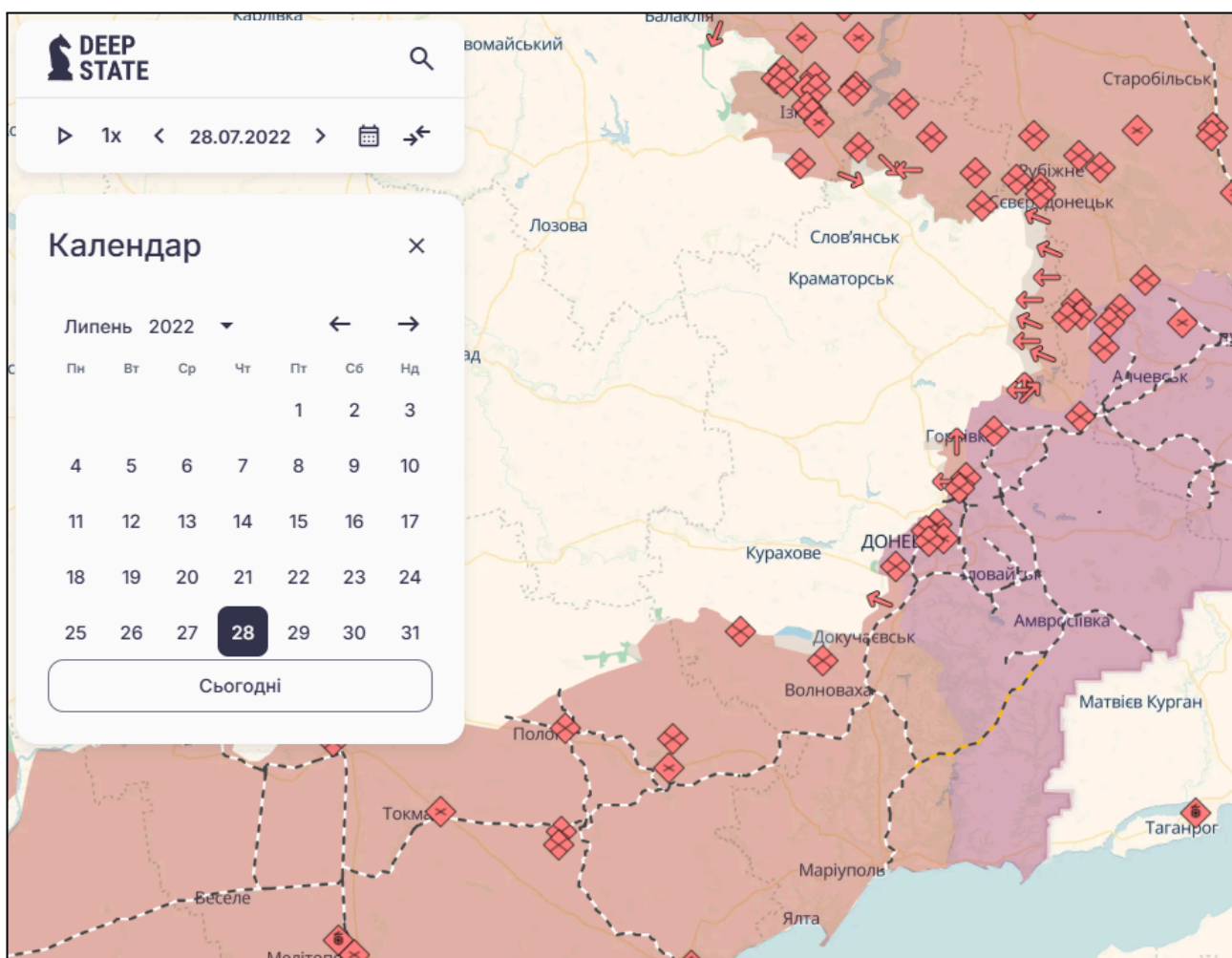


Рисунок 3.3.3.1. Лінія зіткнення на території Донецької області станом на 28.07.2022 р.

Порівнюючи місце положення тимчасово окупованих територій на яких проходять бойові дії із зображення стану УНІ за 2022 рік, населені пункти, що знаходяться нижче населеного пункту Волноваха визначені з найбільшим показником. Також населені пункти від Бахмуту у сторону Луганської області

визначені класом «Екстремальний», на момент літнього періоду у 2022 року, там йдуть інтенсивні бої.

Серед населених пунктів, які знаходяться на неокупованій території, можна виділити міста з високою температурою поверхні, такі як Покровськ, Костянтинівка та Дружківка.

2025 рік

У 2025 році спостерігається різке зменшення температури поверхні. Ймовірно це пов'язано з низькою температурою повітря, у порівнянні з попередніми роками. Проте екстремальні значення продовжують зберігатися у населених пунктах, що нижче Волновахи, в тому числі і Маріуполі.

Також вперше зафіксовано високі показники у Мар'їнці, Шахтарську, Чистяковому та Старобешевому. Всі перераховані пункти знаходяться на тимчасово окупованій території.

Для більш детального дослідження було обрано великі міста, такі як Донецьк, Горлівка, Маріуполь, Краматорськ, Слов'янськ, Бахмут та Покровськ.

3.3.4 Аналіз UHI по містах області

Для поглибленого дослідження впливу урбанізації на температуру поверхні проведено аналіз UHI окремо для найбільших міст області. Для кожного міста визначено середні значення UHI у відповідності до року та локальні ядра нагріву.

Проведено розрахунок середнього значення UHI у межах визначених міст, що геометрію який було завантажено під шаром `cities`. Розрахунок було проведено за аналогією, яку було використано раніше.

```
var city_uhi11 = cities.map(function(city) {  
    var meanUHI_modis11 =  
    uhi_modis_urban11.reduceRegion({  
        reducer: ee.Reducer.mean(),  
        geometry: city.geometry(),  
        scale: 100,  
        maxPixels: 1e13
```

```

    }).get('uhi_modis 11');
    return city.set({
        'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis11)
    });
});

```

У вкладці Console також доступна операція виведення графіків. Сформовані середні значення UHI для кожного з міст будуть виведені у гістограми відповідно до визначених років.

```

var chartcity11 =
ui.Chart.feature.byFeature(city_uhi11, 'name',
['UHI_MODIS'])
    .setChartType('ColumnChart')
    .setOptions({
        title: 'Середній UHI по містах Донецької області
за 2011 рік',
        vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
        hAxis: {title: 'Місто'},
        series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
        legend: {position: 'top'}
    });
print(chartcity11);

```

На рисунках 3.3.4.1-3.3.4.5 відображено гістограми середнього UHI по містах Донецької області.

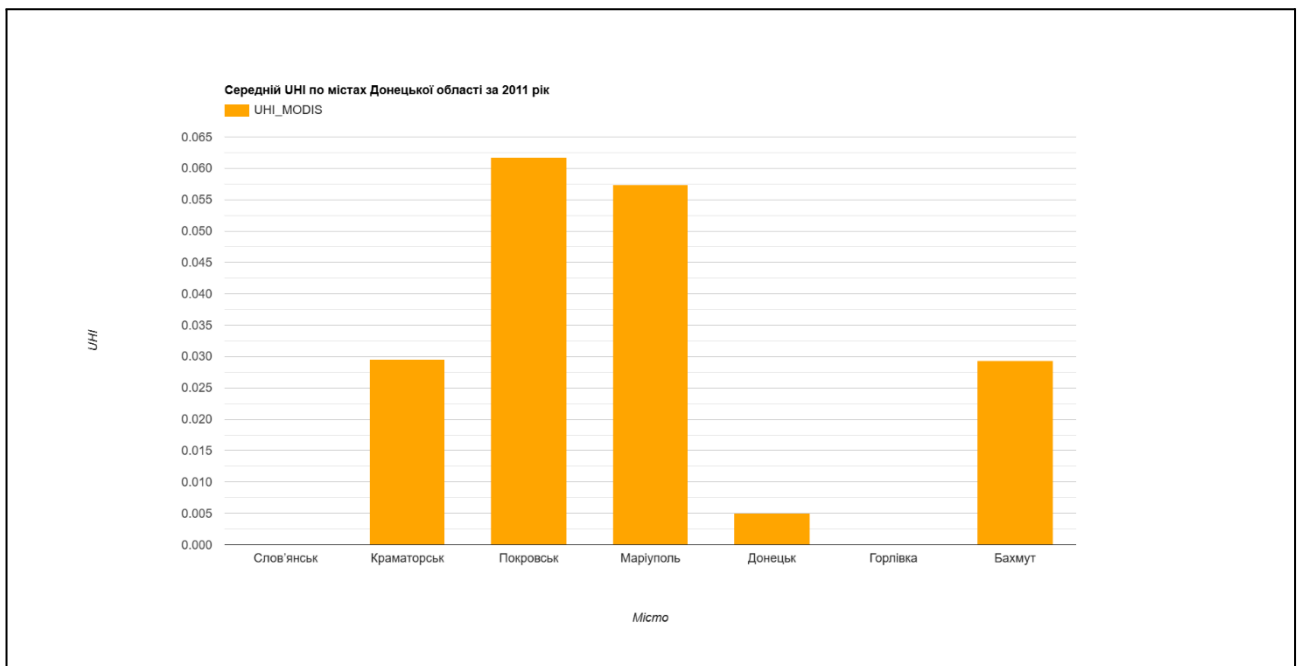


Рисунок 3.3.4.1. Середній UHI по містах Донецької області за 2011 рік

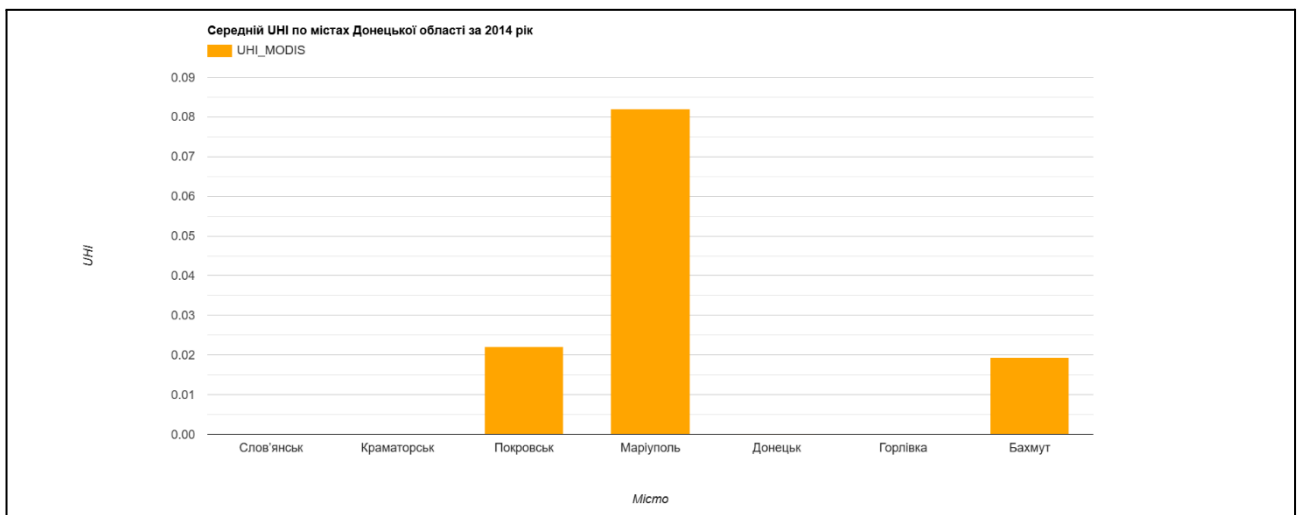


Рисунок 3.3.4.2. Середній UHI по містах Донецької області за 2014 рік

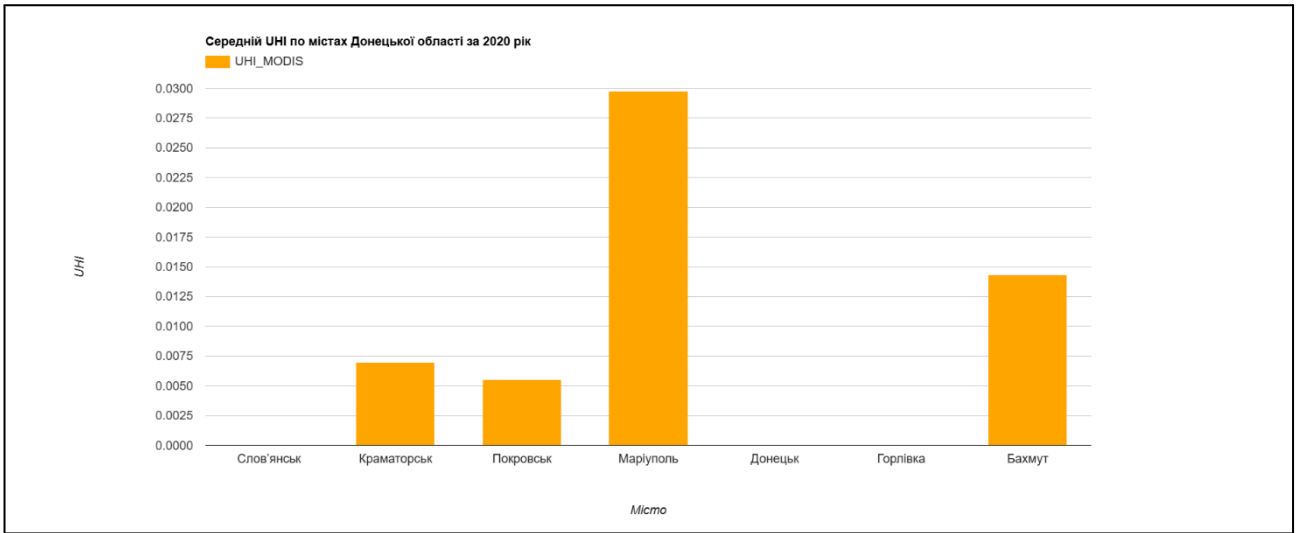


Рисунок 3.3.4.3. Середній UHI по містах Донецької області за 2020 рік

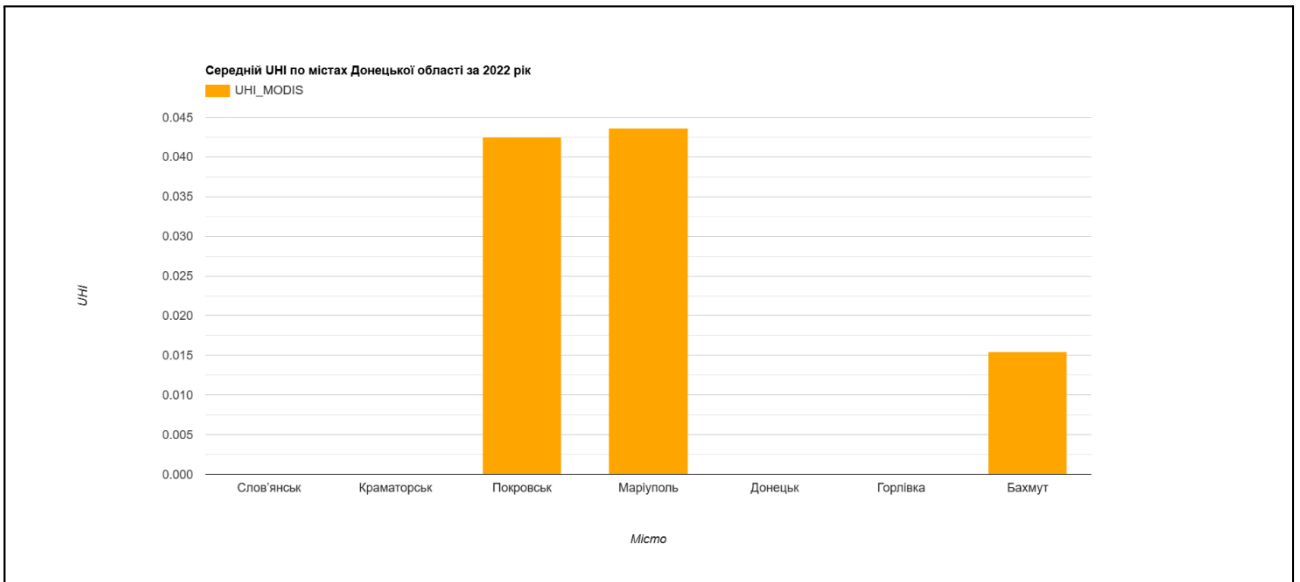


Рисунок 3.3.4.4. Середній UHI по містах Донецької області за 2022 рік

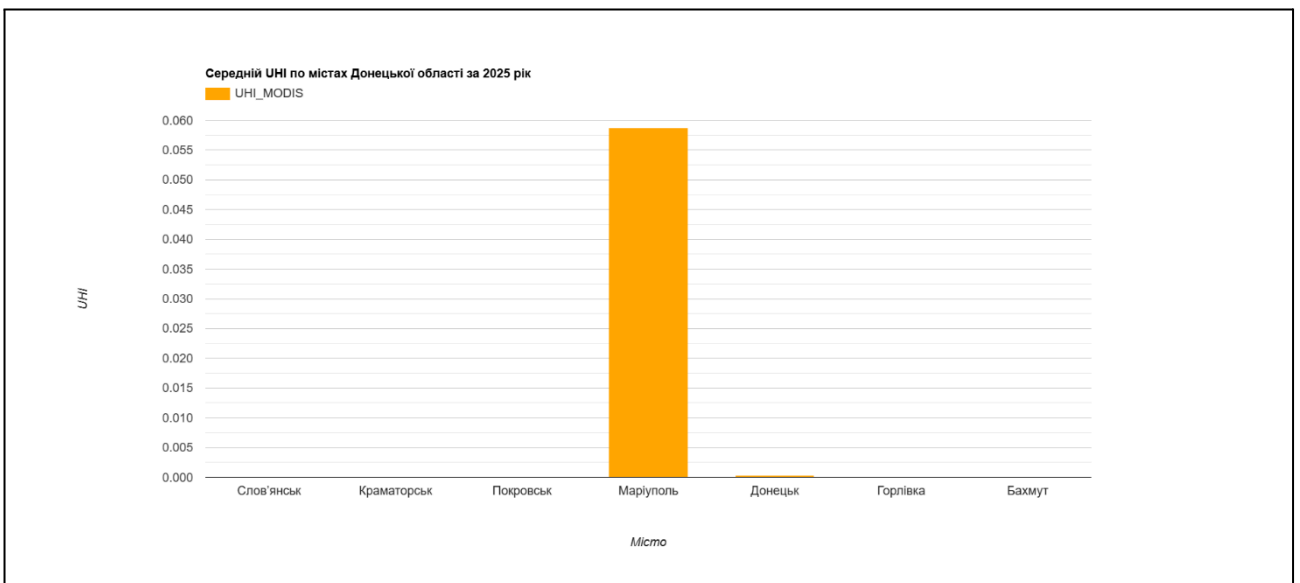


Рисунок 3.3.4.5. Середній УНІ по містах Донецької області за 2025 рік

Як видно з графіків лідером по середньому УНІ є Маріуполь. Великі площі Маріупольських металургійних комбінатів іменні Ілліча та Азовсталь є основними чинниками такого результату дослідження. Навіть після окупації міста площі, що урбанізовані великим промзонами продовжують створювати локальні ядра нагріву у місті.

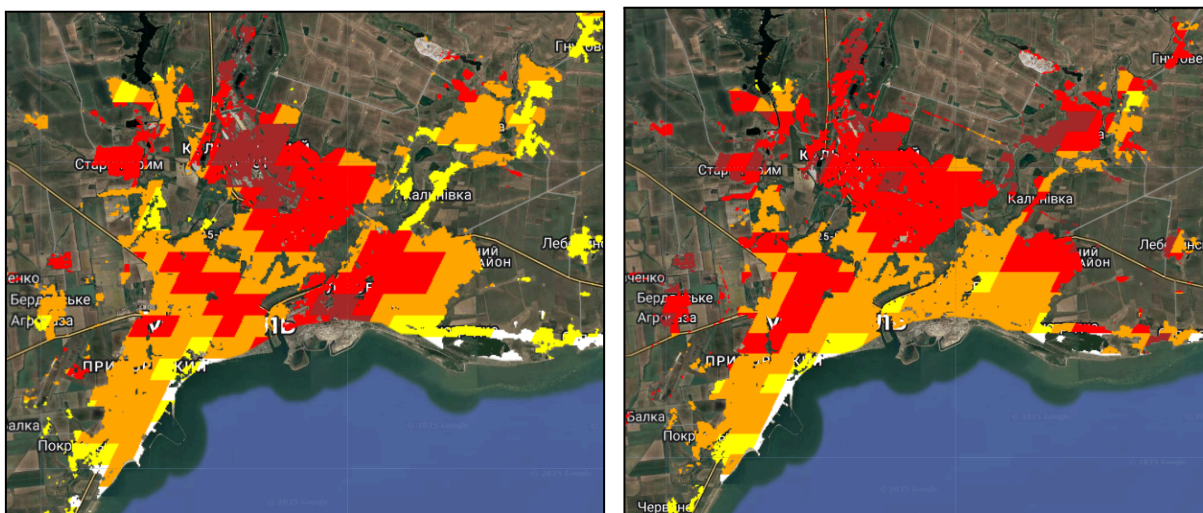


Рисунок 3.3.4.6. Класифіковане зображення УНІ Маріуполя для 2011 (зліва) та 2025 років

Жодних аномалій не було виявлено у Горлівці та Слов'янську за обрані роки. Місто Горлівка знаходиться у тимчасовій окупації з 2014 року, проте з супутникових знімків видно, що між житловими масивами та промисловими об'єктами є велика кількість рослинності, можна припустити що саме вона знижує якісно рівень нагріву.

У Слов'янську схожа ситуація із зеленими насадженнями, та на території міста знаходиться система озер та охолоджувальні ставки ТЕС, що також знижує загальну температуру поверхні.

Інші міста мають локальні ядра нагріву. Порівняльні зображення наведено на рисунках 3.3.4.7-3.3.4.10.

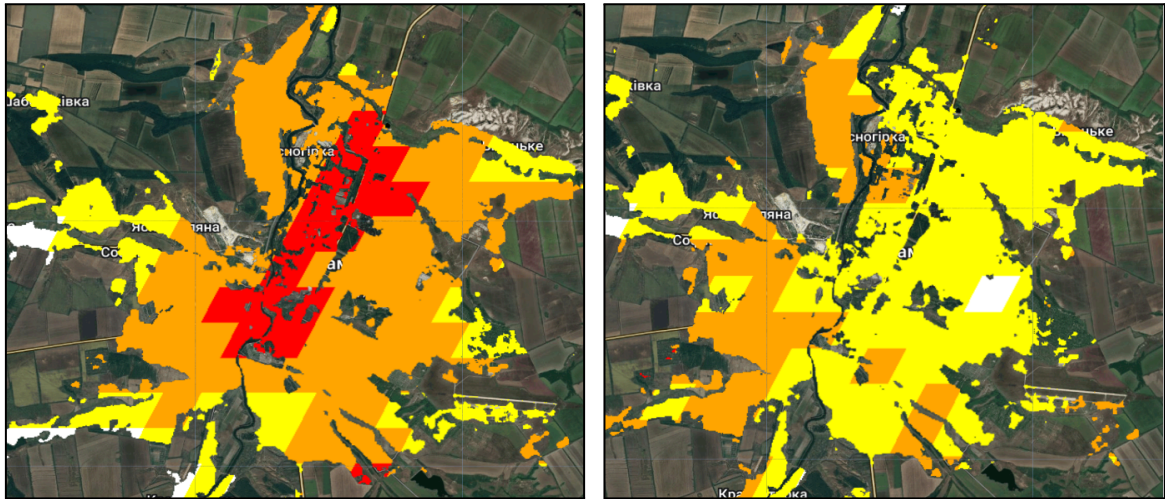


Рисунок 3.3.4.7. Класифіковане зображення УНІ Краматорська для 2011 (зліва) та 2025 років

Основний чинник нагріву – Новокраматорський машинобудівний завод, який з початку повномасштабного вторгнення активно обстрілюється та зменшилась активна робота.

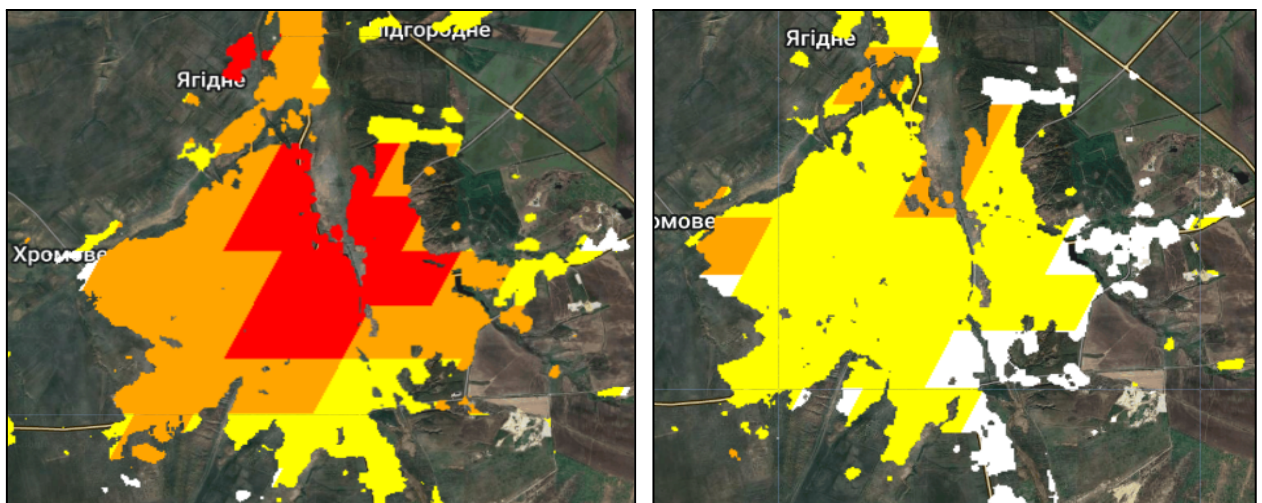


Рисунок 3.3.4.8. Класифіковане зображення УНІ Бахмут для 2011 (зліва) та 2025 років

Основний чинник нагріву – Завод кольорових металів, який станом на 2025 рік зруйновано.

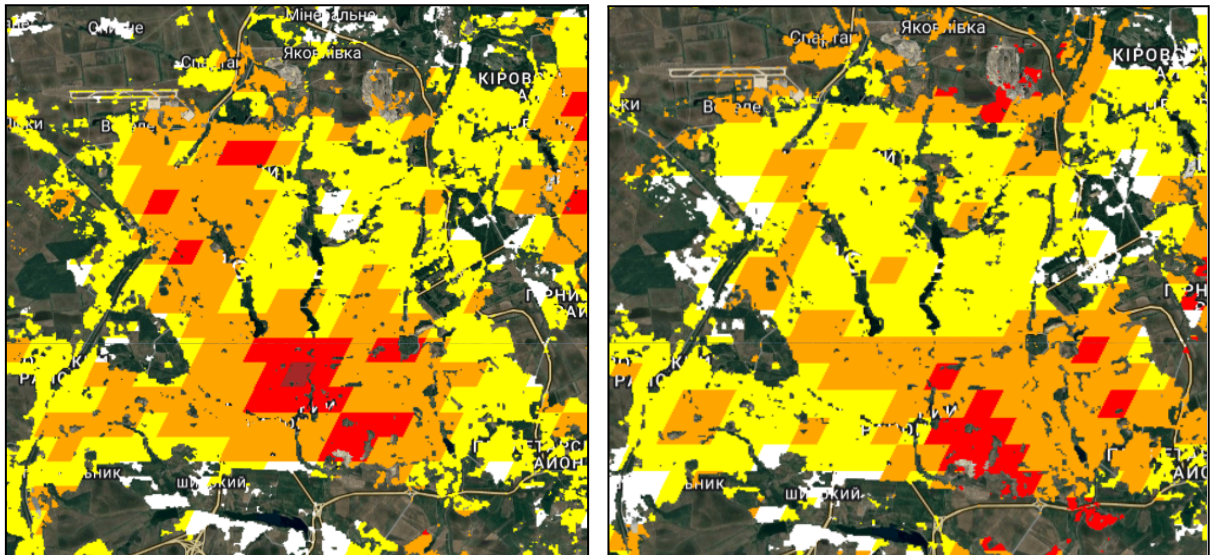


Рисунок 3.3.4.9. Класифіковане зображення УНІ Донецьк для 2011 (зліва) та 2025 років

Основний чинник нагріву у 2011 році – Донецький металургійний завод, у 2025 році фокус змістився південніше – Завод «Ізоляція» та відвали металургійного заводу. Металургійний завод припинив свою діяльність у зв’язку з бойовими діями з 2014 року.

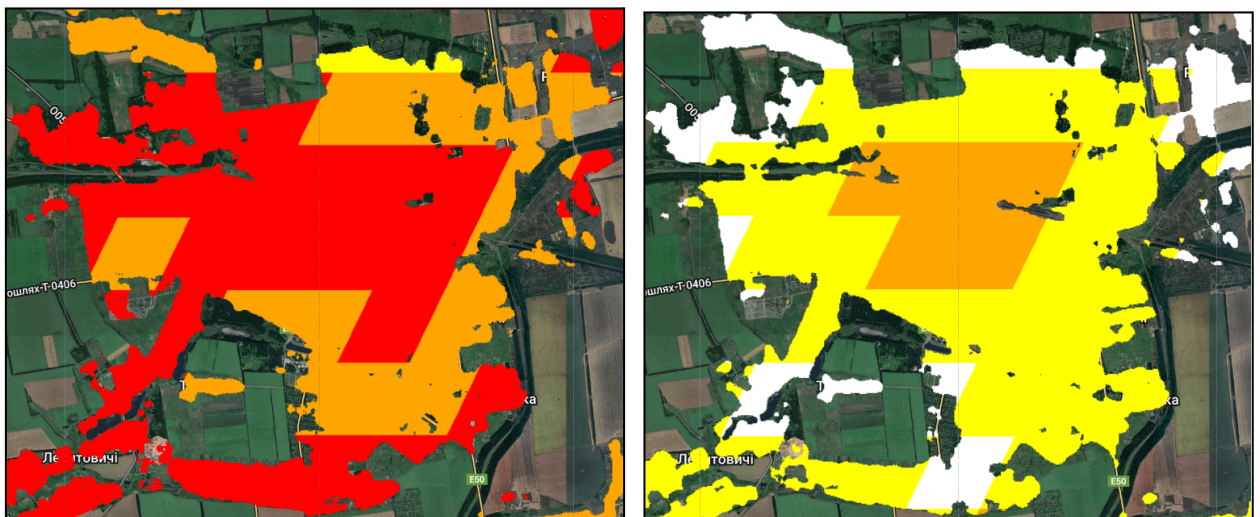


Рисунок 3.3.4.10. Класифіковане зображення УНІ Покровськ для 2011 (зліва) та 2025 років

Основні чинники нагріву у 2011 році – Красноармійський динасовий завод та Покровський завод залізобетонних виробів, у 2025 році вони зберігаються, проте у зв’язку з наближенням лінії фронту – обмежили свою активність.

3.4 Оцінка можливості використання методики

Розроблена методика геоінформаційного моніторингу теплових островів міських територій на основі супутникових даних MODIS хмарних технологій Google Earth Engine має високий потенціал для практичного застосування як у регіональних, так і в локальних дослідженнях. Її ефективність зумовлена поєднанням регулярних супутникових спостережень, автоматизованої обробки великих обсягів даних та застосуванням універсальних геоінформаційних процедур, які забезпечують порівнянність результатів між різними роками.

Комплексність та універсальність підходу

Методика охоплює всі ключові етапи, необхідні для дослідження теплових островів: визначення області дослідження, формування урбанізованої маски, обробку термічних даних, розрахунок середньої температури, обчислення індексу UHI та класифікацію інтенсивності. Така структура забезпечує її універсальність та можливість адаптації до будь-якого регіону, де доступні супутникові дані MODIS і векторні межі адміністративних територій.

Використання адміністративної бази FAO GAUL гарантує уніфікованість меж ROI, що особливо важливо для багаторічних та міжрегіональних порівнянь. Формування стабільної урбанізованої маски на основі даних Dynamic World дозволяє відокремити міські території та зосередити аналіз саме на ділянках з підвищеним ризиком перегріву.

Можливість повторного застосування та масштабованість

Однією з ключових переваг методики є її масштабованість — усі етапи реалізовано у середовищі GEE, що забезпечує:

- автоматизоване повторення аналізу для різних років або регіонів,
- високу продуктивність обробки великого обсягу супутникових даних,
- можливість оперативного оновлення результатів при надходженні нових знімків.

Скрипт, розроблений у межах дослідження, дозволяє формувати карти УНІ, температурні композити, таблиці площ за класами інтенсивності, графіки динаміки температури та інші аналітичні матеріали. Це робить методику придатною для регулярного моніторингу стану міських територій та оперативного реагування на зміни.

Точність та обмеження методики

Використання медіанних композитів підвищує стабільність оцінок, однак варто враховувати, що просторове згладжування MODIS може занижувати локальні пікові значення. Методика не фіксує дрібномасштабні температурні аномалії, характерні для окремих кварталів чи промислових ділянок. Проте для рівня області це обмеження не є критичним, оскільки метою є виявлення регіональних закономірностей УНІ, а не детальний аналіз мікроклімату.

Також використання урбанізованої маски, побудованої на основі даних Dynamic World, дозволяє коректно визначити структуру міських територій, але не враховує можливі інфраструктурні руйнування та зміни забудови після початку бойових дій. Це може впливати на локальні оцінки УНІ у містах, що зазнали значних пошкоджень.

Практична значущість та перспективи

Методика показала високу ефективність при застосуванні до Донецької області, дозволяючи:

- оцінити динаміку міських теплових островів за 14-річний період,
- виявити просторові закономірності підвищеного теплового навантаження на міські території,
- порівнювати середні значення УНІ між містами області,
- аналізувати вплив урбанізації та руйнувань на температурний режим міст.

Отримані результати можуть використовуватись органами місцевого самоврядування, урбаністами, екологами та структурами по відновленню інфраструктури.

Таким чином, методика є надійною, реплікованою та масштабованою, що робить її придатною для багаторічного моніторингу регіональних УНІ, оцінки впливу урбанізації, кліматичних змін та руйнувань, а також дозволяю здійснювати планування зелених зон, оптимізації міського простору.

ВИСНОВОК

У роботі розглянуто комплексне вивчення проблеми формування та розвитку теплових островів міських територій (УНІ) із залученням сучасних наукових підходів та супутникових методів спостереження. На основі аналізу літературних джерел було визначено ключові чинники виникнення теплових аномалій, серед яких домінують щільна забудова, низька частка зелених насаджень, трансформація землекористування та антропогенне теплове навантаження. Особлива увага була приділена оцінці ефективності геоінформаційних технологій та дистанційного зондування Землі у виявленні просторової структури УНІ та відстеженні їх динаміки.

В основу розробки методики для геоінформаційного моніторингу було покладено підхід, що дозволяє використання багатоспектральних супутникових даних (MODIS, Landsat, Sentinel-2) та методів просторового аналізу для побудови надійної системи моніторингу температури міських поверхонь. Інтеграція індексів земного покриву, розрахунку температури поверхні (LST), фільтрації та узгодження урбанізованих масок забезпечила можливість проводити міжрічне порівняння, зменшити вплив неоднорідності даних та отримати узгоджену картину теплових процесів. Методика враховувала низку практичних обмежень, зокрема хмарність, різну роздільну здатність сенсорів та доступність архівних зображень, що дало змогу підвищити точність і стабільність отриманих результатів.

Дослідна реалізація методики дозволила визначити наявність інтенсивних та стійких зон перегріву у великих містах Донецької області, їх поступове розширення в окремі роки, а також локальні зміни, пов'язані з трансформацією землекористування та впливом воєнних дій. Застосування класифікації інтенсивності теплових аномалій забезпечило зручність інтерпретації результатів та можливість їх використання для аналітичних потреб. Стійкий високий показник індексу УНІ показував Маріуполь, як до початку військових дій, під час та після. Це доводить, що військові дії є додатковим чинником підвищення температури поверхні, але не основним. Територія промислових зон піддається нагріву навіть не функціонуючи.

Загалом проведене дослідження підтвердило ефективність поєднання супутникових даних та геоінформаційних технологій для моніторингу теплових островів міських територій. Розроблена методика може бути використана як основа для систематичного спостереження, оцінювання екологічного стану урбанізованих зон, визначення проблемних ділянок та підтримки рішень у сфері просторового планування, екологічної політики та адаптації до кліматичних змін. Отримані результати мають практичну цінність та можуть слугувати фундаментом для багаторічного моніторингу регіональних УНІ, оцінки впливу урбанізації, кліматичних змін та руйнувань, а також дозволяють здійснювати планування зелених зон, оптимізації міського простору.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 р. № 1264-ХІІ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
2. Закон України «Про моніторинг навколишнього природного середовища» від 25.06.2001 р. № 1829-ІІІ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/785-93-%D0%BF#Text>
3. Закон України «Про Національну інфраструктуру геопросторових даних» від 13.04.2020 р. № 554-ІХ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>
4. Постанова «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» № 391 від 30.03.1998 р затверджена Кабінетом Міністрів України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>
5. Розпорядження КМУ «Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року» № 454-р від 20.10.2021 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text>
6. Наказ «Про затвердження Методики розроблення місцевих енергетичних планів» № 1163 від 21.12.2023. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/z0245-24/stru>
7. Необхідне нормативно-правове забезпечення розділу «Екологічна безпека»/ Міндовкілля України, 2022. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/11/Neobhidni-normatyvno-pravove-zabezpechennya-rozdilu-Ekologichna-bezpeka.pdf>
8. Аналіз підходів щодо моніторингу “островів тепла”/ В. Зацерковний, І. Тішаєв // Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія - 2024. Режим доступу: <https://geology.bulletin.knu.ua/article/view/1422>
9. Нормативно-правове забезпечення моніторингу земель / Щепак В.В., Карюк А.М., Шарий Г.І., Тимошевський В.В. // Бізнес Інформ. – 2018 - № 10.

Режим

доступу:

https://business-inform.net/export_pdf/business-inform-2018-10_0-pages-209_214.pdf

10. НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЦИФРОВІЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ в УКРАЇНІ / Вихрист С. М. Університет економіки та права «КРОК» // Legal Bulletin -2024- №14, 105–112. <https://doi.org/10.31732/2708-339x-2024-14-a14>

11. Клімат Донецька /Вікімедіа, 26.01.2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82_%D0%94%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%B0

12. Погодні умови 2020: опади, температура, ґрунту та повітря/Агрономів – 14.01.2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://superagronom.com/blog/782-pogodni-umovi-2020-opadi-temperatura-gruntu-temperatura-povitrya>

13. DeepStateMAP | Мапа війни в Україні/DeepStateMap. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://deepstatemap.live/>

14. A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022) / Cheval, S., Amihăesei, V., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., Micu, D. M., Mihulet, E., Ontel, I., Paraschiv, M., & Tudose, N. C. // Climate Risk Management -2024- № 44, 100603. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212096324000202>

15. A Systematic Review of the Urban Heat Island Effect: Urban Form, Landscape and Planning Strategies / Yılmaz, D., Öztürk, S. - 2022. Режим доступу: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3167309>

16. A review on observation of urban heat island in thermal remote sensing/ Ibrahim, I.// journals.iium.edu.my. – 2017. Режим доступу: <https://journals.iium.edu.my/kaed/index.php/japcm/article/view/229>

17. A review on the impacts of urban heat islands on outdoor thermal comfort/ Ren, J., Shi, K., Li, Z., Kong, X., & Zhou, H.//. Buildings -2023 - №13(6), 1368. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/6/1368>

18. Analysis of the Relationship between Land Surface Temperature and Wildfire Severity in a Series of Landsat Images. / Vlassova, L., Pérez-Cabello, F., Mimbbrero, M., Llovería, R., & García-Martín, A. //Remote Sensing – 2014 -6(7), 6136–6162. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/7/6136>
19. Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities - PubMed (2021). Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33777247/>
20. Catalog : Dynamic World V1 / Google for Developers/ Режим доступа: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/GOOGLE_DYNAMIC_WORLD_V1
21. Catalog: MOD11A2.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km / Google for Developers.Режим доступа: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD11A2#description
22. Causes, Modeling and Mitigation of Urban Heat Island: A review. / Imran, H. M., Shamma, M. I., Rahman, A., Jacobs, S. J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. // Earth Sciences -2021- №10(6), 244. Режим доступа: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.earth.20211006.11>
23. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: A spatio-temporal analysis of remotely sensed data. / Rao, P., Tassinari, P., & Torreggiani, D. // Heliyon -2023- 9(8), e18423. Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10391954>
24. Figure 1. The effect of Urban Heat Island (UHI) /ResearchGate. Режим доступа: https://www.researchgate.net/figure/The-effect-of-Urban-Heat-Island-UHI_fig1_326316773
25. Heat wave, urbanisation and limited green space / Aderonke, B. A. //ArcGIS StoryMaps- 2025, June 20. Режим доступа: <https://storymaps.arcgis.com/stories/4b7f2bb903ff41cdbee75e56ca02e361>

26. How Paris' historic architecture creates a boiling urban heat island/ Turrisi, G., & Mukherjee, R. // *Axios* - 2024, July 24. Режим доступа: <https://www.axios.com/2024/07/24/olympics-paris-2024-architecture-heat-island>

27. Impacts of urban heat island effect on critical urban infrastructure: a review of studies published between 2012 and 2022/ Dwivedi, A., & Soni, R. // *Environmental Reviews* -2024 - №32(4), 457–469. Режим доступа: <https://www.citedrive.com/en/discovery/impacts-of-urban-heat-island-effect-on-critical-urban-infrastructure-a-review-of-studies-published-between-2012-2022>

28. Mitigation of urban heat island in China (2000–2020) through vegetation-induced cooling/ Wu, B., Zhang, Y., Wang, Y., He, Y., Wang, J., Wu, Y., Lin, X., & Wu, S. // *Sustainable Cities and Society* – 2024 - №112, 105599. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670724004244>

29. Mitigating New York city's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces / C. Rosenzweig, W. Solecki, L. Parshall, S. Gaffin, B. Lynn, R. Goldberg, J. Cox, S. Hodges// Columbia University, Hunter College – J3.2. Режим доступа: <https://www.giss.nasa.gov/research/news/archive/20060130/103341.pdf>

30. On the Land Emissivity Assumption and Landsat-Derived Surface Urban Heat Islands: A Global Analysis./ Chakraborty, T., Lee, X., Ermida, S., & Zhan, W. // *Eartharxiv* – 2021, May 7. Режим доступа: <https://eartharxiv.org/repository/view/2324>

31. Progress on green infrastructure for urban cooling: Evaluating techniques, design strategies, and benefits/ Azmeer, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G. // *Urban Climate* – 2024 - №56, 102077. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095524002736>

32. Recent widespread deceleration of global surface urban heat islands unveiled by satellites / Zhan, W., Li, L., Chakraborty, T. C., Hu, L., Wang, D., Liao, W., Wang, S., Du, H., Huang, F., Wang, C., Liu, Z., & Li, M. // *Geophysical Research Letters* -2025 - 52(12). Режим доступа: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2024GL112711>

33. Relationships between land use types and urban heat island intensity in Hulu Langat district, Selangor, Malaysia/ Rendana, M., Idris, W. M. R., Rahim, S. A.,

Abdo, H. G., Almohamad, H., Dughairi, A. a. A., & Al-Mutiry, M. //Ecological Processes – 2023- №12(1). Режим доступа: <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00446-9>

34. Satellite remote sensing for measuring urban heat islands and constructing heat vulnerability indices / ARSET -2022- NASA Applied Sciences. Режим доступа: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-satellite-remote-sensing-measuring-urban-heat-islands-and>

35. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data/Techniques: A Systematic Review / De Almeida, C. R., Teodoro, A. C., & Gonçalves A.//Environments – 2021 - 8(10), 105. Режим доступа : <https://www.mdpi.com/2076-3298/8/10/105>

36. The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort/ Wang, X., Li, H., & Sodoudi, S. // Building and Environment -2022- №217, 109082. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003213>

37. The Trend Inconsistency between Land Surface Temperature and Near Surface Air Temperature in Assessing Urban Heat Island Effects/ Sun, T., Sun, R., & Chen, L.//. Remote Sensing, -2025- 12(8), 1271. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1271>

38. Towards a Sustainable Urban Future: A Comprehensive review of Urban Heat Island research technologies and machine learning approaches / Ghorbany, S., Hu, M., Yao, S., & Wang, C. // Sustainability – 2024 - 16(11), 4609. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4609>

39. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures/ Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation -2018- 67, 30–42. Режим доступа: <https://research.monash.edu/en/publications/urban-heat-island-effect-a-systematic-review-of-spatio-temporal-f>

40. Urban Heat Island Effect: Remote Sensing Monitoring and Assessment / Zhao, L., Fan, X., & Hong, T. //Methods, Applications, and Future Directions. Atmosphere, -2025-16(7), 791. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/7/791>
41. Urban heat Island Mitigation: GIS-Based Analysis for a Tropical City Singapore./ Teo, Y. H., Makani, M. a. B. H., Wang, W., Liu, L., Yap, J. H., & Cheong, K. H. //International Journal of Environmental Research and Public Health -2022-19(19), 11917.Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/19/11917>
42. Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones./ Mughal, M., Li, X., & Norford, L. K. // Urban Climate, -2020- №34, 100714. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095520303333>
43. Urban Overheating and Adaptation Measures - An analysis at EU, National, and Local level (English). World Bank. Режим доступа: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099062524063514821>
44. Mapping urban heat islands leads NYC Council Data Team to Landsat. / USGS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.usgs.gov/news/mapping-urban-heat-islands-leads-nyc-council-data-team-landsat>

ДОДАТКИ

Додаток А. Скрипт методики

```
var roi = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level1")
  .filterBounds(geometry);
Map.centerObject(roi)
Map.addLayer(roi)
Map.addLayer(background, {color : 'white'}, 'background');
// 2011
var time_startu = '2016', time_endu = '2017'
var time_start11 = '2011', time_end11 = '2012'
var urban = ee.ImageCollection("GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1")
  .select('label')
  .filterDate(time_startu, time_endu)
  .filterBounds(roi)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
  .mode().eq(6);
Map.addLayer(urban.clip(roi), [], 'urban')
var modCol11 = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1km')
  .filterDate(time_start11, time_end11)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
  .filterBounds(roi)
  .map(function(img){
    return img.multiply(0.02).subtract(273.15)
      .copyProperties(img, img.propertyNames());
  })
var tir_img_modis11 = modCol11.median();
// Map.addLayer(tir_img_modis11.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette: ['white',
'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'tir_median_modis 11', false)
var tir_img_modis_u11 = tir_img_modis11.updateMask(urban);
// Map.addLayer(tir_img_modis_u11.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette:
['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'tir_median_urban 11')
print('tir_img_modis_u11', tir_img_modis_u11.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(),
  geometry: roi,
  scale: 1000,
  maxPixels: 1e13
}));
var tir_mean_modis11 = ee.Number(tir_img_modis_u11.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
}).values().get(0));
print('tir average modis 11', tir_mean_modis11)
var uhi_modis11 = tir_img_modis_u11.expression('(tir - mean)/mean',{
  'tir': tir_img_modis_u11, 'mean': tir_mean_modis11
```

```

    }).rename('uhi_modis 11');
    // Map.addLayer(uhi_modis11.clip(roi), [], 'uhi_modis 11', false)
    var uhi_class_modis11 =
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis11.gte(-0.18).and(uhi_modis11.lt(-0.05)), 1) //
weak
    .where(uhi_modis11.gte(-0.05).and(uhi_modis11.lt(0)), 2) //
middle
    .where(uhi_modis11.gte(0).and(uhi_modis11.lt(0.055)), 3) //
strong
    .where(uhi_modis11.gte(0.055).and(uhi_modis11.lt(0.13)), 4) //
stronger
    .where(uhi_modis11.gte(0.13), 5) // extreme
    .updateMask(urban)
    Map.addLayer(uhi_class_modis11.clip(roi), {min: 1, max: 5,
        palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis
11', false)
    // Графіки
    var uhi_modis_urban11 = uhi_modis11.updateMask(urban);
    var hist_modis11 = ui.Chart.image.histogram({
        image: uhi_modis_urban11.clip(roi),
        region: roi,
        scale: 1000,
        maxBuckets: 50
    }).setOptions({
        title: 'Розподіл UHI за 2011 рік',
        hAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
        vAxis: {title: 'Кількість пікселів'},
        colors: ['red']
    });
    print(hist_modis11);
    // Міста
    var cities = table2;
    Map.addLayer(cities, {color: 'blue'}, 'Cities');
    // Розрахунок середнього UHI по містах
    var city_uhi11 = cities.map(function(city) {
        var meanUHI_modis11 = uhi_modis_urban11.reduceRegion({
            reducer: ee.Reducer.mean(),
            geometry: city.geometry(),
            scale: 100,
            maxPixels: 1e13
        }).get('uhi_modis 11');
        return city.set({

```

```

        'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis11)
    });
});
// Графік міста
var chartcity11 = ui.Chart.feature.byFeature(city_uh11, 'name', ['UHI_MODIS'])
    .setChartType('ColumnChart')
    .setOptions({
        title: 'Середній UHI по містах Донецької області за 2011 рік',
        vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
        hAxis: {title: 'Місто'},
        series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
        legend: {position: 'top'}
    });
print(chartcity11);
// 2014
var time_start14 = '2014', time_end14 = '2015'
var modCol14 = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1km')
    .filterDate(time_start14, time_end14)
    .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
    .filterBounds(roi)
    .map(function(img) {
        return img.multiply(0.02).subtract(273.15)
            .copyProperties(img, img.propertyNames());
    })
var tir_img_modis14 = modCol14.median();
// Map.addLayer(tir_img_modis14.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette: ['white',
'yellow', 'orange',
// 'red', 'brown']},'tir_median_modis 14',false)
var tir_img_modis_u14 = tir_img_modis14.updateMask(urban);
// Map.addLayer(tir_img_modis_u14.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette:
['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']},'tir_median_urban 14')
print('tir_img_modis_u14', tir_img_modis_u14.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.minMax(),
    geometry: roi,
    scale: 1000,
    maxPixels: 1e13
}));
var tir_mean_modis14 = ee.Number(tir_img_modis_u14.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
}).values().get(0));
print('tir average modis 14', tir_mean_modis14)
var uhi_modis14 = tir_img_modis_u14.expression('(tir - mean)/mean',{

```

```

    'tir': tir_img_modis_u14, 'mean': tir_mean_modis14
  }).rename('uhi_modis 14');
  // Map.addLayer(uhi_modis14.clip(roi), [], 'uhi_modis 14', false)
  var uhi_class_modis14 =
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis14.gte(-0.18).and(uhi_modis14.lt(-0.05)), 1) //
weak
    .where(uhi_modis14.gte(-0.05).and(uhi_modis14.lt(0)), 2) //
middle
    .where(uhi_modis14.gte(0).and(uhi_modis14.lt(0.055)), 3) //
strong
    .where(uhi_modis14.gte(0.055).and(uhi_modis14.lt(0.13)), 4) //
stronger
    .where(uhi_modis14.gte(0.13), 5) // extreme
    .updateMask(urban)

  Map.addLayer(uhi_class_modis14.clip(roi), {min: 1, max: 5,
    palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis
14', false)
  // Графіки
  var uhi_modis_urban14 = uhi_modis14.updateMask(urban);
  var hist_modis14 = ui.Chart.image.histogram({
    image: uhi_modis_urban14.clip(roi),
    region: roi,
    scale: 1000,
    maxBuckets: 50
  }).setOptions({
    title: 'Розподіл UHI за 2014 рік',
    hAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
    vAxis: {title: 'Кількість пікселів'},
    colors: ['red']
  });
  print(hist_modis14);
  // Розрахунок середнього UHI по містах
  var city_uhi14 = cities.map(function(city) {
    var meanUHI_modis14 = uhi_modis_urban14.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      geometry: city.geometry(),
      scale: 100,
      maxPixels: 1e13
    }).get('uhi_modis 14');
    return city.set({
      'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis14)
    });
  });

```

```

    });
  });
  // Графік міста
  var chartcity14 = ui.Chart.feature.byFeature(city_uhi14, 'name', ['UHI_MODIS'])
    .setChartType('ColumnChart')
    .setOptions({
      title: 'Середній UHI по містах Донецької області за 2014 рік',
      vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
      hAxis: {title: 'Місто'},
      series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
      legend: {position: 'top'}
    });
  print(chartcity14);
  // 2020
  var time_start20 = '2020', time_end20 = '2021'
  var modCol20 = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1km')
    .filterDate(time_start20, time_end20)
    .filter(ee.Filter.calendarRange(6, 9, 'month'))
    .filterBounds(roi)
    .map(function(img){
      return img.multiply(0.02).subtract(273.15)
        .copyProperties(img, img.propertyNames());
    })
  var tir_img_modis20 = modCol20.median();
  // Map.addLayer(tir_img_modis20.clip(roi), {min: 10, max: 45, palette:
  ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'tir_median_modis 20', false)
  var tir_img_modis_u20 = tir_img_modis20.updateMask(urban);
  // Map.addLayer(tir_img_modis_u20.clip(roi), {min: 10, max: 45, palette:
  ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'tir_median_MODIS 20')
  print('tir_img_modis_u20', tir_img_modis_u20.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.minMax(),
    geometry: roi,
    scale: 1000,
    maxPixels: 1e13
  }));
  var tir_mean_modis20 = ee.Number(tir_img_modis_u20.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
  }).values().get(0));
  print('tir average modis 20', tir_mean_modis20)
  var uhi_modis20 = tir_img_modis_u20.expression('(tir - mean)/mean',{
    'tir': tir_img_modis_u20, 'mean': tir_mean_modis20
  }).rename('uhi_modis 20');

```

```

        // Map.addLayer(uhi_modis20.clip(roi), [], 'uhi_modis 20', false)
        var uhi_class_modis20 =
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis20.gte(-0.18).and(uhi_modis20.lt(-0.05)), 1) //
weak
        .where(uhi_modis20.gte(-0.05).and(uhi_modis20.lt(0)), 2) //
middle
        .where(uhi_modis20.gte(0).and(uhi_modis20.lt(0.055)), 3) //
strong
        .where(uhi_modis20.gte(0.055).and(uhi_modis20.lt(0.13)), 4) //
stronger
        .where(uhi_modis20.gte(0.13), 5) // extreme
        .updateMask(urban)
        Map.addLayer(uhi_class_modis20.clip(roi), {min: 1, max: 5,
            palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis
20', false)
        // Графіки
        var uhi_modis_urban20 = uhi_modis20.updateMask(urban);
        var hist_modis20 = ui.Chart.image.histogram({
            image: uhi_modis_urban20.clip(roi),
            region: roi,
            scale: 1000,
            maxBuckets: 50
        }).setOptions({
            title: 'Розподіл UHI за 2020 рік',
            hAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
            vAxis: {title: 'Кількість пікселів'},
            colors: ['red']
        });
        print(hist_modis20);
        var city_uhi20 = cities.map(function(city) {
            var meanUHI20 = uhi_modis20.reduceRegion({
                reducer: ee.Reducer.mean(),
                geometry: city.geometry(),
                scale: 100,
                maxPixels: 1e13
            }).get('UHI_MODIS');
            return city.set('meanUHI 20', meanUHI20);
        });
        // print(city_uhi20);
        // Розрахунок середнього UHI по містах
        var city_uhi20 = cities.map(function(city) {
            var meanUHI_modis20 = uhi_modis_urban20.reduceRegion({

```

```

    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: city.geometry(),
    scale: 100,
    maxPixels: 1e13
  }).get('uhi_modis 20');
  return city.set({
    'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis20)
  });
});
// Графік міста
var chartcity20 = ui.Chart.feature.byFeature(city_uhi20, 'name', ['UHI_MODIS'])
  .setChartType('ColumnChart')
  .setOptions({
    title: 'Середній UHI по містах Донецької області за 2020 рік',
    vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
    hAxis: {title: 'Місто'},
    series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
    legend: {position: 'top'}
  });
print(chartcity20);
// 2022
var time_start22 = '2022', time_end22 = '2023'
var modCol22 = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1km')
  .filterDate(time_start22, time_end22)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
  .filterBounds(roi)
  .map(function(img) {
    return img.multiply(0.02).subtract(273.15)
      .copyProperties(img, img.propertyNames());
  })
var tir_img_modis22 = modCol22.median();
// Map.addLayer(tir_img_modis22.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette: ['white',
'yellow', 'orange', 'red', 'brown']},'tir_median_modis 22',false)
var tir_img_modis_u22 = tir_img_modis22.updateMask(urban);
// Map.addLayer(tir_img_modis_u22.clip(roi),{min: 10, max: 45, palette:
['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']},'tir_median_MODIS 22')
print('tir_img_modis_u22', tir_img_modis_u22.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(),
  geometry: roi,
  scale: 1000,
  maxPixels: 1e13
}));

```

```

var tir_mean_modis22 = ee.Number(tir_img_modis_u22.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
}).values().get(0));
print('tir average modis 22', tir_mean_modis22)
var uhi_modis22 = tir_img_modis_u22.expression('(tir - mean)/mean',{
  'tir': tir_img_modis_u22, 'mean': tir_mean_modis22
}).rename('uhi_modis 22');
// Map.addLayer(uhi_modis22.clip(roi), [], 'uhi_modis 22', false)
var uhi_class_modis22 =
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis22.gte(-0.18).and(uhi_modis22.lt(-0.05)), 1) //
weak
                                .where(uhi_modis22.gte(-0.05).and(uhi_modis22.lt(0)), 2) //
middle
                                .where(uhi_modis22.gte(0).and(uhi_modis22.lt(0.055)), 3) //
strong
                                .where(uhi_modis22.gte(0.055).and(uhi_modis22.lt(0.13)), 4) //
stronger
                                .where(uhi_modis22.gte(0.13), 5) // extreme
                                .updateMask(urban)
Map.addLayer(uhi_class_modis22.clip(roi), {min: 1, max: 5,
  palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis
22', false)
// Графіки
var uhi_modis_urban22 = uhi_modis22.updateMask(urban);
var hist_modis22 = ui.Chart.image.histogram({
  image: uhi_modis_urban22.clip(roi),
  region: roi,
  scale: 1000,
  maxBuckets: 50
}).setOptions({
  title: 'Розподіл UHI за 2022 рік',
  hAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
  vAxis: {title: 'Кількість пікселів'},
  colors: ['red']
});
print(hist_modis22);
// Розрахунок середнього UHI по містах
var city_uhi22 = cities.map(function(city) {
  var meanUHI_modis22 = uhi_modis_urban22.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: city.geometry(),
    scale: 100,

```

```

    maxPixels: 1e13
  }).get('uhi_modis 22');

  return city.set({
    'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis22)
  });
});
// Графік міста
var chartcity22 = ui.Chart.feature.byFeature(city_uhi22, 'name', ['UHI_MODIS'])
  .setChartType('ColumnChart')
  .setOptions({
    title: 'Середній UHI по містах Донецької області за 2022 рік',
    vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
    hAxis: {title: 'Місто'},
    series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
    legend: {position: 'top'}
  });
print(chartcity22);
// 2025
var time_start = '2025-01-01', time_end = '2025-09-30'
var urban = imageCollection2
  .select('label')
  .filterDate(time_start, time_end)
  .filterBounds(roi)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
  .mode().eq(6);
Map.addLayer(urban.clip(roi), [], 'urban', false)
var modCol = ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A2").select('LST_Day_1km')
  .filterDate(time_start, time_end)
  .filter(ee.Filter.calendarRange(5, 9, 'month'))
  .filterBounds(roi)
  .map(function(img){
    return img.multiply(0.02).subtract(273.15)
      .copyProperties(img, img.propertyNames());
  })
var tir_img_modis25 = modCol.median();
// Map.addLayer(tir_img_modis25.clip(roi), {min: 10, max: 45, palette: ['white',
'yellow', 'orange',
// 'red', 'brown']}, 'tir_median_modis', false)
var tir_img_modis_u25 = tir_img_modis25.updateMask(urban);
// Map.addLayer(tir_img_modis_u25.clip(roi), {min: 10, max: 45, palette:
['white', 'yellow', 'orange',

```

```

// 'red', 'brown']}, 'tir_median_urban 2025')
print('tir_img_modis_u25', tir_img_modis_u25.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(),
  geometry: roi,
  scale: 1000,
  maxPixels: 1e13
}));
var tir_mean_modis25 = ee.Number(tir_img_modis_u25.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
}).values().get(0));
print('tir average modis 25', tir_mean_modis25)
var uhi_modis25 = tir_img_modis_u25.expression('(tir - mean)/mean',{
  'tir': tir_img_modis25, 'mean': tir_mean_modis25
}).rename('UHI_MODIS');
// Map.addLayer(uhi_modis25.clip(roi), [], 'UHI_MODIS', false)
var uhi_class_modis25 =
ee.Image.constant(0).where(uhi_modis25.gte(-0.18).and(uhi_modis25.lt(-0.05)), 1) //
weak
                                .where(uhi_modis25.gte(-0.05).and(uhi_modis25.lt(0)), 2) //
middle
                                .where(uhi_modis25.gte(0).and(uhi_modis25.lt(0.055)), 3) //
strong
                                .where(uhi_modis25.gte(0.055).and(uhi_modis25.lt(0.13)), 4) //
stronger
                                .where(uhi_modis25.gte(0.13), 5) // extreme
                                .updateMask(urban)
Map.addLayer(uhi_class_modis25.clip(roi), {min: 1, max: 5,
  palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'uhi_class_modis
25', false)
// Графіки
var uhi_modis_urban = uhi_modis25.updateMask(urban);
var hist_modis = ui.Chart.image.histogram({
  image: uhi_modis_urban.clip(roi),
  region: roi,
  scale: 1000,
  maxBuckets: 50
}).setOptions({
  title: 'Розподіл UHI за 2025 рік',
  hAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
  vAxis: {title: 'Кількість пікселів'},
  colors: ['red']
});

```

```

print(hist_modis);
// Міста
// Розрахунок середнього UHI по містах
var city_uhi = cities.map(function(city){
  var meanUHI_modis = uhi_modis_urban.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: city.geometry(),
    scale: 100,
    maxPixels: 1e13
  }).get('UHI_MODIS');
  return city.set({
    'UHI_MODIS': ee.Number(meanUHI_modis)
  });
});
// Графік міста
var chartcity25 = ui.Chart.feature.byFeature(city_uhi, 'name', ['UHI_MODIS'])
  .setChartType('ColumnChart')
  .setOptions({
    title: 'Середній UHI по містах Донецької області за 2025 рік',
    vAxis: {title: 'UHI', viewWindow: {min: 0}},
    hAxis: {title: 'Місто'},
    series: {0:{color:'orange'}, 1:{color:'red'}},
    legend: {position: 'top'}
  });
print(chartcity25);
// АНАЛІЗ ПЛОЩІ
var years = [2011, 2014, 2020, 2022, 2025];
var uhi_images = [
  uhi_class_modis11,
  uhi_class_modis14,
  uhi_class_modis20,
  uhi_class_modis22,
  uhi_class_modis25
];
function computeAreaPerClass(uhi_img, year) {
  var areaImg = ee.Image.pixelArea().divide(1e6); // площа в км²
  var areaByClass = areaImg.addBands(uhi_img.rename('class'));
  var stats = areaByClass.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum().group({
      groupField: 1,
      groupName: 'UHI_class'
    }),

```

```

    geometry: roi,
    scale: 1000,
    maxPixels: 1e13
  });
var groups = ee.List(stats.get('groups'));
var empty = {
  class1: 0,
  class2: 0,
  class3: 0,
  class4: 0,
  class5: 0
};
var filled = groups.iterate(function(item, acc) {
  item = ee.Dictionary(item);
  acc = ee.Dictionary(acc);
  var cls = ee.Number(item.get('UHI_class')).format('class%d');
  var area = ee.Number(item.get('sum'));
  return acc.set(cls, area);
}, empty);
filled = ee.Dictionary(filled);
return ee.Feature(null, {
  year: year,
  class1_km2: filled.get('class1'),
  class2_km2: filled.get('class2'),
  class3_km2: filled.get('class3'),
  class4_km2: filled.get('class4'),
  class5_km2: filled.get('class5')
});
}
var table = ee.FeatureCollection(
  years.map(function(y, i) {
    return computeAreaPerClass(uhi_images[i], y);
  })
);
Export.table.toDrive({
  collection: table,
  description: 'UHI_area_all_years',
  fileFormat: 'CSV'
});
// ЛЕГЕНДА ДЛЯ UHI MODIS (классы 1-5)
var legend = ui.Panel({
  style: {

```

```

        position: 'bottom-left',
        padding: '8px',
        backgroundColor: 'rgba(255,255,255,1)'
    }
});
legend.add(ui.Label({
    value: 'UHI intensity',
    style: {fontWeight: 'bold', fontSize: '14px', margin: '0 0 6px 0'}
}));
// Палітра та назви класів
var palette = ['white', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown'];
var names = [
    '1 - Weak (-0.18 - -0.05)',
    '2 - Middle (-0.05 - 0 )',
    '3 - Strong (0 - 0.055)',
    '4 - Stringer (0.055 - 0.13)',
    '5 - Extreme (0.13 >)'
];
// Додавання елементів легенди
for (var i = 0; i < palette.length; i++) {
    var colorBox = ui.Label({
        style: {
            backgroundColor: palette[i],
            padding: '10px',
            margin: '0 4px 4px 0'
        }
    });
    var description = ui.Label({
        value: names[i],
        style: {fontSize: '12px', margin: '0 0 4px 0'}
    });
    var item = ui.Panel({
        widgets: [colorBox, description],
        layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
    });
    legend.add(item);
}
Map.add(legend);
var y2011 = tir_mean_modis11;
var y2014 = tir_mean_modis14;
var y2020 = tir_mean_modis20;
var y2022 = tir_mean_modis22;

```

```

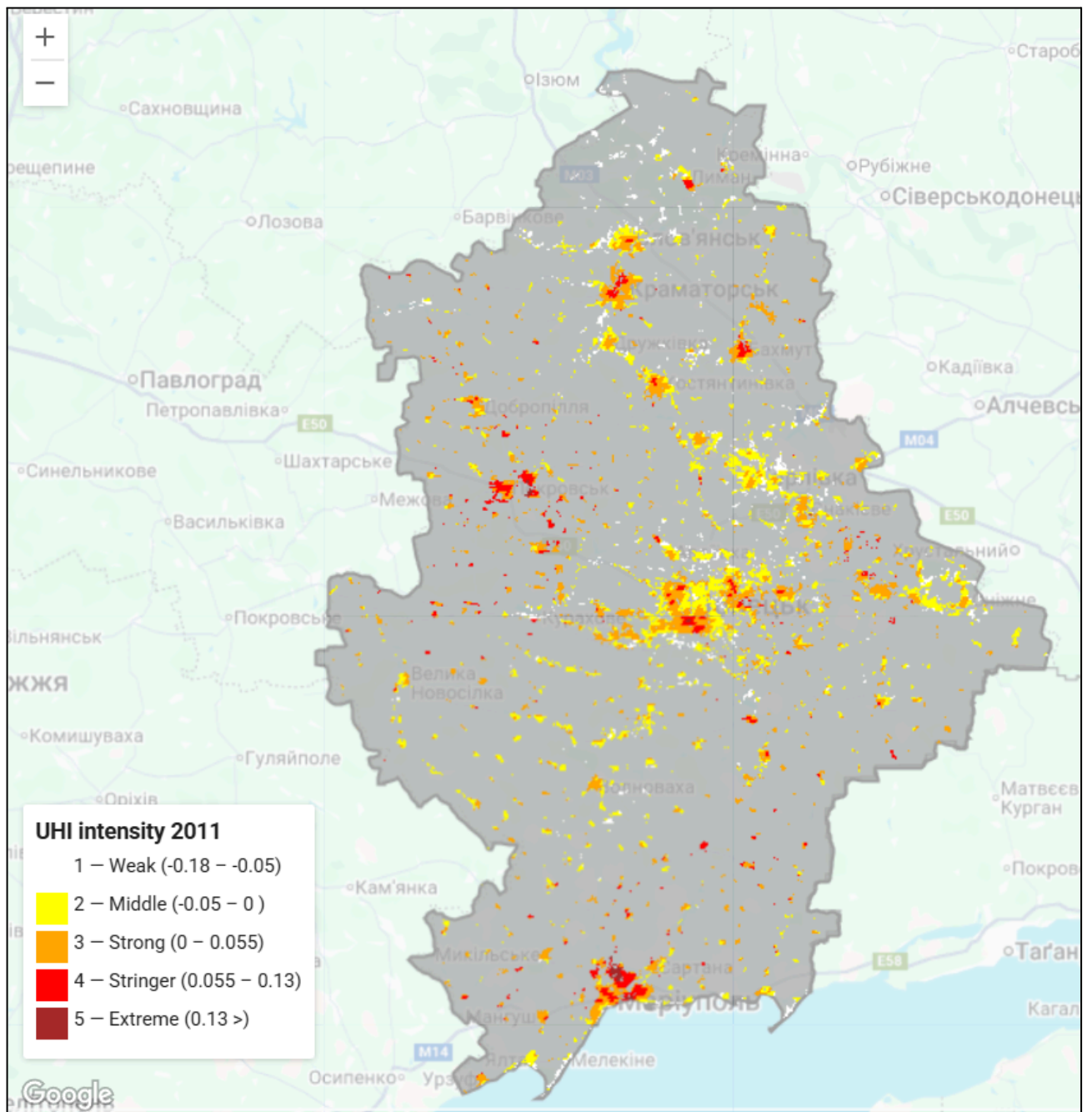
var y2025 = tir_mean_modis25;
var fc = ee.FeatureCollection([
  ee.Feature(null, {'year': 2011, 'LST': y2011}),
  ee.Feature(null, {'year': 2014, 'LST': y2014}),
  ee.Feature(null, {'year': 2020, 'LST': y2020}),
  ee.Feature(null, {'year': 2022, 'LST': y2022}),
  ee.Feature(null, {'year': 2025, 'LST': y2025})
]);
print('Підготовлена таблиця:', fc);
// Лінійний графік
var chartLine = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: fc,
  xProperty: 'year',
  yProperties: ['LST']
})
.setChartType('LineChart')
.setOptions({
  title: 'Динаміка середньої температури впродовж 14 років',
  hAxis: {title: 'Рік', format: '####'},
  vAxis: {title: 'LST (°C)', viewWindow: {min: 25}},
  lineWidth: 3,
  pointSize: 6,
  colors: ['#d32f2f']
});
print(chartLine);

```

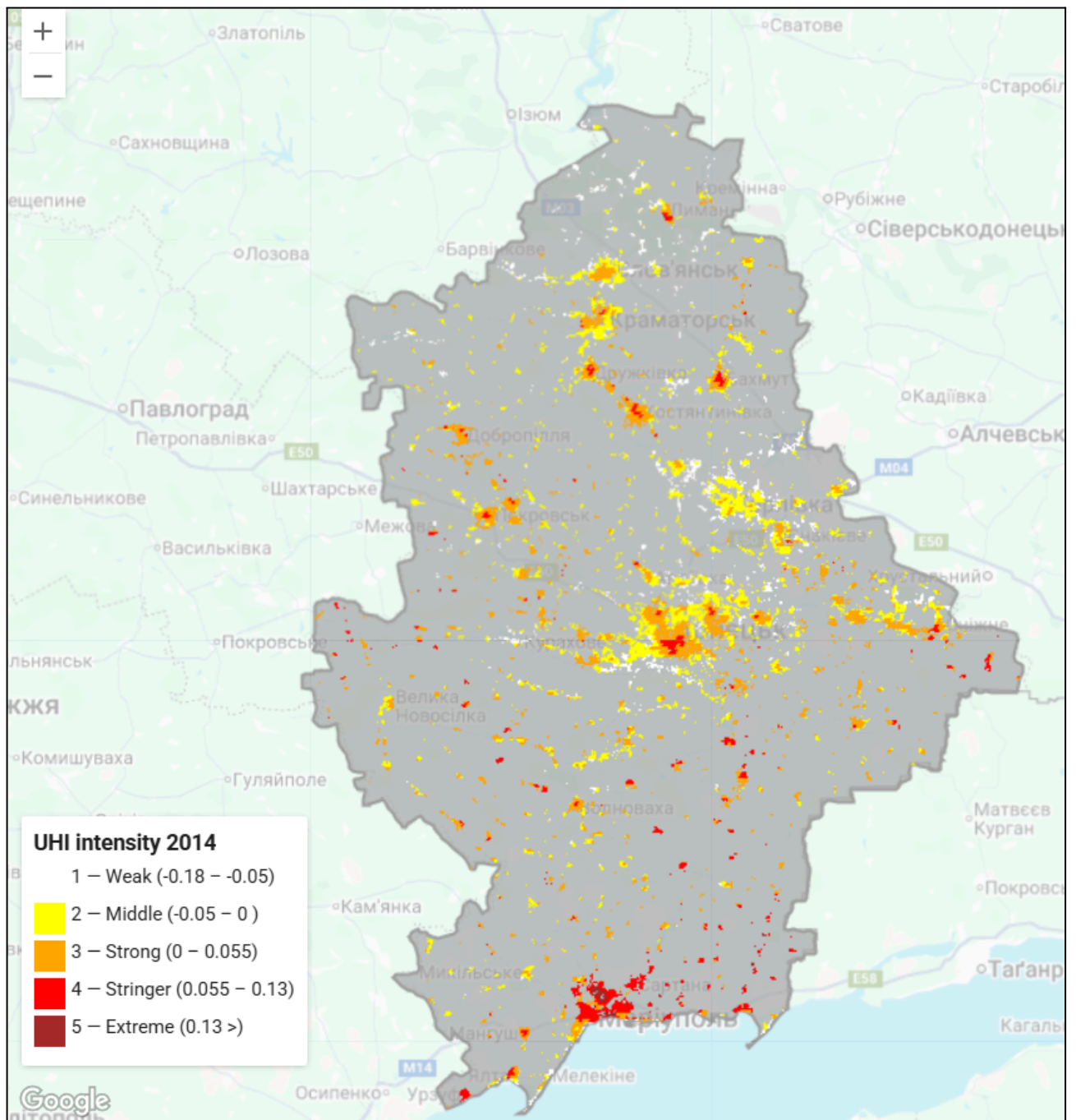
Додаток Б. Динаміка середньої температури впродовж 14 років



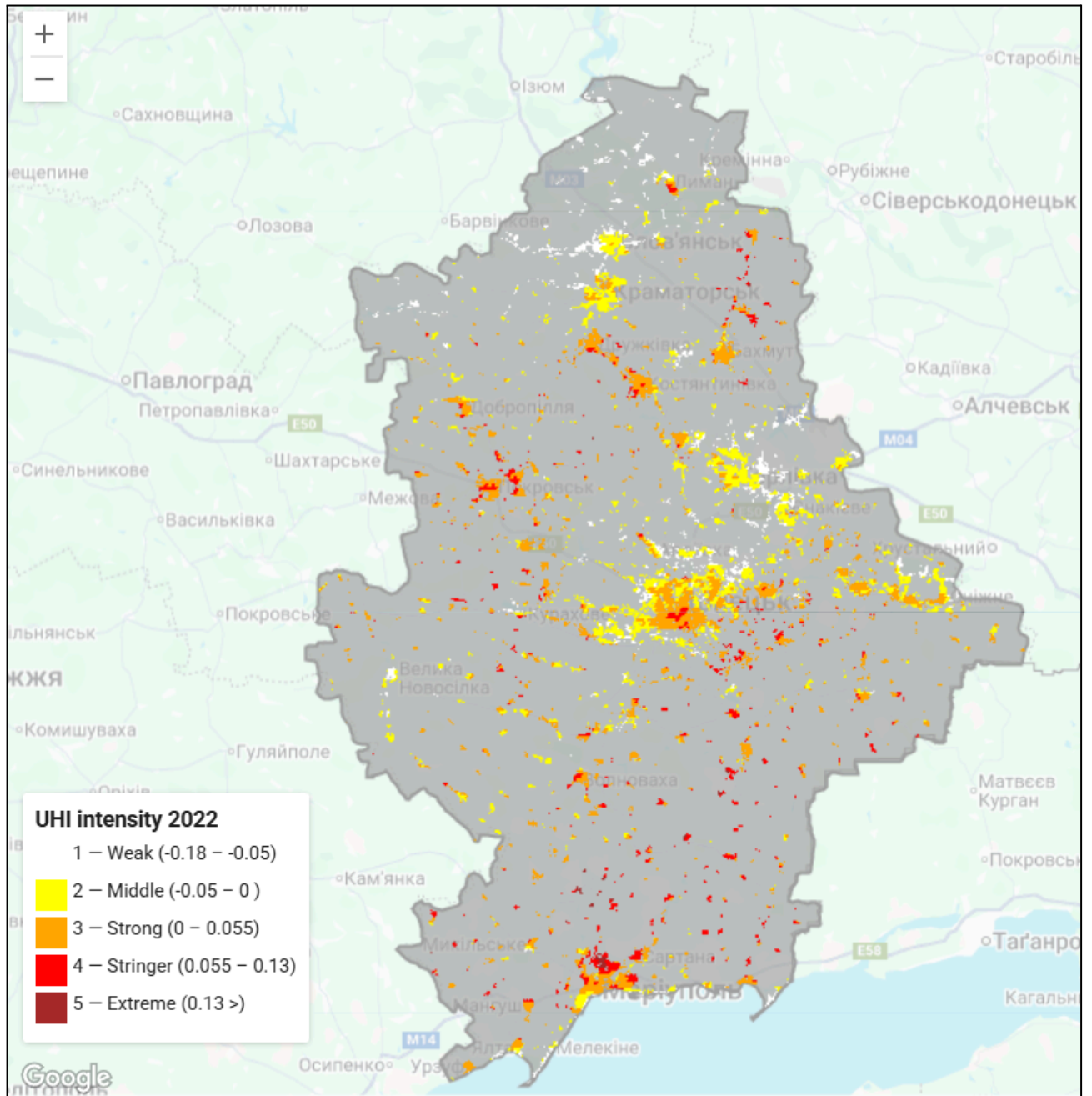
Додаток В. Інтенсивність УНІ за 2011 рік



Додаток Г. Інтенсивність УНІ за 2014 рік



Додаток Е. Інтенсивність УНІ за 2022 рік



Додаток Є. Інтенсивність УНІ за 2025 рік

