

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет землевпорядкування

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
геоінформатики і аерокосмічних**

Москаленко А.А._____

«___» _____ 2026 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему «ВИКОРИСТАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ
ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТ УКРАЇНИ»**

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Гарант освітньої програми

д-р. географ. наук, проф. _____

Іван КОВАЛЬЧУК

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Старший викладач _____

Богдан ДЕНИСЮК

Консультант

д-р. екон. наук, доцент _____

Анатолій ПОЛТАВЕЦЬ

Виконав _____

Ярослав ВИСОТІН

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет землевпорядкування**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

**геоінформатики і аерокосмічних
досліджень Землі**

_____ Антоніна МОСКАЛЕНКО

« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Висотін Ярослав Вікторович

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Використання гіс-технологій для виявлення теплових аномалій на території міст України».

Затверджена наказом ректора НУБіП України від 27.11.2026 року № 2899«С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру: за 10 днів до захисту.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:
Супутникові знімки Landsat 8, програмне забезпечення, інтернет ресурси, наукові статті.

У роботі були поставлені наступні завдання:

дослідити теоретичні засади виникнення міських островів тепла та оцінити їхній безпосередній вплив на глобальні зміни клімату й утворення парникових газів;

вивчити сучасні інформаційні методи й порівняти можливості наявних геопорталів щодо виявлення та аналізу температурних аномалій;

спроектувати оптимальну структуру бази геоданих та сформувати просторову базу для надійного збереження отриманих растрових матеріалів;

практично визначити зони теплових аномалій для міст Нікополь та Біла Церква, зіставити ці результати з міжнародними аналогами, а також розрахувати рівень викидів парникових газів;

розробити дієві практичні рекомендації для міського середовища, спрямовані на запобігання тепловим викидам та зменшення їхнього негативного впливу.

Дата видачі завдання _____

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

_____ Богдан ДЕНИСЮК

Консультант

_____ Анатолій ПОЛТАВЕЦЬ

Завдання прийняв до виконання

_____ Ярослав ВИСОТІН

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____Землепорядкування_____ (ННІ)

Декларація про академічну доброчесність та використання ШІ

ДЕКЛАРАЦІЯ ЗДОБУВАЧА

Я, Висотін Ярослав Вікторович, здобувач НУБіП України, усвідомлюючи відповідальність за порушення академічної доброчесності, цією заявою підтверджую, що:

1. Моя бакалаврська кваліфікаційна робота (проект) на тему

«Використання гіс-технологій для виявлення теплових аномалій на території міст України» є результатом моєї особистої праці.

2. Усі запозичення з текстів інших авторів мають відповідні посилання згідно з чинними стандартами.

3. Щодо використання інструментів ШІ зазначаю, що (обрати необхідне):

о ☐ інструменти генеративного ШІ не використовувалися.

о ☐ інструменти ШІ (вказати назву: ChatGPT, Gemini, Claude, DeepL, Gemini інші (вказати назву)) були використані для:

- ✦ ☐ перекладу іншомовних джерел;
- ✦ ☐ стилістичного редагування та перевірки граматики;
- ✦ ☐ допомоги у написанні/відлагодженні програмного коду;
- ✦ ☐ інше: _____.

Я розумію, що надання недостовірної інформації може призвести до скасування результатів захисту та відрахування з числа здобувачів НУБіП України.

«__» _____ 20__р. _____ Ярослав ВИСОТІН
(підпис) (Ім'я та ПРИЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	7
Вступ.....	11
Розділ 1. АНАЛІЗ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОВОЇ АНОМАЛІЇ І ЇЇ ВПЛИВ НА ЗМІНУ КЛІМАТУ.....	13
1.1. Міське середовище як тепловий острів, основні характеристик теплових островів їх виникнення та вплив.....	13
1.2. Вплив теплових островів на глобальні зміни клімату.....	18
1.3. Міське середовище як джерело парникових газів.....	22
1.4. Сучасні методи аналізу досліджень теплових островів.....	32
Розділ 2. ВИВЧЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	38
2.1. Вибір та формування вихідних даних. Опис інформаційних ресурсів, програмних ресурсів.....	38
2.2. Порівняльний аналіз геопорталів з джерелами даних, що до аналізу теплових аномалій в міському середовищі	42
Розділ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ДЖЕРЕЛ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ПРИКЛАДІ МІСТ УКРАЇНИ.....	46
3.1. Формування просторової бази для зберігання растрових даних....	46
3.2. Структура бази геоданих.....	51
3.3. Визначення теплових аномалій для міста Нікополь.....	61
3.4. Визначення теплових аномалій для міста Біла Церква.....	65
3.5. Порівняння теплових аномалій України в порівнянні з аналогами..	68
3.6. Рівень емісії парникових газів для міст України.....	70
3.7. Рекомендації для запобігання викидів тепла у містах.....	72
ВИСНОВОК	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

РЕФЕРАТ

У бакалаврській роботі комплексно досліджено теоретичні, методичні та практичні аспекти формування міських островів тепла, виявлення температурних аномалій та їхнього впливу на зміну клімату на прикладі міст Нікополь та Біла Церква.

Метою бакалаврської роботи є дослідження причин виникнення теплових аномалій у міському середовищі, оцінка їхнього зв'язку з викидами парникових газів, а також розробка геоінформаційної технології для виявлення, моделювання та запобігання тепловому забрудненню міст України.

Об'єктом дослідження є процеси формування міських островів тепла, мікрокліматичні зміни та емісія парникових газів у межах урбанізованих територій.

Предметом дослідження є сукупність методологічних підходів, геоінформаційних технологій, супутникових даних та програмних засобів, що використовуються для моніторингу, картографування та оцінки теплових аномалій у містах.

У роботі були поставлені наступні завдання:

дослідити теоретичні засади виникнення міських островів тепла та оцінити їхній безпосередній вплив на глобальні зміни клімату й утворення парникових газів;

вивчити сучасні інформаційні методи й порівняти можливості наявних геопорталів щодо виявлення та аналізу температурних аномалій;

спроектувати оптимальну структуру бази геоданих та сформувати просторову базу для надійного збереження отриманих растрових матеріалів;

практично визначити зони теплових аномалій для міст Нікополь та Біла Церква, зіставити ці результати з міжнародними аналогами, а також розрахувати рівень викидів парникових газів;

розробити дієві практичні рекомендації для міського середовища, спрямовані на запобігання тепловим викидам та зменшення їхнього негативного впливу.

Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі розкрито теоретичні основи формування міського середовища як джерела теплових аномалій.

Визначено основні характеристики теплових островів, причини їхньої появи, а також проаналізовано сучасні методи та підходи до їхнього вивчення. У другому розділі приділено увагу практичному підбору вихідних даних, інформаційних і програмних ресурсів, а також проведено детальний аналіз геопорталів, які дозволяють збирати дані про температурні зміни в містах. У третьому розділі, на основі розробленої структури бази геоданих та просторової бази растрових матеріалів, практично виявлено теплові аномалії в Нікополі та Білій Церкві. Проведено порівняльний аналіз цих аномалій з іноземними аналогами, розраховано рівень емісії парникових газів та запропоновано комплексні рекомендації щодо зниження теплового навантаження на міста.

У роботі використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема: картографічний та геоінформаційний для обробки растрових даних та моделювання островів тепла; порівняльний для аналізу геопорталів та зіставлення показників українських міст із закордонними; статистичний та математичний для розрахунку рівнів емісії парникових газів; системно-структурний для проектування бази геоданих.

ABSTRACT

The bachelor's thesis provides a comprehensive study of the theoretical, methodological, and practical aspects of urban heat island formation, detection of thermal anomalies, and their impact on climate change, using the examples of Nikopol and Bila Tserkva.

The purpose of the bachelor's thesis is to investigate the causes of thermal anomalies in the urban environment, assess their connection with greenhouse gas emissions, and develop a GIS technology for detecting, modeling, and preventing thermal pollution in Ukrainian cities.

The object of the study is the processes of urban heat island formation, microclimatic changes, and greenhouse gas emissions within urbanized areas.

The subject of the study is a set of methodological approaches, GIS technologies, satellite data, and software tools used for monitoring, mapping, and evaluating thermal anomalies in cities.

The following tasks were set in the study:

- to investigate the theoretical foundations of urban heat island formation and evaluate their direct impact on global climate change and greenhouse gas generation;

- to study modern informational methods and compare the capabilities of existing geoportals regarding the detection and analysis of thermal anomalies;

- to design an optimal structure for the geodatabase and form a spatial database for the reliable storage of the obtained raster materials;

- to practically identify thermal anomaly zones for the cities of Nikopol and Bila Tserkva, compare these results with international analogues, and calculate the level of greenhouse gas emissions;

- to develop effective practical recommendations for the urban environment aimed at preventing thermal emissions and reducing their negative impact.

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The first chapter reveals the theoretical foundations of the urban environment as a source of thermal anomalies. The main characteristics of heat islands, the reasons for their appearance, and modern methods and approaches to their study are analyzed. The second chapter focuses on the practical selection of

baseline data, information and software resources, and provides a detailed analysis of geoportals that allow collecting data on temperature changes in cities. In the third chapter, based on the developed geodatabase structure and the spatial database of raster materials, thermal anomalies in Nikopol and Bila Tserkva are practically identified. A comparative analysis of these anomalies with foreign counterparts is conducted, the level of greenhouse gas emissions is calculated, and comprehensive recommendations for reducing the thermal load on cities are proposed.

The study uses general scientific and special research methods, in particular the cartographic and GIS methods for processing raster data and modeling heat islands; the comparative method for analyzing geoportals and matching the indicators of Ukrainian cities with foreign ones; the statistical and mathematical methods for calculating greenhouse gas emission levels; the system-structural method for designing the geodatabase.

ВСТУП

Сучасні міста розвиваються дуже швидко забудова розширюється, зелених зон стає менше, а транспортний потік зростає з кожним роком. Усе це змінює температурний режим міського середовища. Явище, коли в місці помітно тепліше, ніж у прилеглій сільській місцевості, отримало назву міського теплового острова. Воно вже давно відоме науковцям, проте його масштаби й дослідження досі залишаються актуальними для досліджень — особливо в контексті глобального потепління.

Для України це питання стоїть не менш гостро, ніж для інших країн. Міста зі значною промисловою базою, застарілою інфраструктурою та нестачею озеленення формують стійкі зони теплового накопичення. При цьому точних інструментів для їхнього аналізу на українському рівні бракує. Саме тут на допомогу приходять геоінформаційні технології та дані дистанційного зондування Землі: вони дозволяють оцінити температурний стан міської поверхні без необхідності організовувати масштабні наземні виміри.

Ця робота присвячена вивченню теплових аномалій у двох українських містах Нікополі та Білій Церкві з використанням ГІС-технологій і супутникових знімків Landsat. Вибір саме цих міст обумовлений різним характером їхнього промислового навантаження та землекористування, що дозволяє порівняти й узагальнити результати.

Актуальність теми. Урбанізація в Україні та світі продовжується. Разом із нею зростає теплове і парникове навантаження на навколишнє середовище. Виявлення зони теплових аномалій є необхідним кроком для прийняття обґрунтованих містобудівних рішень, оцінки екологічних ризиків та розробки стратегій адаптації міста до зміни клімату. Застосування ГІС-технологій для вирішення цих завдань є сучасним, ефективним і досить доступним підходом.

Мета роботи я б сказав дослідити причини виникнення теплових аномалій у міському середовищі, оцінити їх зв'язок із віками парникових газів, а також розробити геоінформаційну технологію для виявлення та аналізу теплових островів на прикладі міст України.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі **завдання** :

- дослідити теоретичні засади формування міських теплових островів та їх вплив на клімат і здоров'я населення;
- вивчити сучасні методи аналізу теплових аномалій і порівняти можливості різних геопорталів;
- розробити структуру бази геоданих для зберігання рослинних матеріалів;
- програмування зони теплових аномалій для міст Нікополь та Біла Церква і порівняти їх із міжнародними аналогами;
- розраховувати рівень емісії парникових газів для досліджуваних міст;
- сформулювати практичні рекомендації щодо зниження теплового навантаження.

Об'єктом дослідження є процеси формування міських теплових островів, мікрокліматичні зміни та емісія парникових газів в урбанізованих зонах.

Предметом дослідження є геоінформаційні технології, супутникові дані та методологічні підходи до моніторингу й картографування теплових аномалій у містах.

Методи дослідження. У роботі використано: картографічний та геоінформаційний методи для обробки растрових даних і моделювання теплових островів; порівняльний — для зіставлення можливостей геопорталів і показників різних міст; статистичний та математичний для розрахунку рівнів емісії парникових газів; системно-структурний для проектування бази геоданих.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ЯК ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОВОЇ АНОМАЛІЇ І ЇЇ ВПЛИВ НА ЗМІНУ КЛІМАТУ

1.1. Міське середовище як тепловий острів, основні характеристики теплових островів, їх виникнення та вплив

Динамічні трансформації, що охоплюють великий міст світу впродовж останніх десятиліть, є не лише соціально-економічним явищем, а й потужним природоперетворювальним чинником. Урбанізація формує принципово нове середовище з іншим тепловим балансом, зміненою структурою поверхні та особливим режимом взаємодії з атмосферою. Однією з температурою найбільших ознак цих перетворень є утворення так званого міського теплового острова (Urban Heat Island, UHI) феномену, за якого повітря та підстильної поверхні в урбанізованій зоні систематично досягають аналогічних показників прилеглих незабудованих або слабозабудованих територій [1].

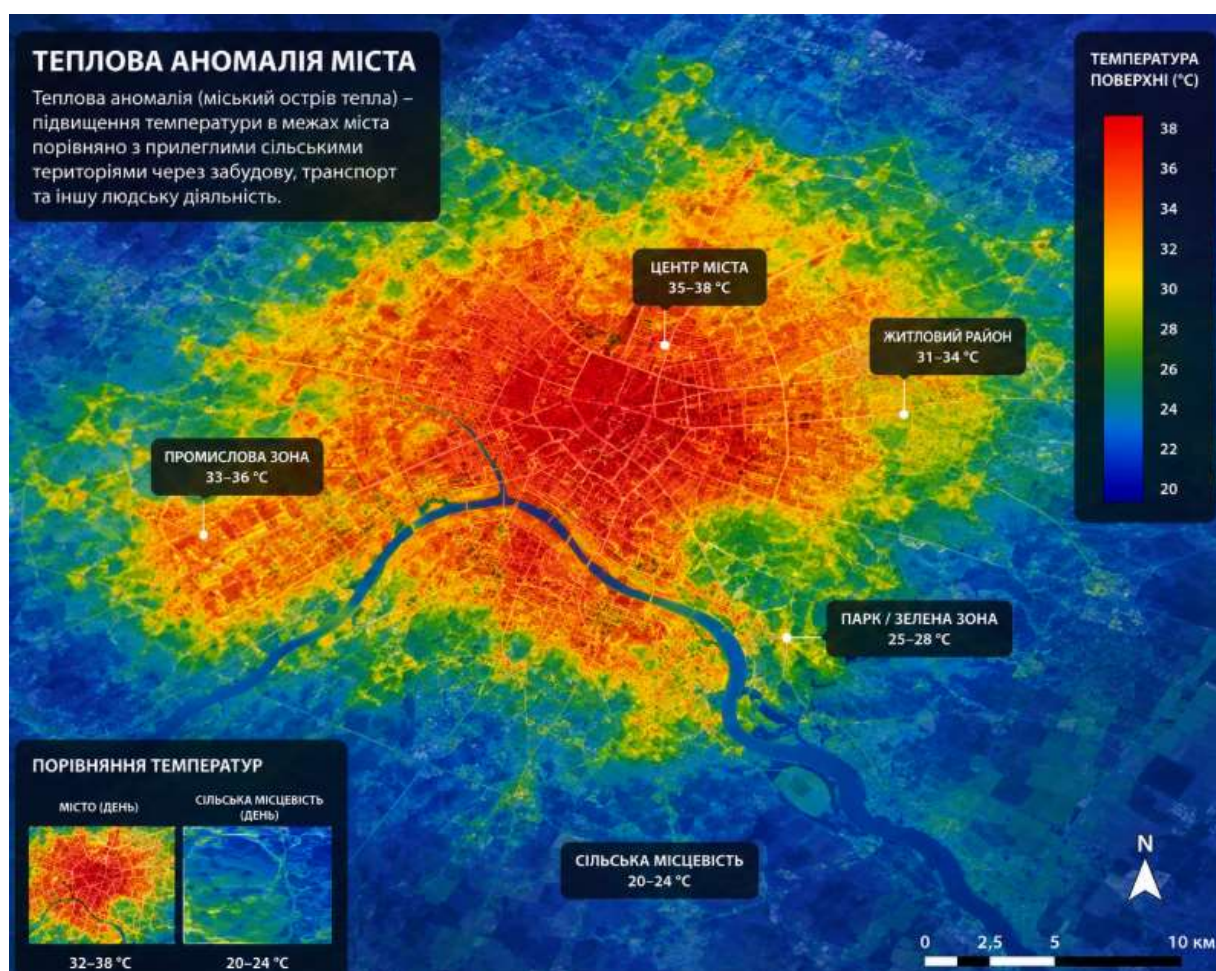


Рис. 1. Приклад теплової аномалії

Сучасна урбанізація стрімко набирає оберти: за прогнозами фахівців ООН, до середини XXI століття понад 70 % мешканців планети живуть у містах процес неминуче супроводжується розширенням цієї площі забудови, скороченням природних ландшафтів та зростанням антропогенного теплового навантаження на міське середовище. Відтак дослідження закономірностей формування теплових аномалій буває не лише наукового, а й практичного значення від обґрунтування містобудівних рішень до розробки стратегії охорони здоров'я населення.[5]

Фундаментальна відмінність міської поверхні від природних ландшафтів сталася у складі та властивостях матеріалів, що її індивідуально. Асфальтові шари автодоріг, бетонні монолітні конструкції, металеві дахові покриття, скляні фасади висотних споруд усі ці елементи мають достатньо вищий коефіцієнт поглинання сонячної радіації, ніж обґрунтований, трава або листяний полог. протягом світлового дня такі поверхні акумулюють теплову енергію, а після заходу сонця виростають її назад у приземний шар атмосфери. Саме цей механізм «теплового накопичення» пояснює, чому нічні температури в густонаселених районах нерідко на кілька градусів вище, ніж на периферії [3].

Формування міського теплового острова зумовлюється не одним ізольованим чинником, а комплексом взаємопов'язаних процесів, які підсилюють один одного. Серед них ущільнення забудови та зростання частки водонепроникних покриттів, що створює обґрунтування природного зволоження і гальмує випаровування. У незмінному ландшафті значна частина сонячної енергії реалізується саме на випаровуванні обґрунтованої та рослинної вологи процес, який не тільки охолоджує поверхню, а й зволожує повітря. В умовах «запечатаного» асфальту міського середовища ця природна система охолодження деградує, і звільнена теплова енергія акумулюється в матеріалах покриттів [3]. Одночасно скорочення площі зелених насаджень знімає ще один компенсаторний механізм: дерева та чагарники затінюють поверхню, знижують температуру прилеглого повітря через транспірацію і служать бар'єром на шляху вітру, що збільшує тепло повітря від забудованих ділянок.

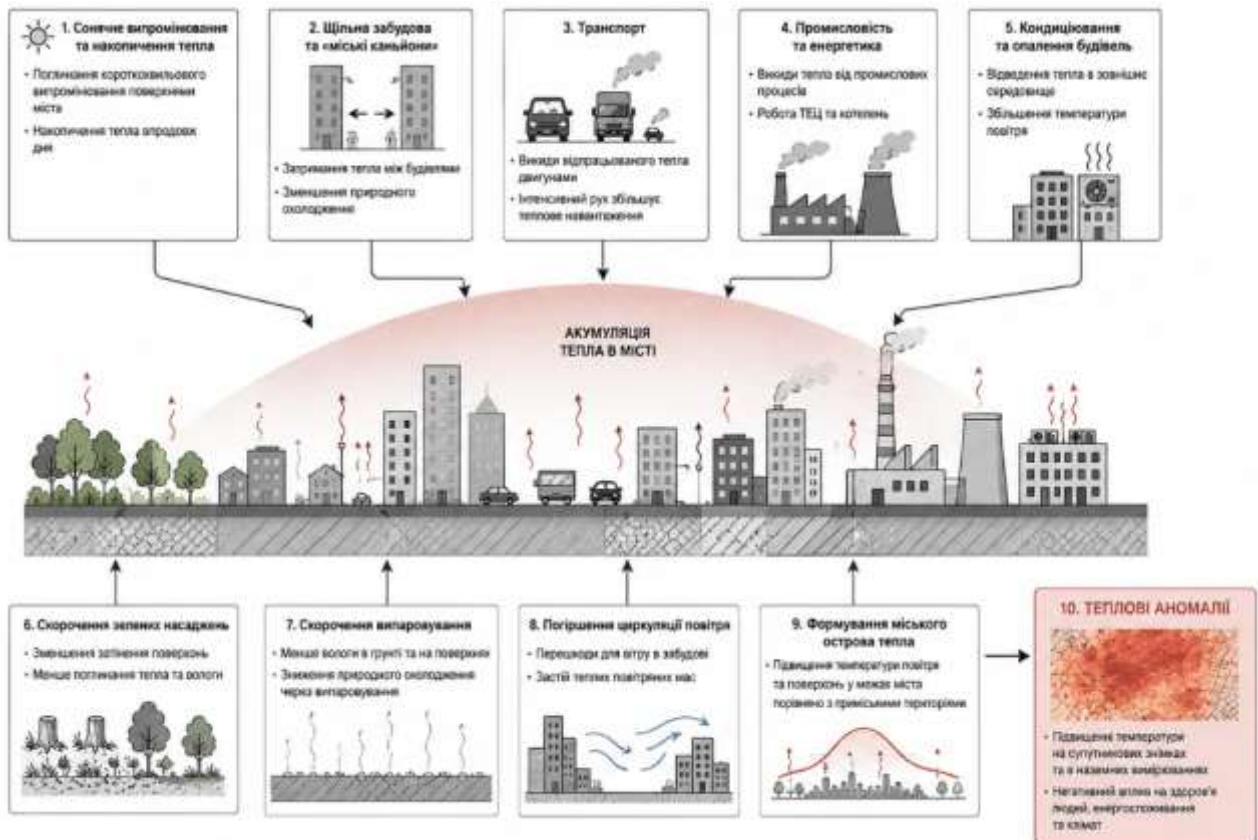


Рис. 2. Механізм формування теплових аномалій у межах міської забудови

Суттєвим збудуючим фактором є також мікроморфологія самого міста. Висотна забудова утворює так звані «міські каньйони» вузькі простори між будівлями, де природний повітрообмін різко погіршується. Потоки вітру, здатні відводити тепле повітря від поверхні, стикаються з перешкодами і розсіюються. Завдяки цьому тепло концентрується в нижній частині міської атмосфери, а нічне охолодження відбувається ширше, ніж на відкритих територіях. Додатково до цього, багатократне відбиття теплового випромінювання між фасадами будівель забезпечує ефективне поглинання радіальної поверхні [4].

Окремою складовою теплового острова є так звана антропогенна теплота тепло, яке виробляється разом у ході господарської діяльності людини. Двигуни внутрішнього згоряння, системи опалення та кондиціонування, виробничі процеси, серверні стійкості та побутова електроніка усе це вивільняється у навколишньому середовищі колосальних обсягів теплової енергії. У великих містах з розвиненою промисловою базою цей внесок може бути порівняним із потоком сонячної радіації на одиниці площі.

Стан атмосферного повітря над містом також зворотно впливає на термічний баланс. Висока концентрація аерозолів, сажових частинок, вихлопних газів та промислових викидів змінює радіаційні властивості атмосфери: посилюється поглинання інфрачервоного випромінювання поверхні та сповільнюється нічне охолодження через ефект «газової ковдри» над містом [4].

У науковій літературі розрізняють два основних типи теплових островів. Атмосферний тепловий острів (Atmospheric UHI) характеризується підвищеною температурою повітря в межах міста з навколишньою місцевістю, тоді як поверхневий тепловий острів (Surface UHI, SUHI) виражається через підвищену температуру підстильної поверхні, що збільшується через показник Land Surface Temperature (LST), який підтримується із даними теплового дистанційного зондування [1]. Обидва типи тісно пов'язані між собою, проте для просторового картографування та ГІС-аналізу більш операційним є той самий поверхневий тип, після LST можна визначити з достатньою точністю для великих територій без необхідності розгортання наземних розмірів мережі.

Інтенсивність теплового острова не є постійною і коливається залежно від комплексу умов щільності та поверхневого складу забудови, частки озеленених площ і характеру землекористування, типу матеріалів покриттів та фасадів, сезонних і добових ритмів мікрометеорологічних умов. Особливо контрастні температурні відмінності між центром міста та периферією проявляються в нічний час в умовах антициклональної погоди та слабого приземного вітру, коли природне провітрювання мінімальне [4]. Температурне перевищення між щільно забудованим ядром великого міста та прилеглою сільською місцевістю може досягати 5-17 °C залежно від розмірів міста та характеру антропогенного навантаження [4].

Найвищі температурні показники фактично фіксуються в промислових кварталах, вздовж перевантажених транспортних артерій та в центральних районах із суцільною кам'яною забудовою. Паркові масиви, лісопаркові зони та прибережні смуги водом натомість виступають природними «холодними острівцями» з помітно нижчою температурною поверхнею, що сприятливо

впливає на мікрокліматичні умови прилеглих кварталів [3]. Встановлено чіткий кільказв'язок між рівнем рослинного покриву (вираженим через нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI) та температурою земної поверхні: зростання NDVI систематично корелює зі зниженням LST, що підтверджує принципову важливість збереження та вирощування зеленого каркасу міста [1].

Негативні дослідження теплового острова для населення є різноплановими і добре задокументованими. Тривале перебування в умовах підвищеної температури до теплового стресу, загострення серцево-судинних та респіраторних захворювань, підвищеної смертності у групах ризику зокрема серед людей похилого віку, дітей та осіб з хронічними патологіями [1]. Тепловий дискомфорт водночас стимулює зростання споживання електроенергії — насамперед через збільшення навантаження на систему кондиціонування, що створює закритий причинно-наслідковий ланцюг: більше тепла → більше охолодження → більше споживання енергії → більше викидів → більше тепла [1].

Якість атмосферного повітря в перегрітих міських кварталах посилюється: в умовах високих температур інтенсифікуються фотохімічні реакції, прискорюється утворення тропосферного озону та фотохімічного смогу, підвищується також концентрація вторинних забруднювачів, а термічні інверсії перешкоджають вертикальному розсієнню полутантів [4].

Сучасна методологія дослідження теплових островів активно спирається на методи дистанційного зондування Землі та геоінформаційний аналіз. Датчики теплового інфрачервоного поля на борту космічних апаратів серій Landsat, MODIS, ASTER та Sentinel забезпечують створення простору безперервних полів температури земної поверхні, що є недосяжним принципом при використанні тільки наземної мережі спостережень. Об'єднання таких даних з ГІС-інструментами дозволяє дозволити тематичне картографування зони теплового навантаження, виявити просторові закономірності та спостерігати динаміку змін у часі [2].

1.2. Вплив міських теплових островів на глобальні кліматичні процеси

Клімат Землі в XXI столітті відзначає дедалі очевидніших трансформацій: середньорічні температури зростають, режим атмосферних опадів стає менш передбачуваним, частота та інтенсивність екстремальних погодних подій підвищується. Серед чинників, які живлять ці зміни, особливе місце посідають процеси, пов'язані з масштабною урбанізацією планети. Явище міського теплового острова сьогодні розглядається не лише як локальна кліматологічна особливість окремих міст, а й як чинник, що суттєво негативно впливає на регіональні та осередковано глобальні кліматичні процеси [1].



Рис. 3. Наслідки зміни кількості та інтенсивності атмосферних опадів для водних об'єктів.

Механізм такого впливу є складним і багаторівневим. Міські агломерації, де концентрується переважна більшість світового промислового виробництва, транспортних систем і населення, водночас є основними споживачами первинних енергоресурсів та потужними центрами викидів парникових газів. Підвищення температури в межах міста стимулює зростання споживання електроенергії для охолодження приміщень, що спричиняє додатковий викид CO_2 та тепло від енергетичних установок. Виникає самопідтримуючий процес: теплові острови посилюють попит на охолодження → збільшується виробництво і споживання енергії → збільшуються викиди парникових газів → прискорюється глобальне потепління → інтенсивність теплових островів досягається [1].



Рис. 4. Зміни берегової лінії внаслідок підвищення рівня моря

Радіаційний баланс урбанізованих територій суттєво відрізняється від природних аналогів. Штучні матеріали, що переважають на міській поверхні, поглинають протягом дня значно більший світло сонячного випромінювання, ніжній рослинний покрив. Вночі акумульована теплова енергія вивільняється більше, ніж це відбувається над природними ландшафтами, адже теплова

інерція бетону і асфальту значно вища за теплову інерцію обґрунтовану або листяного полог [3]. Дисбаланс нічного охолодження є однією з цих ключових причин того, що температурні аномалії над містом зберігаються навіть при зміні синоптичної ситуації.



Рис.5. Основна причина для загрози екосистем

Теплові острови помітно впливають і на динаміку атмосфери в мезомасштабі. Контрасти температур між перегрітим міським ядром і прохолодним сільським оточенню генерують горизонтальні градієнти тиску, що спричиняють переміщення повітряних мас від периферії до міста так називають «міську циркуляцію». Нагрівання поверхні стимулює конвекцію висхідні потоки теплого повітря, які підвищують хмарність та можуть змінити характер і розподіл опадів. також, у ряді досліджень зафіксовано підвищення інтенсивності зливу над великими містами та в їхніх «підвітряних» секторах [4].

Погіршення якості повітря ще одна сфера, де теплові острови виявляють непрямий вплив на глобальні процеси. У перегрітих міських зонах

прискорюється утворення тропосферного озону газу, що є одночасно забруднювачем та парниковим агентом. Стійкі термічні інверсії, що формуються над містами у безвітряну погоду, перешкоджають вертикальному розсіюванню забруднюючих речовин і посилюють локальні ефекти парникового типу [4].

Взаємодія між тепловими островами та глобальним потеплінням є двосторонньою. Кліматичні тренди посилюють базову температуру та забезпечують тривалість теплових хвиль а відтак виконання умов у містах буде більш дискомфортним. У свою чергу, міські теплові острови збільшують загальний термічний фон урбанізованих регіонів, що в глобальній масштабі передбачає відчутний внесок у статистику потепління. За деякими оцінками, значна частина зафіксованого підвищення температури в XX-XXI століттях пояснюється саме зростанням частки урбанізованих поверхонь відповідно до кліматичних станцій, а не до глобальних кліматичних змін.[6]

Особливо яскраво вплив теплових острівних ефектів на регіональний клімат проявляється у великих мегаполісах та промислово насичених агломераціях. Висока щільність забудови, потужна транспортна система та значна концентрація промислових потужностей формують у таких містах аномально високий тепловий фон, який може поширюватися на прилеглі приміські зони та змінювати їх кліматичні характеристики [4]. Температурні відмінності між міським ядром і сільською периферією у разі таких сягають кілька градусів, що відзначається порушенням режиму рослинності, строки фенологічних фаз та водного балансу прилеглих екосистем.

Гідрологічний аспект теплових острівних ефектів також заслуговує окремої уваги. Підвищення температури в містах прискорює випаровування і змінює структуру водного балансу: обґрунтовано, що міські парки висихають швидше, скорочується час між опадами і стоком. У поєднанні з широким розповсюдженням водонепроникних пошкоджень це сталося до того, що дощові водні потоки швидко скидаються в каналізацію, а не поповнюють обґрунтовані горизонти, що додатково зменшує природний потенціал міського середовища до самоохолодження [3].

Вирішення проблеми взаємовпливу теплових островів і глобального клімату потребує системного підходу одночасно на рівні окремих міст і в рамках загальнодержавних та міжнародних кліматичних стратегій. До діючих заходів адаптації належать: наросування зеленого каркасу міста та збереження природних вологих угідь у міській межі, запровадження стандартів «холодних» покриттів для доріг і дахів, оптимізація транспортних потоків, підвищення енергетичної ефективності будівель, розвиток екологічних видів транспорту та формування зв'язних зелених коридорів у плануванні. Комплексне застосування цих підходів дозволяє не лише знизити локальну температуру в місті, а й скоротити обсяг парникових викидів і зменшити внесок міських агломерацій при прискоренні глобального потепління [1].

1.3. Міське середовище як джерело парникових газів

Міста займає центральне місце в глобальному енергетичному метаболізмі. Попри те, що урбанізовані території займають лише близько 2–3 % суходонної поверхні Землі, вони споживають понад 70 % виробленої первинної енергії та генерують зіставну кількість антропогенних викидів парникових газів. Концентрація виробничих потужностей, транспортної інфраструктури, житлового і комерційного фонду на відносно невеликих площах робить міста ключовими точками перетину між економічним зростанням, енергоспоживанням і кліматичними ризиками [1].

Парниковий ефект щось типу явище, якщо пов'язане з промисловою діяльністю людства, проте за умов грамотного підходу до охорони навколишнього середовища його негативний вплив можна суттєво зменшити. Сьогодні питання про те, як саме господарська діяльність людини змінює клімат Землі, стає деактуальнішим і привертає увагу як науковців, так і широкого загалу.

Особливе порушення те, що концентрація парникових газів в атмосфері невпинно зростає. Це веде до нагрівання поверхонь Землі та нижніх шарів атмосфери і, найімовірніше, є єдиним із головних причин того, що потепління

клімату, яке спостерігають за участю протягом останніх десятиліть. Частина сонячної радіації, що не відбивається назад у космос, поглинається земною поверхнею і перетворюється на тепло. Будь-яке тіло, температура якого досягає абсолютного нуля, само по собі є джерелом випромінювання і чим воно гарячіше, тим більше енергії і тим коротше хвилі воно випускається. Максимальна земна поверхня значно нижча за температуру поверхні Сонця і коливається в межах від 190 до 350 К, тому Земля випромінює довгохвильову радіацію в межах 4-120 мкм так зване власне випромінювання земної поверхні. Атмосфера нагрівається здебільшого не від прямого поглинання сонячної короткохвильової радіації, а від поглинання цього власного випромінювання Землі. Додатково вона отримує тепло через теплопровідність та конденсацію водяної пари. Нагріта таким чином атмосфера, у свою чергу, сама починає випромінювати інфрачервону радіацію приблизно в тому ж розділі довжиною хвилі. Ця спрямована вниз атмосферна радіація називається зустрічним випромінюванням [3].

Атмосфера діє як своя рідна «ковдра» для планети, захищаючи її від сильного нагрівання вдень і від швидкого охолодження вночі. Без неї середня температура на поверхні Землі опустилася до -23°C , для якої реалізації життя практично неможливо. Завдяки атмосфері ця температура тримається на рівні $+15^{\circ}\text{C}$. Свою цю властивість і називаю парниковим ефектом за аналогією з теплицями, де скло затримує тепло всередині. Таким чином, зустрічне випромінювання атмосфери є одним із ключових джерел тепла для земної поверхні поряд із поглиненою сонячною радіацією. Зі зростанням хмарності зустрічне випромінювання посилюється, після самих хмар активно випромінюються довгохвильова радіація. Газы, що негативно в атмосфері екрану, які використовують інфрачервоне випромінювання і тим самим ускладнюють нагрівання поверхні землі та нижніх шарів атмосфери, і використовуються парниковими. У невеликих кількостях вони існували в атмосфері практично в течії усієї геологічної історії планети.

Найважливішим природним парниковим газом є водяна пара. Вона поглинає і випромінює довгохвильову інфрачервону радіацію в зоні 4,5-80 мкм,

а найбільший її вплив на парниковий ефект забезпечує смугове поглинання 5-7,5 мкм. Водночас частина випромінювання в областях 3-5 мкм та 8-12 мкм, які є вікнами прозорості, без перешкод проходять крізь атмосферу у відкритий космос.

Парниковий ефект водяної пари підсилюється смугами поглинання вуглекислого газу, який викликає в атмосферу внаслідок вулканічної, природного кругообігу вуглецю, розкладання діяльності органічних речовин у підставі при нагріванні, а також діяльність через людину головним чином унаслідок спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу) та знищення лісів. Крім вуглекислого газу, в атмосфері зростає вміст метану, закису азоту та тропосферного озону. Метан надходить з боліт і тектонічних тріщин у земну кору, а підвищенню його концентрації сприяють розвитку сільськогосподарського виробництва (насамперед розширення площі зрошуваних рисових полів), збільшенню природного поголів'я худоби, спалювання біомаси та видобутку газу. Концентрацію закису азоту збільшують використання азотних добрив, авіаційних викидів та окислювальної реакції. Тропосферний озон накопичується внаслідок фотохімічних реакцій між вуглеводнями та оксидами азоту, що відбувається при спалюванні викопного палива під дією сонячного проміння. Концентрація цих газів зростає швидше, ніж концентрація вуглекислого газу, і надалі їх відносний внесок у парниковий ефект може лише збільшитися [3]. Окремо слід згадувати сажовий аерозоль промислового походження з радіусом часток 0,001-0,05 мкм: підвищення його концентрації в атмосфері також посилює парниковий ефект. Загалом підвищення в атмосфері Землі парникових газів і аерозолів здатне суттєво підвищити глобальну температуру та спричинити кліматичні зміни, екологічні й соціальні наслідки, які поки що складно передбачити.

Міське середовище є одним із провідних джерел атмосферного забруднення. Спалювання палива в котлах і двигунах транспортних засобів супроводжується утворенням оксидів азоту, що спричиняють хімічні зміни в атмосфері. Найбільш інтенсивне забруднення приземного шару атмосфери відбувається в мегаполісах, великих містах та промислових центрах, де

зосереджені потужний автотранспорт, теплоелектроцентралі, котельні та інші енергетичні установки, що працюють на вугіллі, мазуті, дизельному паливі, природному газі й бензині. Частка автотранспорту в загальному обсязі забруднення атмосферного повітря сягає 40-50%. Окремо слід відзначити небезпечний фактор аварії на атомних електростанціях (зокрема, Чорнобильська катастрофа) та випробування ядерної зброї в атмосфері: для них характерне швидке поширення радіонуклідів на величезній відстані та тривалий характер радіаційного забруднення. Хімічні та біохімічні виробництва несуть поточну загрозу аварійних вірусів токсичних речовин, мікробів і вірусів, здатних викликати епідемії серед людей та тварин.

Аналіз 65 міст на всій території Північної Америки показав, що визначальним фактором ефекту міського теплового острова є те, що міські райони впродовж дня повертають накопичене тепло назад у нижні шари атмосфери через конvekцію тобто передачу теплової енергії від нагрітої поверхні до навколишнього повітря. Це відкриває давнє переконання, що головним рушієм цього ефекту є зниження випарного охолодження через втрату рослинності. Цей, що випарне охолодження це природний процес випаровування вологи з рослин і водою, під час якого тепло поглинається з навколишнього середовища і температура повітря знижується.

Дослідники вважають, що недостатньо ефективна конvekція є особливо гострою проблемою у вологому кліматі. Лише один цей фактор здатний підвищити середню денну температуру не менше ніж на три градуси Цельсія.

Найчистіше повітря над поверхнею океану. У сільській місцевості пилоподібних домішок на 10 разів більше, ніж над водою, над невеликими містами у 35 разів, а над промисловими центрами зависають важкі хмари, в яких пил міститься на 150 разів більше, ніж над океаном. Шар забрудненого повітря над великими містами сягає висоти 1,5-2,0 км. Влітку він залишається до 20% сонячного проміння, а взимку, коли природного світла і так бракує, поглинає половину його кількості. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) за 2014 рік, щороку у світі через забруднення атмосферного повітря помирає близько 3,7 мільйонів людей.

Загальна кількість смертей, пов'язаних із впливом забрудненого повітря в приміщеннях та в атмосфері, сягає 7 мільйонів на рік. За висновками Міжнародного агентства з вивчення раку, забруднення повітря є основною причиною онкологічних захворювань. Астрономи, у свій час, фіксують зменшення прозорості атмосфери з плинним часом. Моделювання кліматичних змін та забруднення повітря, пов'язаних з індустріальним розвитком людства, показало, що щорічно приблизно 470 000 смертей може бути пов'язано з впливом атмосферного озону і близько 2 мільйонів із забрудненням повітря високодисперсними фракціями. Головними джерелами цього утворюються парникові гази речовини, які пропускають сонячне проміння, але перешкоджають тепловому довгохвильовому випромінюванню випаровування з поверхні Землі. Наявність таких газів в атмосфері планети підвищується до температури її нижніх шарів відповідно до ефективної температури, тобто температурою теплового випромінювання, яка є з космосу.

За оцінкою їх впливу на тепловий баланс Землі, основні парникові гази розташовуються в такому порядку:

1. Водяна пара газоподібний стан води без кольору, смаку та запаху, що міститься в тропосфері та утворюється молекулами води при її випаровуванні.
2. Оксид вуглецю безбарвний газ без запаху зі злегка кислим смаком.
3. Вуглекислий газ середня концентрація в атмосфері Землі становить приблизно 0,0395%.
4. Метан найпростіший вуглеводень, безбарвний газ без запаху для нормальних умов, малорозчинний у воді, легший за повітря; основний компонент природного газу (77–99%). За сучасними даними, великі концентрації метану складаються й в атмосферах планети-гігантів Сонячної системи.
5. Озон алотропна модифікація кисню, що складається з тришатних молекул O_3 ; за нормальних умов представляє собою блакитний газ. Висока окиснювальна здатність озону та утворення вільних радикалів кисню в реакціях

за його участю обумовлюють його значну токсичність і здатність за певних умов спричинити передчасну смерть.

Внесок кожного газу в парниковий ефект посилюється як його молекулярними характеристиками, так і концентрацією в атмосфері. Наприклад, метан для однієї молекули приблизно у вісімдесят разів сильніший парниковий агент, ніж вуглекислий газ, однак через значну нижчу концентрацію в атмосфері його загальний внесок залишається меншим. Якщо оцінювати внесок у загальний парниковий ефект, то найбільш важливим є: водяна пара 36-72%, вуглекислий газ 9-26%, метан 4-9%, озон 3-7%.

Водночас неможливо змінити точний відсотковий внесок кожного окремого газу, деякі з них поглинають і випромінюють радіацію в однакових частотних зонах, через що загальний парниковий ефект не дорівнює простий сумі їхніх індивідуальних внесків. Верхні межі зазначених елементів з відповіддю, коли кожен газ розглядається ізольовано; нижні межі враховують взаємне перекриття між газами. Варто також зазначити, що хмари головний негазовий чинник парникового ефекту Землі також поглинають і випромінюють інфрачервону радіацію, тим самим впливаючи на загальні радіаційні властивості атмосфери. Наприклад, якщо міський мікроклімат змінюється внаслідок благоустрою скажімо, через розбивку міського парку, то енергоспоживання будівель у прилеглому районі буде відрізнятися від середнього показника по всьому місту.

Перші відомості про різницю температури повітря між міськими та сільськими територіями з'явилися ще у відомому дослідженні Люка Говарда 1820 року. У своїй книзі «Клімат Лондона» (The Climate of London) він навів результати вимірювання температури повітря в центрі міста та в районі Тоттенхем Грін, що на той час було сільською місцевістю на півночі від Лондона. Спостереження, які вели протягом кількох місяців, незмінно показали: температура в Лондоні помітно вище, ніж у приміській зоні, особливо в нічні години. Говард зафіксував цю різницю простим рівнем:

$$T_{\text{місто-село}} = T_{\text{місто}} - T_{\text{село}}$$

якщо на свою простоту, це рівень викликало широкий інтерес серед учених. Аж до 1960-х років аналогічні вимірювання проводилися в різних містах світу, і ефект міського острова тепла був зафіксований у найбільш маніпулятивних урбанізованих районах. початковий етап досліджень, що базувався на порівнянні цієї температури між містом і навколишньою сільською місцевістю, увійшов в історію науки під назвою «постережної епохи» міської кліматології.

Починаючи з 1980-х років зареєстровані зосередилися на виявленні справжніх причин ефекту міського острова тепла та на аналізі чинників, які впливають на міський клімат. За результатами тогочасних досліджень було виокремлено сім найбільш значущих факторів, що формують міський мікроклімат: посилене короткохвильове випромінювання через багатократне відбиття від фасадів будівель і від поверхні землі; посилене довгохвильове випромінювання, що спричиняється головним чином забрудненням повітря; зниження втрати тепла через довготривале випромінювання внаслідок геометрії «міського каньйону», яка перешкоджає вивільненню тепла; антропогенні джерела тепла від автомобілів, промислових підприємств тощо; підвищення запасу тепла через використання будівельних матеріалів і покриттів доріг; зниження випаровування через скорочення водних об'єктів і рослинності; зниження турбулентного теплообміну через низьку швидкість вітру і слабку вентиляцію в міських кварталах.

Ще однією причиною виникнення теплових аномалій у містах є планування вуличної мережі (рис. 9). Через неоднорідну структуру вулиця продовжує застій повітряних мас, що завдає найбільшої шкоди мешканцям. Існує два основних типи вуличної мережі: паралельна система та блокова. Блочна система переважає в містах з багатьма або в їхніх історичних районах.



Рис.9. Системи вулиць міст

Лише тепер люди починають усвідомлювати, як можна боротися із застоєм повітря в місті, і будують нові квартали з паралельним розташуванням вулиць. Утім, паралельна система поки що розширена значно менше і зустрічається переважно в молодих містах. Слід також виконати, що вибір планувальної системи залежить від кліматичної зони: блочна система в північних регіонах утримує тепло і захищає на опаленні, тоді як у містах південних широт паралельна система забезпечує кращу циркуляцію повітря та природне охолодження.

Більшість міст України має блочну або комбіновану систему вулиць, що створює передумови для поганої циркуляції повітря, його застою і, як наслідок, виникнення теплових аномалій та завдає шкоди міській екосистемі [1].



Рис.10. Місті Київ приклад розміщення вулиць

Як видно на прикладі Києва (рис. 10), вулична мережа є блочною, що зумовлює несприятливу циркуляцію повітря в місті. Частково це компенсує значну кількість парків, яких, щоправда, стає менше через забудову частини міста, а також центральним розташуванням поряд із річкою Дніпро. Хоча ситуація в усіх містах України, і далеко не всі з них мають достатній обсяг зелених насаджень та великих водних артерій. В Україні лише два міста мають паралельне розташування вулиць Миколаїв (рис. 11) та Ізмаїл (рис. 12).

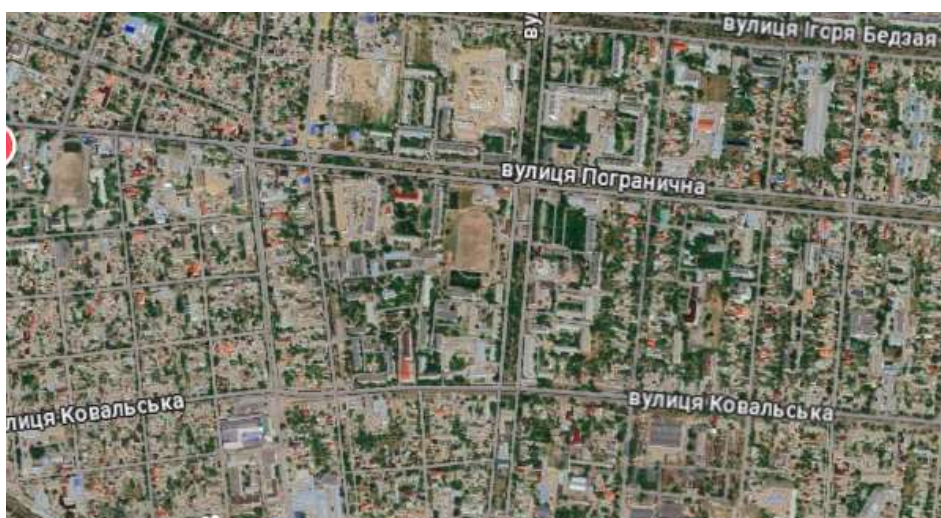


Рис.11. Місті Миколаїв приклад розміщення вулиць

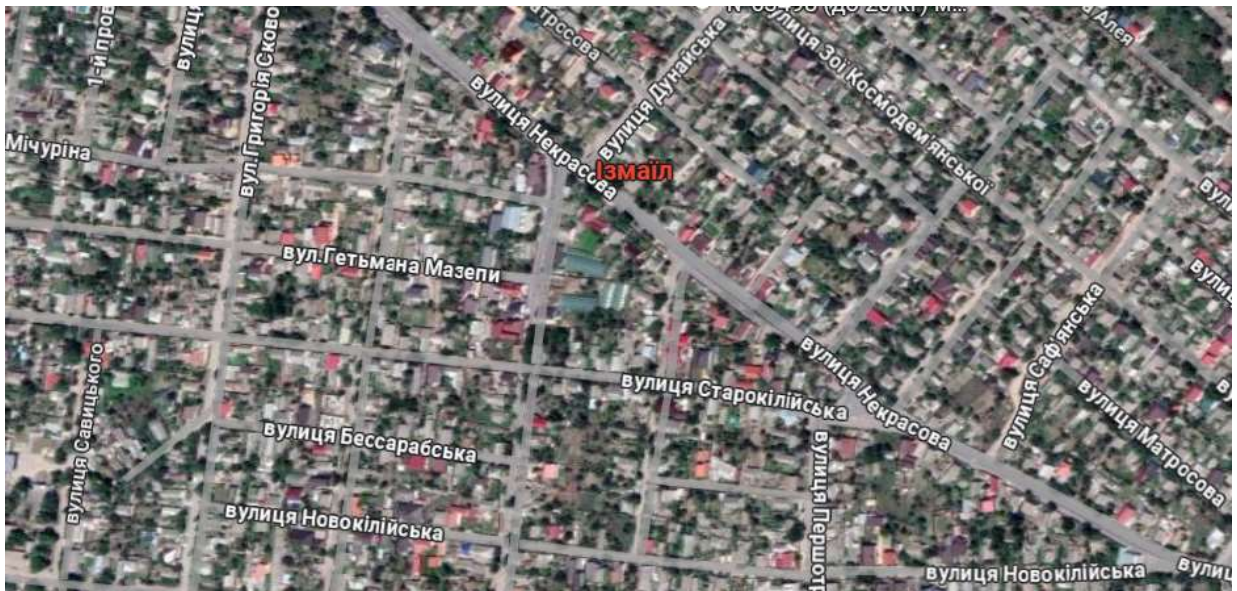


Рис.12. Місті Ізмаїл приклад розміщення вулиць

Обидва вони розташовані на чорноморському узбережжі, що дозволяє їм охолоджувати свою територію в теплу пору року за рахунок постійної циркуляції морського повітря.

Якщо порівняти ці міста з Римом (рис. 13) та Берліном (рис. 14) містами Європи з розвиненою паралельною вуличною мережею, яку відзначили навіть у їхніх найдавніших кварталах, то це результат про те, що вже тодішні вчені та містобудівники усвідомлюють важливість повітряної циркуляції для комфортного проживання в місті.



Рис.13. Місті Рим(Італія) приклад розміщення вулиць

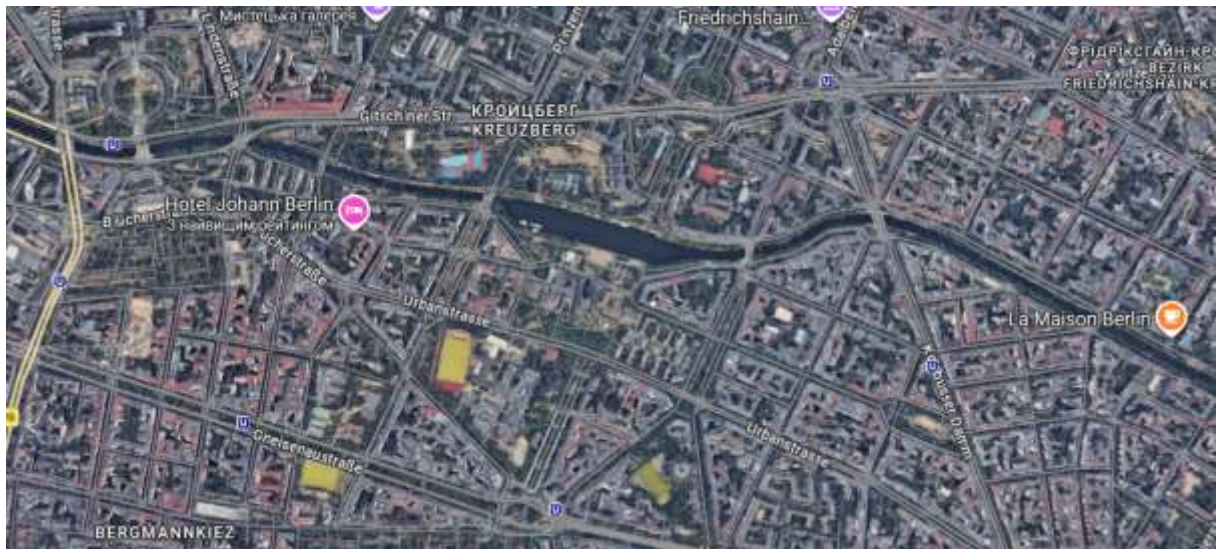


Рис.14. Місті Берлін(Німеччина)приклад розміщення вулиць

Якщо взяти до уваги, що через ефект міського острова тепла температура в міських районах протягом усього року в середньому вищі, ніж у сільській місцевості, це може давати певний вигаш у скороченні витрати на опалення взимку. Однак, якщо розглянути проблему теплої країни, де навантаження на системи охолодження влітку перевищує річні витрати на опалення, ефект міського острова тепла лише збільшує витрати на кондиціонування. У разі такого його вже аж ніяк не можна назвати позитивним явищем.

1.4. Сучасні методи дослідження та аналізу теплових островів

Розширення наукового інтересу до міських теплових островів упродовж останніх трьох десятиліть стало можливим за рахунок синергії кількох тенденцій: стрімкому розвитку технологій супутникового зондування, появи відкритих архівів просторових даних, доступності потужного програмного забезпечення для ГІС-аналізу та методологічного прогресу в галузях кліматології, урбаністики та геоінформатики. Сьогодні дослідники мають у своєму розпорядженні різноманітний і постійно поповнюваний арсенал методів від традиційних наземних спостережень до сучасних хмарних обчислювальних платформ і алгоритмів машинного навчання [2].

Класична основа досліджень теплових островів мережа метеорологічних станцій зберігає своє значення насамперед для отримання довгострокових однорідних рядів спостережень за температурою повітря. Проте точкові вимірювання земельних станцій принципово обмежені в здатності відобразити просторову неоднорідність температурного поля міста навіть у межах одного кварталу умови можуть істотно відрізнятись залежно від мікрорельєфу, типу покриття та наявності рослинності. Це обмеження і спонукало науковців до пошуку методів, здатних забезпечити просторово безперервні дані [4].

Дистанційне зондування Землі стало методологічним проривом у вивченні теплових островів. Ви вперше отримали змогу спостерігати за температурою земної поверхні на рівнях цілих міст та агломерацій з аналітичною регулярністю, дослідники детально описали просторову структуру теплових аномалій, недоступних приземному моніторингу. Опорними джерелами даних у цій галузі є мультиспектральні сенсори космічних апаратів серії Landsat (починаючи з 1972 року), широкосмуговий спектрорадіометр MODIS, встановлений на супутниках Terra та Aqua, тепловий радіометр ASTER та, у новітній період, дані Sentinel від Європейського космічного агентства [1].

Центральним температурним вимірювальним параметром дослідженні теплових островів є земна поверхня (Land Surface Temperature, LST). Його розрахунок обґрунтовується на вимірі інтенсивності теплового інфрачервоного випромінювання поверхні у відповідних спектральних каналах і вимагає врахування кількох поправкових факторів. Алгоритм Mono Window, запропонований для даних Landsat, використовує лише один тепловий канал і потребує попередніх відомостей про температуру і вологість атмосфери. Метод Single Channel розширює цей підхід і може використовуватися для окремих докладних метеорологічних даних. Алгоритм Split Window, розроблений для сенсорів з двох теплих каналів (наприклад, MODIS), використовує різницю яскравостей у суміжних каналах для корекції атмосферного поглинання та забезпечує підвищену точність визначення LST. Найбільш фізично суворим методом є розв'язання рівня радіаційного переносу (Radiative Transfer Equation),

який явно враховує всі атмосферні склади, хоча і вимагає детального радіозондування атмосфери [2].

Важливим допоміжним параметром є коефіцієнт теплового випромінювання поверхні (Land Surface Emissivity, LSE) міра здатності поверхні випромінювати теплову енергію відповідно до ідеального абсолютно чорного тіла. Різні типи поверхонь (асфальт, бетон, ґрунт, рослинність, вода) мають різні значення LSE, що відповідають за розраховані значення температури. Для визначення LSE широко застосовуються методи на основі вегетаційних індексів зокрема NDVI-based emissivity approach, що встановлює залежність між значеннями NDVI та коефіцієнтом випромінювання [2].

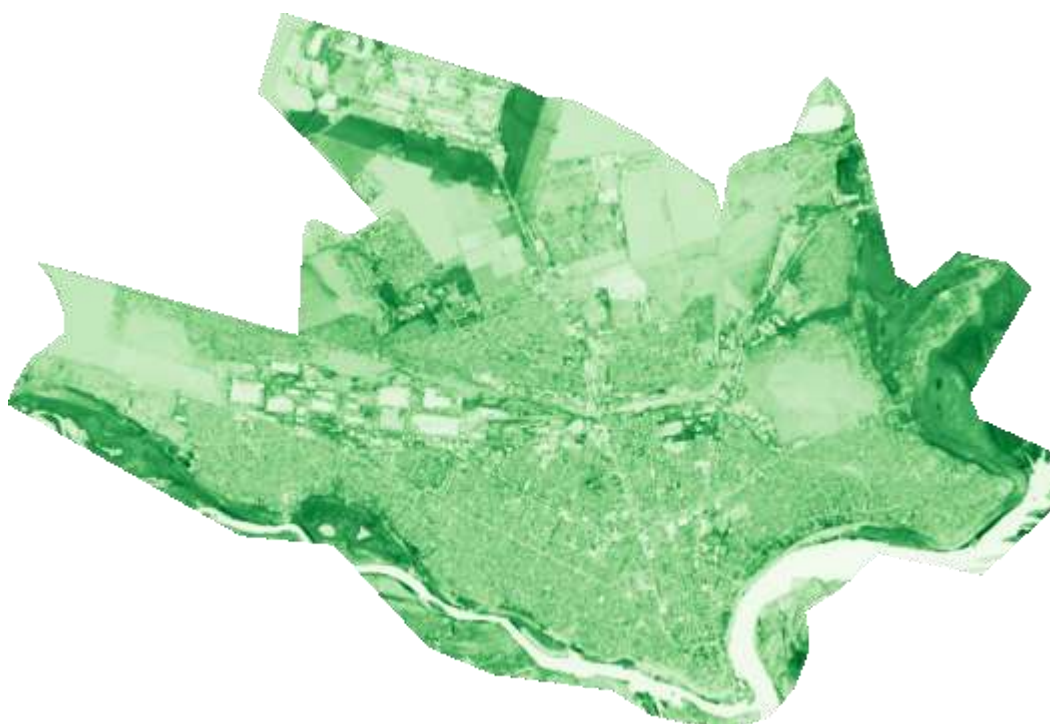


Рис.15. Приклад спектрального каналу NDVI на прикладі місця дослідження м. Нікополь

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) є одним із найбільш уживаних просторових індикаторів у дослідженнях теплових островів. Обчислюючи як нормовану різницю між відбивністю у ближньому інфрачервоному та червоному каналах, NDVI ефективно виявляє ділянки із розвиненим зеленим покривом та дозволяє кілька оцінити вплив рослинності на температуру поверхні. Встановлено стійку обернену залежність: ділянки з високим NDVI, як правило, демонструють

знижені значення LST, тоді як щільно забудовані або покриті асфальтом райони характеризуються мінімальними NDVI і водночас максимальними температурами [1].

Для обробки супутникових даних та інтеграції результатів аналізу в геоінформаційне середовище використовують такі програмні платформи, як ArcGIS, QGIS, ENVI та ERDAS Imagine. Кожна з них має свій набір спеціальних переваг: ArcGIS вирізняється розвиненим функціоналом геообробки та картографування, QGIS забезпечує відкрите та гнучко середовище з можливістю інсталяції модулів обробки знімків (зокрема Semi-Automatic Classification Plugin), ENVI орієнтований насамперед для аналізу гіперспектральних і теплових даних, Google Earth Engine забезпечує доступ до петабайтних архівів комп'ютерних знімків у хмарному обчислювальному середовищі без необхідності локального завантаження даних [3].

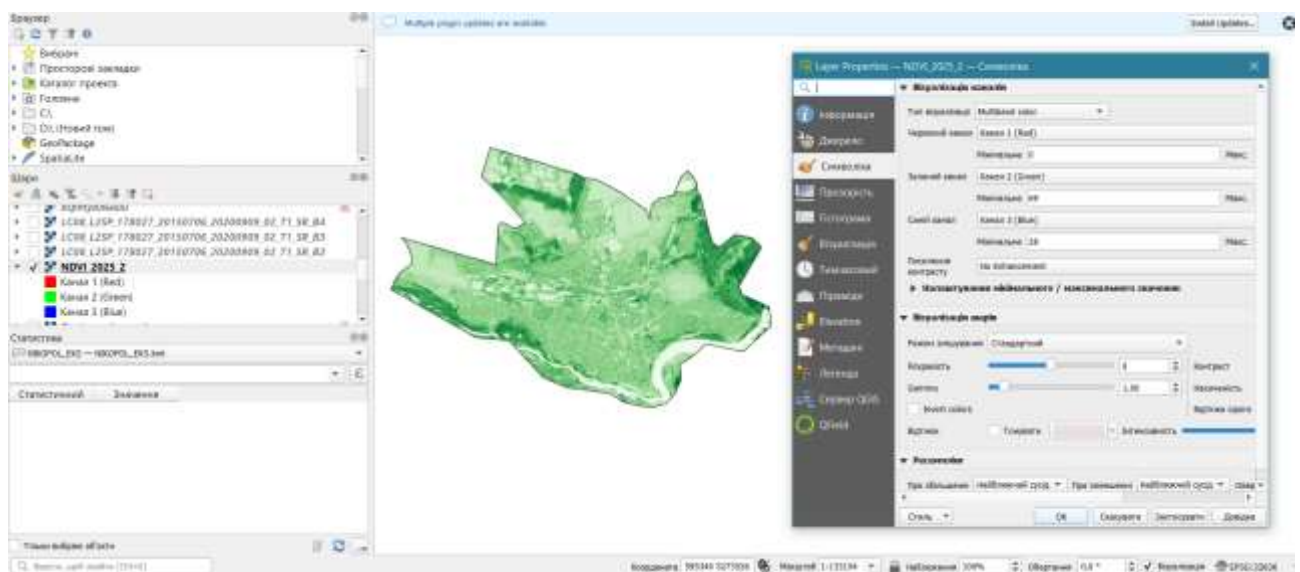


Рис.16 Приклад обробки супутникового знімку для аналізу даних в QGIS

Хмарна платформа Google Earth Engine заслуговує особливу увагу як методологічна новація останнього десятиліття. Вона дозволяє автоматизувати обробку великих серій знімків і будувати часові ряди температурних показників, що було б практично недосяжним при традиційному локальному опрацюванні даних. Це відкриває можливості для аналізу довгострокових трендів зміни теплових островів та просторово-часового моделювання їх динаміки.

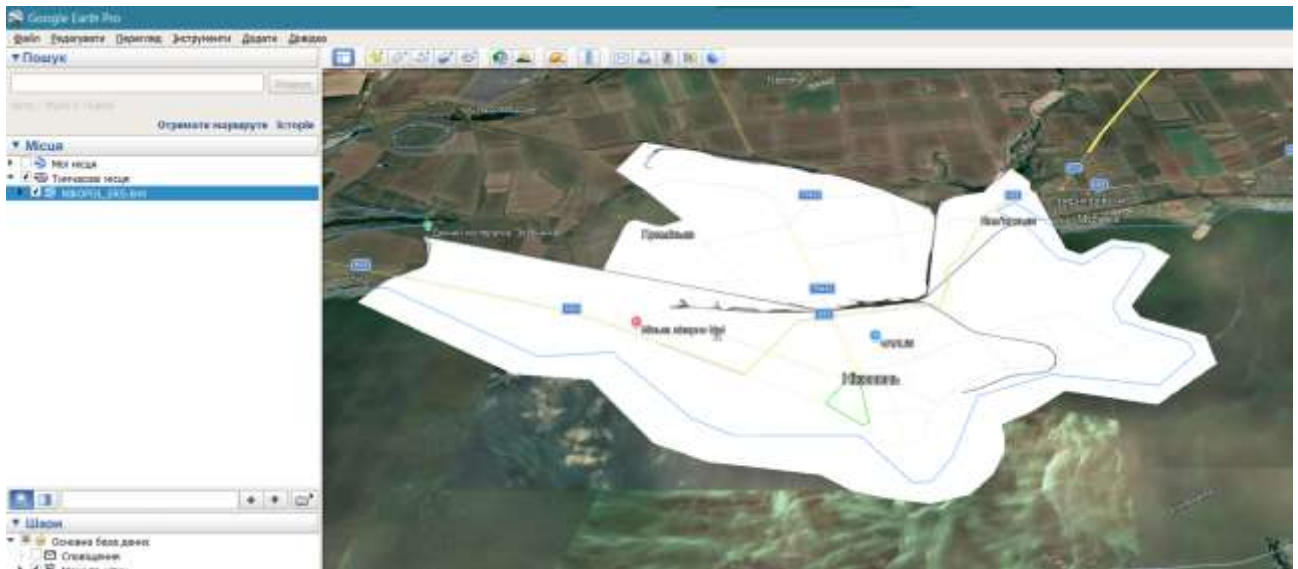


Рис.17 Приклад використання Google Earth Engine для майбутнього перенесу даних

Значний внесок у розуміння просторової структури теплових аномалій з допомогою геостатистичних методів. Інтерполяційні алгоритми (зокрема крігінг) дозволяють будувати безперервні температури поверхні на основі дискретних спостережень, кластерний аналіз виявляє просторово однорідні зони теплового навантаження, побудова ізотерм унаочнює межі теплових аномалій, а просторово-часовий аналіз розкриває динаміку їх розвитку за вибраний проміжок часу [4].

Середніх методів дедалі більшого поширення нових відбувається аерофотозйомка та тепловізійна зйомка з безпілотних літальних апаратів. Висока просторова роздільна здатність та нучність планування польотів виробляє БПЛА ефективним засобом для детального обстеження окремих кварталів, промислових об'єктів або будівель, де рівень просторової деталізації мобільних знімків є недостатнім для оперативного аналізу.

Стрімко зростає інтерес і до застосування методів машинного навчання у дослідженнях теплових островів. Алгоритми класифікації, нейронні мережі глибокого навчання та регресійні моделі здатні автоматично ідентифікувати ділянки теплових аномалій, виявляти неочевидні зв'язки між причинами формування островів та оцінювати вплив різних сценаріїв зміни землекористування на температурний режим міста. Поєднання таких методів із

традиційними підходами ДЗЗ відкриває нові горизонти для прогнозування змін теплового клімату міста.

Найбільшу аналітичну цінність дає комплексний підхід, що складається з супутникового моніторингу, ГІС-аналізу, даних наземних метеостанцій, статистичних методів і прикладного моделювання в єдиній методологічній системі. Такий підхід дозволяє не тільки фіксувати поточний стан теплового поля міста, а й виявляти руйнівні сили його формування та прогнозувати розвиток теплових аномалій при різних сценаріях урбаністичного розвитку.

РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

2.1. Вибір та формування вихідних даних. Опис інформаційних ресурсів, програмних ресурсів

Дослідження теплових аномалій у межах урбанізованих територій потребує використання значного обсягу просторової, картографічної та тематичної інформації, отриманої з різноманітних джерел. Надійність і достовірність результатів аналізу значною мірою визначаються якістю вихідних даних, особливостями їх підготовки та правильністю формування єдиної інформаційної бази дослідження. У сучасній практиці вивчення теплових островів основними джерелами інформації виступають дані дистанційного зондування Землі, результати метеорологічних спостережень, цифрові картографічні матеріали та геоінформаційні ресурси [1].

Особливе значення під час дослідження теплових аномалій мають супутникові знімки, які забезпечують можливість отримання об'єктивної інформації про температурний стан земної поверхні та просторові закономірності поширення теплових аномалій. Серед численних джерел супутникових даних найбільшого поширення набули матеріали космічної програми Landsat, що характеризуються відкритим доступом, значним архівом спостережень та наявністю теплових інфрачервоних каналів.

Програма Landsat є однією з найдовших безперервних програм супутникового моніторингу Землі та забезпечує систематичне отримання даних з 1972 року. У контексті дослідження теплових островів найбільший інтерес становлять супутники Landsat 5, Landsat 7 та Landsat 8, обладнані сенсорами, здатними реєструвати теплове випромінювання земної поверхні [2]. Саме на основі цих даних виконується розрахунок температури поверхні та подальше виявлення ділянок із підвищеним тепловим навантаженням.

У процесі виконання досліджень найчастіше використовуються такі супутникові системи:

- Landsat 5 TM (Thematic Mapper);
- Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus);
- Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor).

Широке використання даних Landsat пояснюється низкою суттєвих переваг. Насамперед це відкритий доступ до архівних і сучасних супутникових матеріалів, достатня просторова роздільна здатність для дослідження міських територій, наявність теплових каналів та можливість проведення багаторічного моніторингу. Важливою перевагою також є сумісність даних із більшістю сучасних геоінформаційних систем і програмних продуктів для обробки матеріалів дистанційного зондування Землі.

Основним показником, який використовується для виявлення теплових аномалій, є температура земної поверхні (Land Surface Temperature, LST). Її визначення базується на аналізі теплового інфрачервоного випромінювання, зафіксованого супутниковими сенсорами. Для супутника Landsat 8 такі розрахунки виконуються на основі даних теплових каналів TIRS Band 10 та Band 11 [2]. Отримані значення температури поверхні використовуються для побудови тематичних карт та аналізу просторової структури міських теплових островів.

Одним із ключових етапів підготовки вихідної інформації є відбір супутникових знімків. Для забезпечення достовірності результатів необхідно використовувати матеріали з мінімальним рівнем хмарності та відсутністю суттєвих атмосферних спотворень. Найбільш придатними для дослідження теплових аномалій вважаються знімки літнього періоду, коли температурні контрасти між різними типами поверхонь проявляються найвиразніше [1].

Крім супутникових даних, у роботі використовуються матеріали метеорологічних спостережень. До основних показників належать температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, швидкість вітру та кількість опадів. Зазначена інформація застосовується під час атмосферної корекції супутникових знімків і використовується для оцінювання впливу погодних умов на формування та розвиток теплових аномалій [2].

Для дослідження взаємозв'язку між рослинним покривом і температурним режимом території використовуються спектральні індекси рослинності. Найбільш поширеним серед них є нормалізований диференційний індекс рослинності NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Даний показник дозволяє визначити густоту та стан рослинного покриву, а також встановити закономірності впливу озеленення на температурний режим урбанізованих територій [1].

Важливу складову інформаційного забезпечення дослідження становлять цифрові картографічні матеріали. Для проведення просторового аналізу використовуються шари адміністративних меж, забудови, транспортної мережі, зелених насаджень, гідрографічних об'єктів та цифрові моделі рельєфу. Поєднання зазначених даних із результатами аналізу температури поверхні дозволяє визначити фактори формування теплових аномалій та оцінити їхній взаємозв'язок із характером землекористування.

Отримання вихідних матеріалів здійснюється за допомогою спеціалізованих геопорталів та інформаційних платформ. Основними джерелами супутникових даних є USGS EarthExplorer, NASA Earthdata, Copernicus Open Access Hub та Sentinel Hub EO Browser. Зазначені ресурси забезпечують доступ до архівів супутникових знімків і надають можливість здійснювати пошук даних за територією дослідження, датою знімання та іншими параметрами.

Одним із найбільш популярних джерел супутникової інформації є портал USGS EarthExplorer [3]. Його функціональні можливості дозволяють отримувати матеріали космічних місій Landsat, MODIS та інших супутникових систем, що широко використовуються під час вивчення теплових аномалій і моніторингу стану навколишнього середовища.

Для обробки та аналізу вихідних даних використовуються сучасні програмні комплекси дистанційного зондування Землі та геоінформаційні системи. Основними програмними засобами, застосованими у дослідженні, є ArcGIS, QGIS, ENVI та Google Earth Engine.

Геоінформаційна система ArcGIS забезпечує широкий спектр інструментів для роботи з просторовими даними, включаючи створення баз геоданих, аналіз растрової та векторної інформації, побудову тематичних карт і виконання складних геообробних операцій. Завдяки цьому програмний продукт активно використовується під час дослідження теплових аномалій та оцінювання просторових закономірностей їх поширення.

Програмне забезпечення QGIS є сучасною відкритою геоінформаційною системою, яка надає можливість виконувати обробку супутникових знімків, аналіз спектральних індексів і створення тематичних карт. Додаткові можливості забезпечуються використанням модуля Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), що автоматизує окремі етапи обробки матеріалів дистанційного зондування Землі [1].

Для виконання спеціалізованої обробки супутникових даних використовується програмний комплекс ENVI. Його функціональні можливості дозволяють проводити атмосферну корекцію, класифікацію зображень, аналіз спектральних характеристик та розрахунок температури земної поверхні з високою точністю [3].

Окреме місце серед сучасних інструментів займає платформа Google Earth Engine, яка працює в хмарному середовищі та забезпечує доступ до значних архівів супутникових даних. Використання цієї платформи дозволяє автоматизувати процес обробки знімків, здійснювати аналіз часових рядів і виконувати моніторинг температурних змін на великих територіях.

Під час розрахунку температури земної поверхні застосовуються спеціалізовані алгоритми обробки теплових каналів супутникових знімків. До найбільш поширених належать Mono Window Algorithm, Single Channel Algorithm, Split Window Algorithm та Radiative Transfer Equation [2]. Використання зазначених алгоритмів забезпечує можливість отримання достовірних значень температури поверхні та подальшого аналізу теплових аномалій.

Формування єдиної інформаційної бази дослідження передбачає виконання комплексу послідовних операцій, до яких належать збір вихідних

даних, попередня обробка супутникових знімків, атмосферна корекція, географічна прив'язка матеріалів, обрізання зображень відповідно до меж території дослідження, створення тематичних шарів, а також розрахунок температурних показників і спектральних індексів. Реалізація зазначених процедур забезпечує створення цілісного інформаційного середовища, необхідного для проведення подальшого аналізу теплових аномалій у міському середовищі.

2.2. Порівняльний аналіз геопорталів з джерелами даних щодо аналізу теплових аномалій у міському середовищі

У сучасних дослідженнях міських теплових островів та теплових аномалій особливого значення набуває використання спеціалізованих геопорталів і вебплатформ, які забезпечують доступ до супутникових даних дистанційного зондування Землі. Саме такі ресурси формують основу інформаційного забезпечення досліджень, оскільки надають можливість отримувати актуальні та архівні супутникові знімки, виконувати моніторинг температури земної поверхні, аналізувати зміни характеристик міського середовища та здійснювати просторовий аналіз урбанізованих територій.

Сучасні геоінформаційні платформи забезпечують доступ до даних різних космічних програм, серед яких найбільшого поширення набули Landsat, Sentinel, MODIS та ASTER. Кожна із зазначених систем має власні технічні особливості, що визначають сферу її застосування під час дослідження теплових аномалій. Вибір конкретного геопорталу залежить від мети дослідження, необхідної просторової деталізації, часової частоти оновлення даних та можливостей їх подальшої обробки.

Під час оцінювання придатності геопорталів для аналізу теплових островів доцільно враховувати низку ключових критеріїв. Насамперед важливими є наявність теплових інфрачервоних каналів, просторова та часова роздільна здатність даних, доступність архівних матеріалів, можливості попередньої обробки зображень, швидкість отримання інформації та сумісність

із сучасними геоінформаційними системами. Не менш важливим фактором є рівень інтеграції геопорталу з інструментами просторового аналізу та можливість використання отриманих даних у професійному програмному забезпеченні.

Одним із найбільш авторитетних джерел супутникової інформації є геопортал USGS EarthExplorer, який підтримується Геологічною службою Сполучених Штатів Америки. Даний ресурс забезпечує доступ до великого архіву супутникових даних, включаючи матеріали місій Landsat, MODIS, ASTER та інших космічних програм. Основною перевагою EarthExplorer є можливість отримання багаторічних рядів спостережень, що дозволяє здійснювати ретроспективний аналіз розвитку теплових аномалій та оцінювати зміни температурного режиму територій у часовому аспекті.

Особливе значення для дослідження міських теплових островів мають дані супутників Landsat, доступні через EarthExplorer. Наявність теплових інфрачервоних каналів дозволяє виконувати розрахунок температури земної поверхні (Land Surface Temperature, LST), яка виступає одним із головних показників під час виявлення теплових аномалій. Крім того, тривалий період функціонування програми Landsat забезпечує можливість аналізу багаторічної динаміки температурних змін у межах урбанізованих територій [1].

Важливим джерелом супутникових даних є геопортал Copernicus Open Access Hub, створений у межах європейської програми Copernicus. Ресурс надає доступ до матеріалів супутникових місій Sentinel-1, Sentinel-2 та Sentinel-3. Для дослідження міського середовища найбільший інтерес становлять дані Sentinel-2, які характеризуються високою просторовою роздільною здатністю та забезпечують детальне відображення структури забудови, рослинного покриву та інших елементів міського ландшафту.

Водночас дані Sentinel-2 не містять теплових інфрачервоних каналів, що обмежує можливість їх безпосереднього використання для визначення температури земної поверхні. З цієї причини у більшості сучасних досліджень вони застосовуються у поєднанні з матеріалами Landsat. Такий підхід дозволяє

одночасно використовувати високу просторову деталізацію Sentinel-2 та температурну інформацію, отриману із теплових каналів Landsat.

Для оперативного доступу до супутникових даних широко використовується платформа Sentinel Hub EO Browser. Її функціональні можливості забезпечують перегляд супутникових знімків у режимі онлайн, створення тематичних візуалізацій, аналіз спектральних індексів та дослідження часових рядів. Перевагою даної платформи є відсутність необхідності завантажувати значні обсяги інформації на локальний комп'ютер, що значно спрощує попередній аналіз території дослідження.

Для глобального моніторингу температурних процесів широко використовуються дані MODIS, які доступні через платформу NASA Earthdata. Інформація надходить із супутників Terra та Aqua і характеризується високою часовою частотою оновлення. Це дозволяє здійснювати майже щоденний моніторинг температури земної поверхні та аналізувати зміни теплових характеристик територій у короткостроковій перспективі.

Основною перевагою даних MODIS є регулярність спостережень та значне територіальне охоплення. Разом із тим просторова роздільна здатність таких матеріалів поступається даним Landsat і Sentinel, що обмежує їх використання під час детальних досліджень окремих міських кварталів або локальних теплових аномалій. Саме тому дані MODIS найчастіше застосовуються для регіональних і глобальних кліматичних досліджень.

Окрему категорію сучасних геоінформаційних платформ представляють хмарні сервіси обробки супутникових даних. Одним із найпотужніших інструментів даного типу є Google Earth Engine. Платформа забезпечує доступ до великих архівів супутникової інформації та надає можливість автоматизувати процеси обробки зображень, розрахунку температури земної поверхні, визначення спектральних індексів і формування часових рядів. Використання хмарних технологій дозволяє значно скоротити час виконання складних обчислювальних операцій та підвищити ефективність аналізу великих масивів просторових даних.

Крім зазначених ресурсів, у практиці дослідження теплових аномалій використовуються спеціалізовані сервіси NASA Worldview, Google Earth Pro та Copernicus Browser. Платформа NASA Worldview забезпечує можливість оперативного аналізу глобальних кліматичних процесів та візуалізації температурних аномалій практично в режимі реального часу. Google Earth Pro використовується для візуального аналізу території дослідження, вивчення особливостей забудови та оцінювання змін міського середовища за різні часові періоди. Copernicus Browser забезпечує зручний доступ до даних супутників Sentinel та інструментів їхнього попереднього аналізу.

Для об'єктивного порівняння геопорталів доцільно враховувати не лише характеристики супутникових даних, але й функціональні можливості самих платформ. Проведений аналіз показує, що жоден із розглянутих ресурсів не може повністю задовольнити всі потреби дослідження теплових аномалій. Кожен геопортал має власні переваги та обмеження, які необхідно враховувати під час формування інформаційного забезпечення дослідження.

Результати проведеного аналізу свідчать, що найбільш ефективним підходом є комплексне використання декількох джерел супутникової інформації. Дані Landsat доцільно застосовувати для розрахунку температури земної поверхні та виявлення теплових аномалій. Матеріали Sentinel-2 забезпечують детальний аналіз структури міської забудови, зелених насаджень і характеру землекористування. Дані MODIS дозволяють здійснювати моніторинг температурних змін у регіональному масштабі, а платформа Google Earth Engine забезпечує автоматизовану обробку значних обсягів просторової інформації.

Таким чином, ефективність дослідження теплових аномалій у міському середовищі значною мірою залежить від правильного вибору джерел даних та інструментів їх обробки. Комплексне використання сучасних геопорталів дозволяє отримувати достовірну інформацію про температурний стан територій, виявляти закономірності формування теплових островів та забезпечувати наукове обґрунтування заходів щодо покращення екологічного стану урбанізованих територій.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ДЖЕРЕЛ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ПРИКЛАДІ МІСТ УКРАЇНИ

Зображення і растрові дані зазвичай зберігаються в оригінальному вигляді. Іноді доводиться редагувати значення окремих пікселів, наприклад, при редагуванні об'єкта в наборі векторних даних. Ці дані зазвичай обробляються для створення нових форм, які можуть оброблятися супер швидко або зберігатися в іншій версії. Ці набори даних, і їх колекції, часто дуже великі, тому, дуже важливо правильно керувати ними, в чому вам допоможе ArcGIS.

Є три способи зберігання зображення і растрових даних у вигляді файлів у файловій системі на базі геоданих або зберігання у файлах з управлінням з бази геоданих. При виборі способу зберігання також слід визначити, чи будуть зберігатися всі дані в єдиному наборі растрових даних або в каталозі, в якому можна розмістити велику кількість растрових наборів даних. Якщо ви зберігаєте дані у файловій системі, вам доведеться використовувати набори растрових даних, тоді як у базі геоданих можна зберігати і набори растрових даних, та набори даних мозаїки. Третя опція бази геоданих – каталог растрів. В подальшому він не обговорюється, оскільки його повністю замінює набір даних мозаїки, який має більше можливостей і функцій.

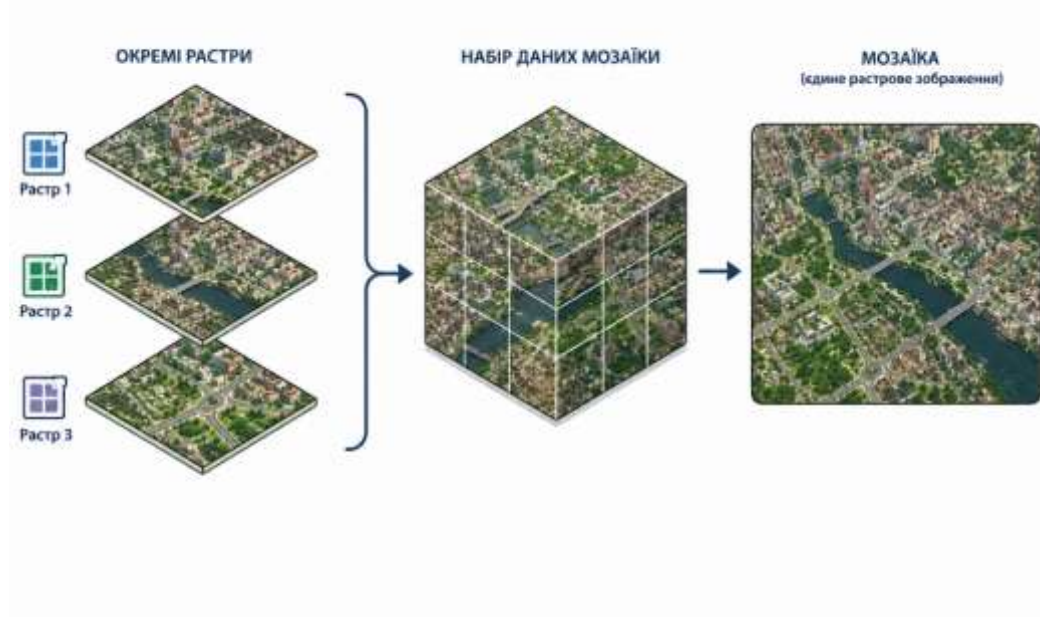


Рис.18 Окремі растри і метадані складають набори даних мозаїки

Дані в наборі даних мозаїки(рис.18) не обов'язково повинні бути суміжними(рис.19) або перекриватись(рис.20), але можуть існувати як не з'єднані, переривчасті набори даних. Наприклад, можуть бути зображення, повністю покривають площу, або може бути багато трикутних шматочків зображень, які можуть бути з'єднані для формування безперервного зображення.



Рис.19 Покриття суміжних даних



Рис.20 Покриття переривчастих даних

Дані можуть навіть повністю або частково перекриватися, але бути отримані в різні дати. Набір даних мозаїки це ідеальний набір даних для зберігання тимчасових даних. Ви можете запитати набір даних для відображення зазначених дати та часу, а також використовувати метод мозаїки для відображення мозаїки згідно з атрибутом дати або часу. Набори даних мозаїки не обмежені одним певним типом растрових даних. Можна додавати растрові дані з різними проекціями, дозволами, глибиною кольору і числом каналів. Для всієї колекції даних можна побудувати оглядові зображення. Це дозволяє швидше переглядати дані, а також спрощує їх зберігання. Також є багато додаткових властивостей для перегляду, включаючи завдання методу мозаїки, які роблять ці набори даних унікальними і функціональними в багатьох ситуаціях. Крім того, ви можете виконувати запити до наборів даних мозаїки на основі просторових і непросторових обмежень. Результатами цього запиту можуть бути набори зображень, які ви можете обробити послідовно, або динамічно створена мозаїка.

Порівняння моделей зберігання растрових даних

	Набір растрових даних	Набір даних мозаїки
Опис	Одне зображення об'єкта або безшовне зображення, що охоплює просторово безперервну область. Це може бути одне вихідне зображення або зображення, складене з декількох більш дрібних (мозаїка).	Колекція растрових даних, що зберігаються як каталог, який дозволяє зберігати, управляти, переглядати і робити запити до колекцій растрових даних і даних лідара. Він проглядається у вигляді мозаїчного зображення, але у вас є доступ до кожного набору растрових даних колекції.
Сховище	У вигляді файлу на диску або у базі геоданих.	Всередині бази геоданих, але може мати посилання, збережене у файлі на диску
Шари карти	Один шар карти	Один шар карти
Гомогенні або гетерогенні дані	Гомогенні дані: один формат, тип даних і файл	Гетерогенні дані: кілька форматів, типів даних, різні розміри файлів і системи координат.
Метадані	Записуються один раз і описують весь набір даних.	Можуть зберігатися в запису растра і як атрибути в атрибутивній таблиці.
Набори даних з низьким дозволом	Один пірамідне шар для всього набору растрових даних.	Пірамідні шари для кожного набору растрових даних, так само як і оглядові зображення (наприклад, пірамідні шари) для всієї колекції.
Геообробка і аналіз зображень	Може використовуватися як джерело даних у багатьох інструментах геообробки і аналізу. Може використовуватися у вікні Аналіз зображень (Image Analysis).	Може використовуватися як джерело даних у багатьох інструментах геообробки і аналізу. Може використовуватися у вікні Аналіз зображень (Image Analysis).

Плюси	Швидке відображення при будь-якому масштабі. Мозаїка займає менше місця, т.к. відсутні області накладення даних.	Управляє великими колекціям и растрових даних. Швидке відображення при будь-якому масштабі. Немає втрат даних для створення мозаїки. Користувач отримує доступ до всього змісту колекції. Можна встановити властивості для контролю за мозаїчним зображенням. Обробка «на льоту».
Мінуси	Набори растрових даних файлової або персональної бази геоданих оновлюються повільніше, оскільки необхідно переписати весь файл.	Створення оглядів займає час.
Обслуговування	Може обслуговуватися безпосередньо як сервіс зображень.	Може обслуговуватися безпосередньо як сервіс зображень.
Рекомендації	Використовуйте набори растрових даних, якщо вам не потрібно зберігати області накладення між зображеннями в мозаїці, а також для швидкого відображення великих обсягів растрових даних	Використовуйте набір даних мозаїки для керування й візуалізації растрових даних і даних лідара. Це підходить для багатовимірних даних, запитів, зберігання метаданих і накладення даних, і забезпечує гарне гібридне рішення.

Зберігати растрові дані в базі геоданих зручно, якщо ви хочете керувати растрами, додавати поведінку і контролювати схему; якщо ви хочете керувати добре налаштованим набором растрових даних як частиною вашої СУБД (СУБД); і якщо потрібно єдина архітектура для управління всім змістом. Існує три основних типи баз геоданих: корпоративна, особиста та файлова.

Корпоративна база геоданих використовує ArcSDE і підтримує множинні операції у своїй СУБД. Файлові бази геоданих (такі як персональні) розроблені для редагування одним користувачем і не підтримують версії.

Файлова база розташовується в звичайній директорії файлової системи, тому, для доступу до неї пароль не потрібен. Файлові та корпоративні бази геоданих мають одну базову схему зберігання.

Таблиця 4

Порівняння зберігання растрів у файловій, корпоративної та персональної бази геоданих

Характеристики збереження растрів	Файлова база геоданих	Розрахована на велику кількість користувачів база даних	Персональна база даних
Розмір	1 Тб на кожен набір растрових даних	Без обмежень, крім обмежень СУБД	2 гігабайт (Гб) на базу геоданих
Формат файлу набору растрових даних	Набір растрових даних файлової бази геоданих	Набір растрових даних ArcSDE	ERDAS IMAGINE, JPEG або JPEG 2000
Сховище	Набір растрових даних: керований Набір даних мозаїки: некерований Растр як атрибут: керований або некерований	Набір растрових даних: керований Набір даних мозаїки: некерований Растр як атрибут: керований	Набір растрових даних: керований Набір даних мозаїки: некерований Растр як атрибут: керований або некерований
Стиснення	LZ77, JPEG, JPEG 2000 або None	LZ77, JPEG, JPEG 2000 або None	LZ77, JPEG, JPEG 2000 або None
Мозаїка	Дозволяє приєднувати дані до набору растрових даних при побудові мозаїки	Дозволяє приєднувати дані до набору растрових даних при побудові мозаїки	Перезаписує новий набір даних кожен раз при створенні мозаїки
Обновлення	Можливо поступове оновлення	Можливо поступове оновлення	Неможливе

Кількість користувачів	Один користувач і малі робочі групи; кілька читачів і один записуючий	Багатокористувацька; багато користувачів і багато записуючих	Один користувач і малі робочі групи; кілька читачів і один записуючий
-------------------------------	---	--	---

3.2. Структура бази геоданих

Вектори є широко використовуваним способом представлення даних у базі геоданих, що придатний для відображення об'єктів з дискретними границями, таких, наприклад, як, вулиці, ріки, області і земельні ділянки. Звичайно, векторні дані зображуються у виді точок, ліній чи полігонів. .

Клас об'єктів. Це таблиця в базі геоданих, який ви можете приписувати "поведінку". Рядки в таблиці відповідають записам для окремих об'єктів, що мають свою "поведінку" в ГІС. Наприклад, до класу об'єктів можуть бути віднесені об'єкти типу "власник" земельної ділянки. Користувач може встановлювати взаємини між полігональними векторними об'єктами для земельних ділянок і об'єктами класу власників.

Клас географічних об'єктів. Сукупність географічних об'єктів одного типу. Географічним об'єктом є простий об'єкт, що має географічне положення, що зберігається як одне з його властивостей у відповідних полях чи у рядку таблиці. Звичайно, типом геометрії таких об'єктів є точки, лінії, полігони чи анотації. Прикладами географічних об'єктів можуть служити ріки, адміністративні округи, адміністративні регіони для проведення перепису населення і т. п. Класи географічних об'єктів можуть бути незалежними чи бути зв'язаними з іншими класами географічних об'єктів. Якщо класи взаємно зв'язані, то разом вони організуються в набір класів географічних об'єктів.

Атрибути географічних об'єктів. Властивості об'єктів зберігаються як дані в полях таблиці для класу географічних об'єктів. Атрибути визначають стандартні і спеціальні властивості географічних об'єктів і можуть бути чисельними, текстовими і т. п.

Просторова прив'язка. Система наземних координат, у якій представлений набір даних. Вона служить для опису реального положення набору даних на землі. Просторова прив'язка включає такі характеристики, як тип картографічної проекції, тип датума, припустимий діапазон значень координат (наприклад, для координат x , y чи x , y , z) і т. п.

Підтипи. Клас географічних об'єктів може містити об'єкти, що мають однакову "поведінку" і однакові властивості, але їхня роль у даній моделі може бути різною. Наприклад, якщо потрібно розрізняти сталеві труби і труби з полівінілхлориду (ПВХ), а також роль кожної з цих труб у даній моделі, то може виявитися доцільним ввести один клас географічних об'єктів "труби", а для того, щоб розрізняти різні види труб, використовувати підтипи..

Набір класів географічних об'єктів(рис.31).Сукупність класів географічних об'єктів з однаковою просторовою прив'язкою. Класи географічних об'єктів можуть бути організовані у виді мереж чи просторових топологій. Якщо ви знайомі з Arcinfo, то набори класів географічних об'єктів аналогічні покриттям, однак, набори класів географічних об'єктів мають менше обмежень і більш функціональні, ніж покриття. Набори класів географічних об'єктів стають особливо корисними, коли у вашій ГІС необхідно моделювати системи просторово зв'язаних векторних об'єктів, таких як виробничі мережі, дороги, шари, що характеризують навколишнє середовище (наприклад, ґрунт, топографія, рослинність), географічні регіони для перепису населення і т. п.

Зв'язки між двома об'єктами. Взаємні відносини дозволяють працювати з географічними об'єктами й об'єктами з відповідного класу об'єктів. Зв'язки організуються в класи зв'язків. Зазначені класи визначають набір взаємин між двома класами географічних об'єктів, класами об'єктів чи класом географічних об'єктів і класом об'єктів. Наприклад, використовуючи взаємні зв'язки, можна створювати анотації для відповідних об'єктів. Ви можете визначити, що буде з анотацією, якщо об'єкт буде переміщений, вилучений чи якщо зміниться його атрибутивне значення..

Геометричні мережі. Обумовлений користувачем набір класів географічних об'єктів, що утворюють частину нерозривної мережі, що

складається з крайових елементів, переходів і поворотів. Ви визначаєте набір класів географічних об'єктів, що включаються в геометричну мережу, роль кожного класу (наприклад, крайові елементи чи переходи) і організуєте ці класи географічних об'єктів у набір географічних об'єктів. Наприклад, у мережах водопостачання, засувки і манометри відіграють роль переходів, а самі магістралі і станції обслуговування відіграють роль крайових елементів..

Просторова топологія. Обумовлений користувачем набір класів географічних об'єктів, що використовують загальну геометрію. Просторова топологія дозволяє вам використовувати один загальний набір ліній, щоб представити геометрію ряду класів географічних об'єктів. Наприклад, такі класи об'єктів, як тип ґрунтів, рослинність, модель місцевості і водяні об'єкти, можуть використовувати спільно загальні границі полігонів. Будь-яка зміна, внесена в загальну границю, автоматично оновляє колективно використовувані границі для всіх цих географічних об'єктів. Класи географічних об'єктів, що беруть участь у просторовій топології, організуються в такі ж набори географічних об'єктів

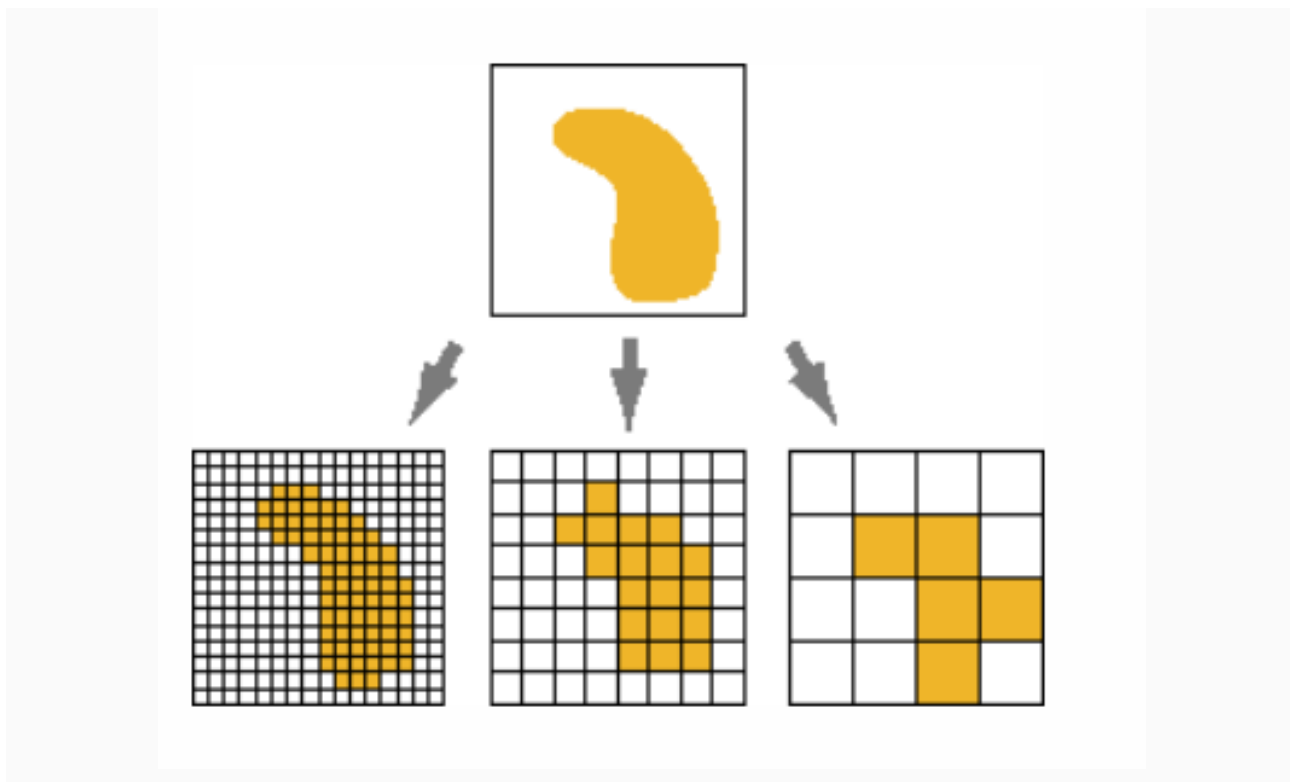
Домени. Визначають припустимі значення для атрибутів у виді діапазону чи набору значень. Домени можна використовувати для перевірки коректності будь-якого атрибута в базі геоданих.

Правила перевірки коректності. Декілька обмежень, що накладаються на значення атрибутів, чи топологію положення векторних об'єктів, щоб забезпечити єдність "поведінки" для географічних об'єктів. Наприклад, правила нерозривності накладають обмеження на місця з'єднань у мережах.

Растрові дані. Базы геоданих можуть містити набори растрових даних, кожен растр представляє зображуваний простір у виді однакових за розмірами елементів чи пікселів. ArcSDE працює з растровими даними. Коли створюється бізнес-таблиця зі стовпцем растрового типу, ArcSDE розглядає цей стовпець як набір растрових даних. Растрові набори даних у базах геоданих можуть займати дуже великі обсяги і покривати великі географічні області, забезпечуючи при цьому високу розділяючу здатність. Для забезпечення ефективного доступу і збереження таких даних у базі геоданих, растрові дані автоматично ріжуться на

окремі фрагменти, і при цьому стискаються. Ви можете використовувати цей метод, щоб створювати дуже великі растрові набори даних у базі геоданих. При завантаженні растрових даних, можна зшивати в мозаїку необхідне число таких фрагментів, щоб забезпечити покриття необхідного екстента. При завантаженні в ArcSDE у мозаїку можна зшивати зображення з однаковою розділяючою здатністю. Оскільки растрові дані можуть покривати дуже великі площі, то вам часто буде необхідно використовувати вирізані фрагменти з загального шару растрових даних. Коли ви працюєте з великою растровою базою даних, то можете визначати видимий екстент растрового зображення, щоб мінімізувати час на чекання даних із сервера. Для прискорення відображення передача даних обмежується автоматично поточним екстентом карти.

Для роботи з дуже великими растрами часто має сенс не укладати ці растри в базу даних, а користатися каталогом знімків - таблицею з посиланнями на растрові файли. Таблиця може лежати в базі даних, а знімки - на файловому сервері. Для прискорення відображення і з метою економії місця їх можна зжати в MrSID.



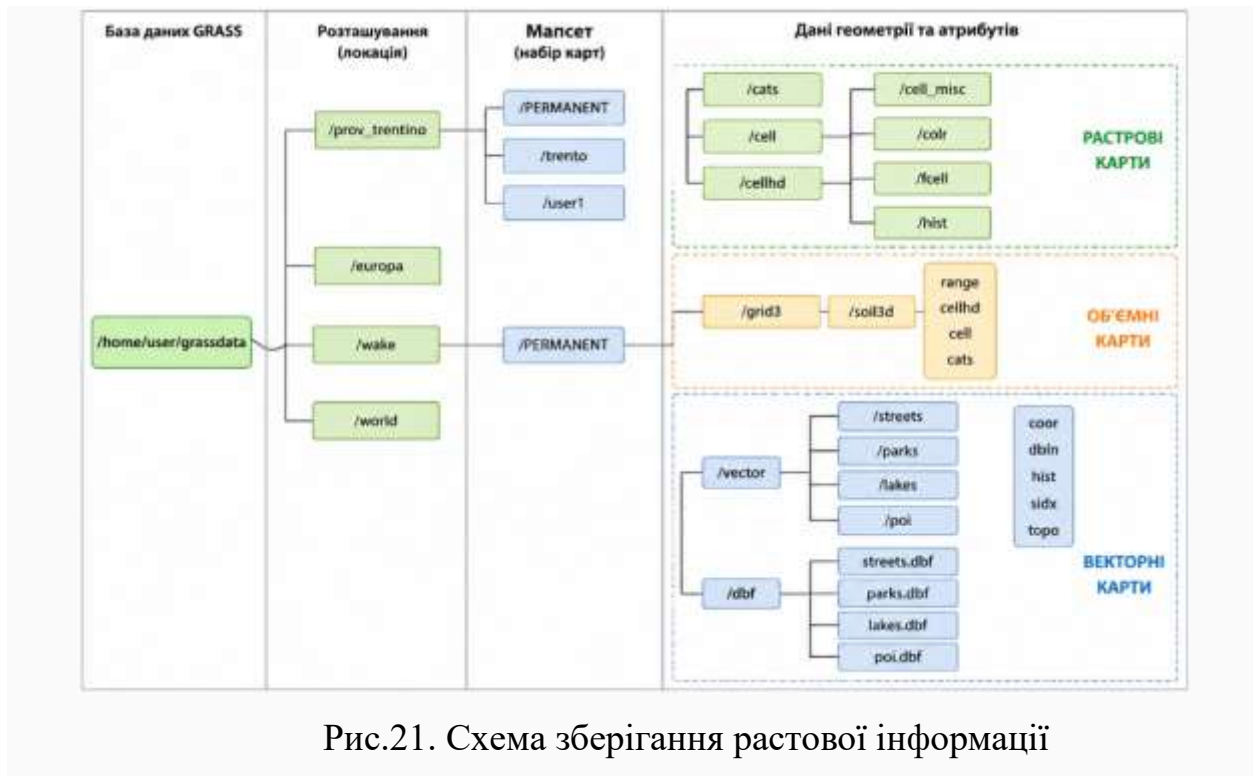


Рис.21. Схема зберігання растової інформації

Технологічна схема опрацювання космознімків для виявлення теплових аномалій

Різне відображення у червоному і інфрачервоному (ІЧ) каналах дозволяє контролювати щільність та інтенсивність росту зеленої рослинності з використанням спектрального відбиття сонячної радіації. Зелене листя зазвичай показують найкраще відображення в близькому діапазоні інфрачервоних довжин хвиль, ніж в діапазонах видимих довжин хвиль. Якщо листя пригнічені водою, в'яне або мертві, вони стають жовтими і відображають значно менше в ближньому інфрачервоному діапазоні. Хмари, вода і сніг дають найкраще відображення у видимому діапазоні, ніж у ближньому інфрачервоному діапазоні, в той час як різниця практично дорівнює нулю для скель і голою ґрунту. Обробка NDVI створює одноканальний набір даних, який в основному представляє зелень. Негативні значення представляють хмари, воду і сніг, а значення, близькі до нуля, представляють скелі і голий ґрунт.

Документоване рівняння NDVI, яке використовується за замовчування

$$mNDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR значення пікселів з інфрачервоного каналу

RED - значення пікселів з червоного каналу

Цей індекс видає значення від -1,0 до 1,0, в основному представляють зелень, де всі негативні значення в основному утворюються від хмар, води і снігу, а значення, близькі до нуля, що утворюються в основному від скель і голою ґрунту. Дуже маленькі значення (0,1 і менше) функції NDVI відповідають порожнім областям скель, піску або снігу. Помірні значення (від 0,2 до 0,3) представляють чагарники і луки, в той час як великі значення (від 0,6 до 0,8) вказують на помірні і тропічні ліси.

Розрахунок індексу NDVI в програмному забезпеченні 3.

1. Індекс NDVI має розмах від 1 (інтенсивна, густа рослинність) до -1 (пригноблені з точки зору наявності хлорофілу поверхні - асфальт, бетон тощо)

2. Для обчислення NDVI потрібні зображення в ближньому інфрачервоному каналі, і в червоному каналі. Для знімків Landsat 8 це відповідно канали 4 і 3(рис.32). Тепер після невеликого теоретичного вступу можна переходити до практичної частини.

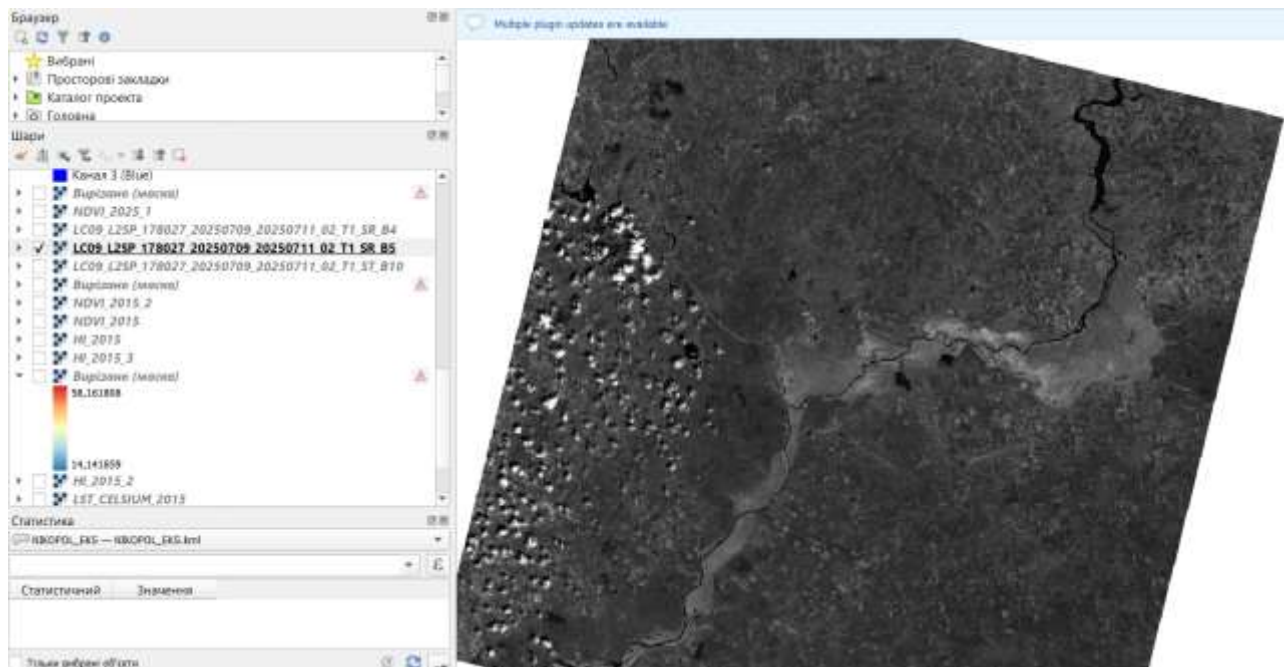


Рис.22. Вибір знімків

Як показано на картинці вище, просто беремо і витягуємо мишкою панелі Растр у вікно подання карти знімки з суфіксами B3(червоний канал) і

В4(ближній інфрачервоний 1 канал.) та прописуємо формулу через калькулятор растрів:

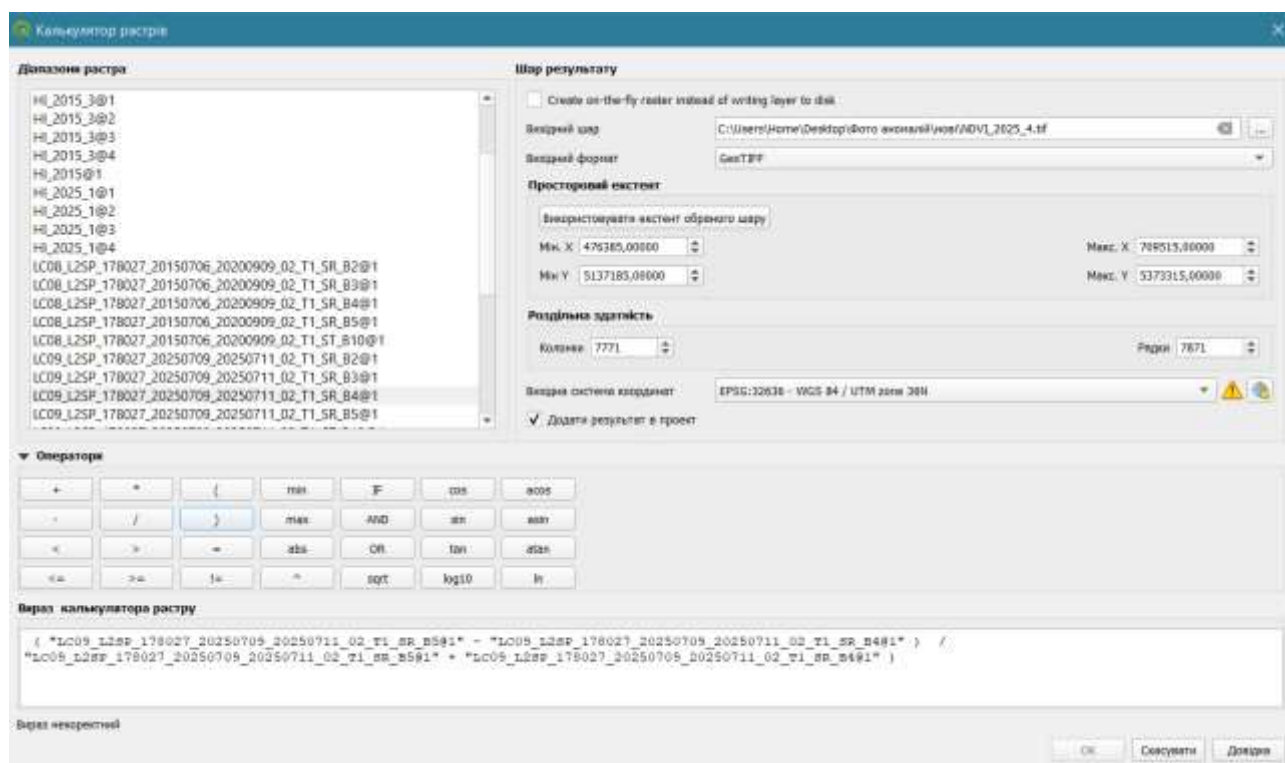


Рис.23. Вхід в набір інструментів для перетворень та визначення впливає на коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні

3. Розрахунок частки рослинності (Pv)

Частка рослинності (Proportion of Vegetation) визначає співвідношення густої рослинності та відкритого ґрунту.

Відкрив Растровий калькулятор.

Для точного розрахунку потрібно мінімальне (NDVImin) та максимальне (NDVImax) значення вашого шару ndvi.tif (їх можна подивитися у властивостях шару ndvi у вкладці "Інформація"). Зазвичай для розрахунків беруть фіксовані значення:

$$\text{NDVImin} = 0.2 \text{ (голий ґрунт)}$$

$$\text{NDVImax} = 0.5 \text{ (густа рослинність)}$$

3. Ввів формулу:

$$P_v = ((\text{NDVI} - \text{NDVImin}) / (\text{NDVImax} - \text{NDVImin}))^2$$

Формула для калькулятора:

$$((\text{"ndvi_2015"} - 0.2) / (0.5 - 0.2)) ^ 2$$

Збережіть растр як pv_2015.tif.

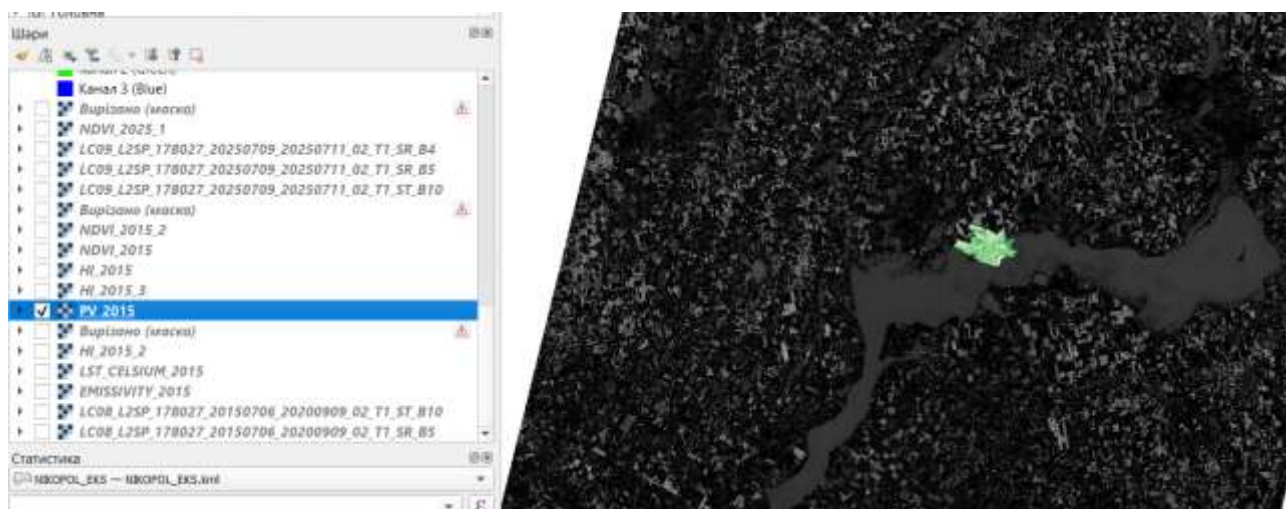


Рис.24. Набір формули для pv_2015.tif

4. Розрахунок коефіцієнту випромінювальної здатності (ϵ)

Коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні (Land Surface Emissivity LSE) коригує теплові дані залежно від типу поверхні (вода, будівлі, рослинність).

Відкрив Растровий калькулятор.

Використовуємо класичну спрощену формулу Сообріно:

$$\epsilon = 0.004 \times P_v + 0.986$$

Формула для калькулятора:

$$(0.004 * "pv@1") + 0.986$$

Збережіть растр як emissivity.tif (рис.25)

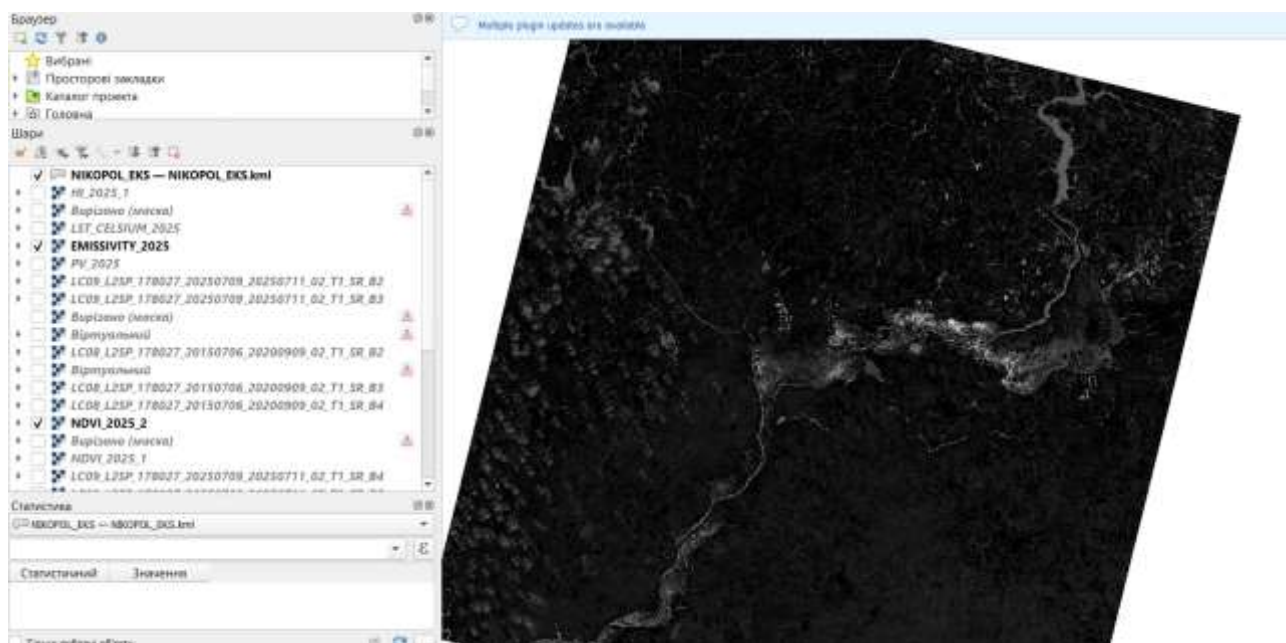


Рис.25. Синтезований знімок emissivity_2025.tif

5. Переведення Band 10 у реальну температуру в градусах Цельсія (LST)

Для продуктів Landsat Level-2 тепловий канал Band 10 вже масштабований у Кельвінах за допомогою коефіцієнтів множення та додавання. Згідно з офіційною специфікацією USGS Landsat L2, щоб отримати температуру, потрібно застосувати коефіцієнт масштабування та перевести Кельвіни в Цельсії.

- Множильник (множник): 0.00341802
- Адитивна константа (доданок): 149.0
- Переведення в Цельсії: -273.15

Проте температура також коригується на коефіцієнт випромінювання (ϵ).

Підсумкова формула теплового балансу виглядає так:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\frac{\lambda \times BT}{\rho}\right) \ln \times (\epsilon)}$$

Де:

- BT (Яскравісна температура в Кельвінах) =
(Band10 * 0.00341802) + 149.0
- λ (довжина хвилі теплового каналу) = 10.89 мікрометрів для Landsat 8/9 Band 10.

$$\bullet \rho = h \times c / \sigma = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Формула для калькулятора:

$$BT: ("Band10@1" * 0.00341802) + 149.0$$

$$LST: (BT / (1 + ((10.89 * BT / 14388) * \ln("emissivity@1")))) - 273.15$$

Збережіть результат як lst.tif.

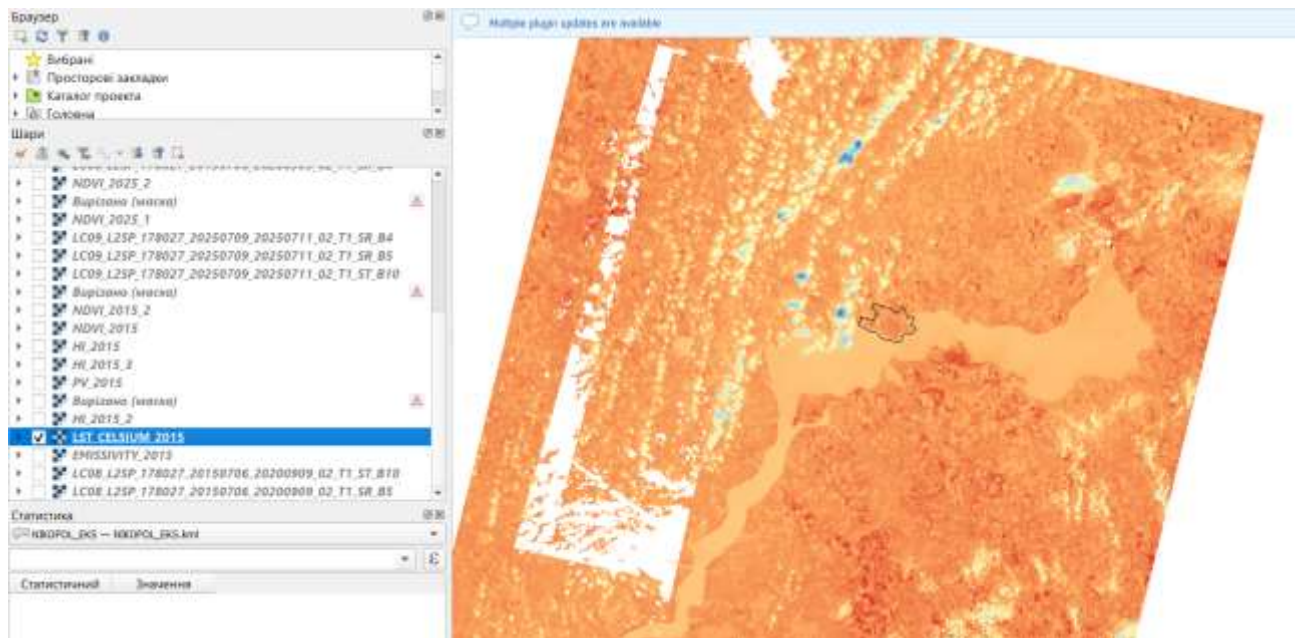


Рис.26.Отриманий знімок lst_celsius_2015.tif

І в результаті всіх проведених маніпуляцій з знімком ми отримуємо теплову аномалію даної території(рис.26-27).

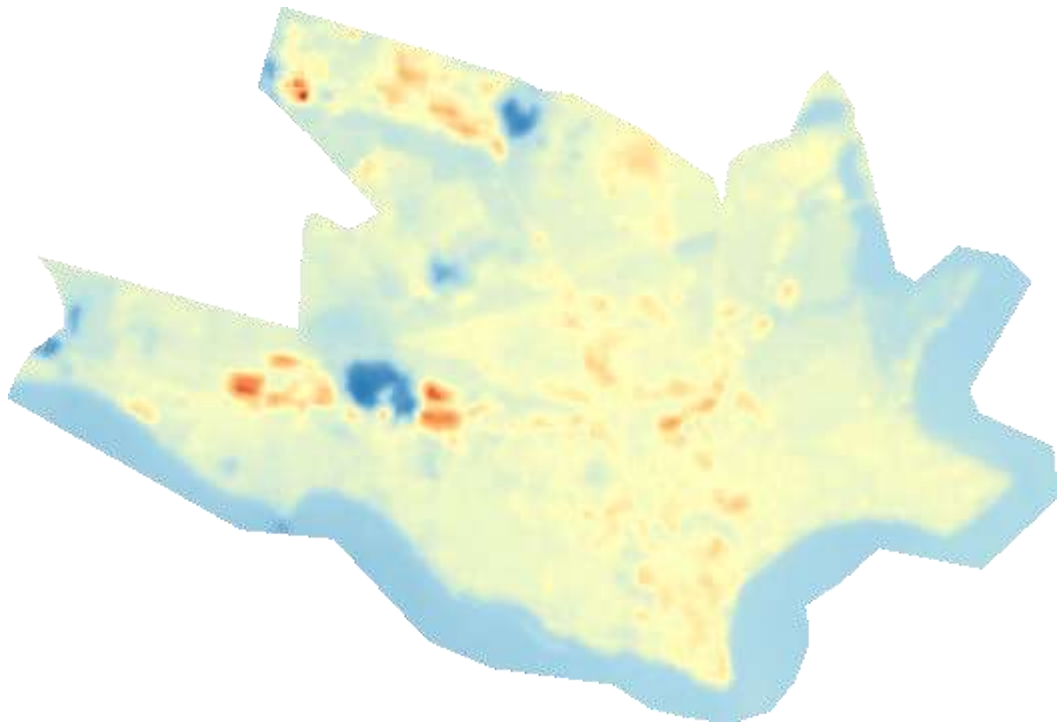


Рис.27 Отриманий знімок теплових аномалій м. Нікополь за 2015 рік

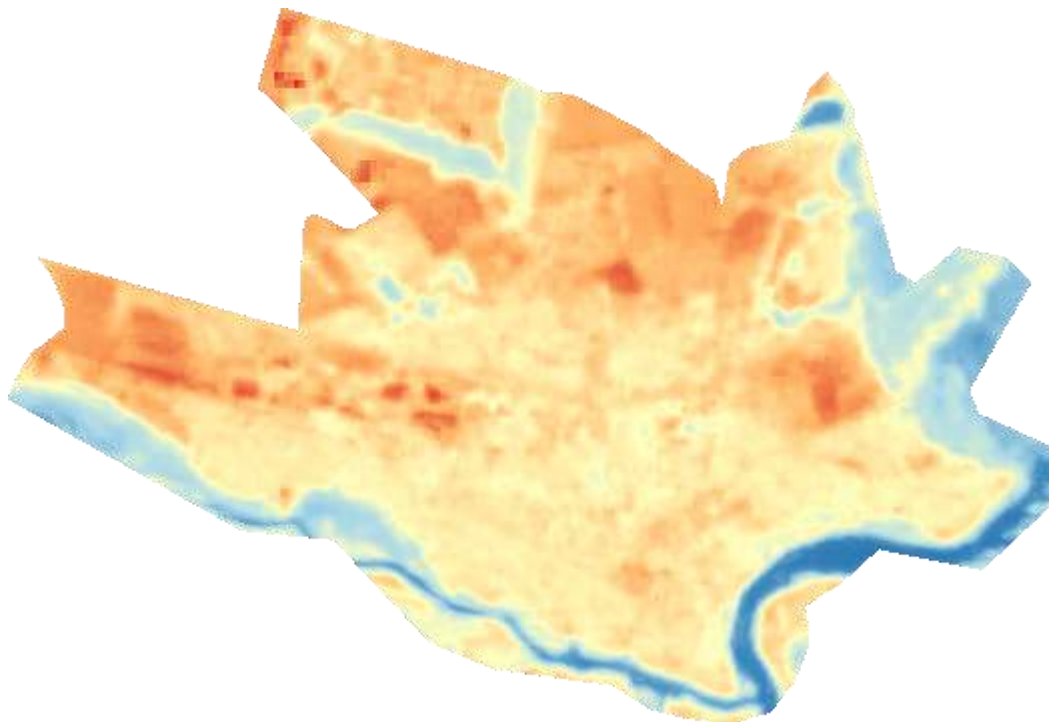


Рис.28 Отриманий знімок теплових аномалій м. Нікополь за 2025 рік

3.3 Визначення теплової аномалії для міста Нікополь

Нікополь, місто обласного підпорядкування у Дніпропетровській області. Адміністративний центр Нікопольського району. Четверте за чисельністю населення місто області, центр Нікопольського марганцевого басейну, в місті працюють два підприємства металургійної та декілька машинобудівної промисловості.

Промислові підприємства є основним наповнювачем міського бюджету, на частку яких припадає більше 50 % від загальної кількості надходжень.

За 2009 рік обсяг реалізованої промислової продукції у діючих цінах Нікополя, склав більше 8 млрд гривень. Частка обсягу реалізації промислової продукції міста в обсязі реалізації області становить близько 8 %. Основною складовою частиною промисловості є металургія і обробка металів. На їх частку припадає 95,6 % від загального обсягу виробництва промислової продукції міста. На промислових підприємствах міста зайнято понад 19 тис. осіб, або 45 % від загального числа працюючих (42 тис.). В 3 кілометрах на північ від міста розташований Нікопольський завод феросплавів (НЗФ), найбільший у Європі і другий у світі завод з

виробництва марганцевих сплавів продукції, застосовуваної як необхідний легіруючий елемент при виготовленні спеціальних сплавів в чорної і кольорової металургії і подальшого їх використання в різних виробничих галузях. На частку НЗФ припадає 11,5 % світового виробництва феросплавної продукції. У західній частині Нікополя розташовано ряд підприємств по виробництву труб, один з найбільших виробників трубної продукції Східної Європи. У 1999-2000 роках ВАТ «ПТЗ» був реорганізований в систему закритих акціонерних товариств (ЗАТ «Нікопольський завод нержавіючих труб», ЗАТ «Ютіст», ЗАТ НВО «Трубосталь» та інші). На сьогоднішній день ці підприємства є одними з найбільших у світі спеціалізованими структурами з випуску труб з корозійностійких нержавіючих сталей, призначених для використання в умовах широкого спектра корозійного середовища і температур в хімічній і нафтохімічній промисловості, атомній і тепловій енергетиці, а науково-виробниче об'єднання «Трубосталь» є найбільшим на Україні виробником елементів трубопроводів, крутозагнутих суцільнотягнутих відводів і центробіжнолитих сталевих труб широкого використання.

Найбільші підприємства міста:

- ПАТ „Нікопольський завод феросплавів“, (включаючи фабрику з виробництва трикотажу „Ніка“ і, що знаходиться на території ПАТ НЗФ, завод по виробництву металоконструкцій "Будконструкція"). Виробництво феросплавів (силікомарганець, феромарганець, феросиліцій), електрофлюси, електродна маса, агломерат, граншлак, щебінь, трикотаж.
- ТОВ „ІНТЕРПАЙП НІКОТЬЮБ“». Виробництво безшовних бур і-льних обсадних геологорозвідувальних, гарячедеформованих і насоснокомпресорних труб.
- ПРАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН». Виробництво корозійностійких труб безшовних труб з жароміцних сплавів, безшовних гарячекатаних труб, сталевих труб для котельних установок, сталевих

прямошовних електрозварних труб, холоднотягнутих труб високої точності тощо.

- ТОВ «Нікопольський завод сталевих труб „Ютіст“». Виробництво геологорозвідувальних, газонафтепроводних, насосно-компресорних труб і катаних труб для котлів високого тиску.

- ТОВ ВНЦ «Трубосталь». Виробництво центробіжнолитих труб, біметалічних втулок бурових насосів, холоднодеформованих без-шовних труб, елементів трубопроводів.

- ТОВ «ЗСК МастерПласт». Завод з виробництва світлопрозорих конструкцій, авторизований партнер RENAУ. Виробничі площі укомплектовані сучасними високотехнологічними автоматичними лініями. Обсяги виробництва (вікон/місяць): 15000. На ринку з 2002 р.

- ТОВ «Трубний завод „ВСМПО-АВІСМА“». Виробництво безшовних труб із сплавів титану.

- ПАТ «Нікопольський кранобудівний завод». Виробництво баштових кранів, кранів-маніпуляторів, запасних частин до баштових кранів, будівельних металоконструкцій, сталеве і чавунне литво, послуги з ремонту обладнання і хутрообробки.

- ТОВ «НикоТрэйд». Виробництво полімерних і металевих труб для використання у внутрішніх інженерних системах (автономне радіаторне опалення, підлогове опалення, системи сніготанення та підігріву поверхні, водопостачання) і зовнішніх мережах (газопроводи).

- ПАТ «Нікопольський завод трубопровідної арматури». Виробництво засувки, вантузів, затворів, клапанів, люків, споживчих товарів (лавки, дощоприймачі, решітки, пічне литво).

- ПОАО «Нікопольський завод залізобетонних конструкцій». Виробництво збірного залізобетону і стінових матеріалів[12].

Нікополь(рис.29) є найкращим представником для опису теплових аномалій в місті , тому що має найбільшу кількість виробництв важкої промисловості. Така кількість виробництв не могла не позначитись на виявленні теплових аномалій місті.

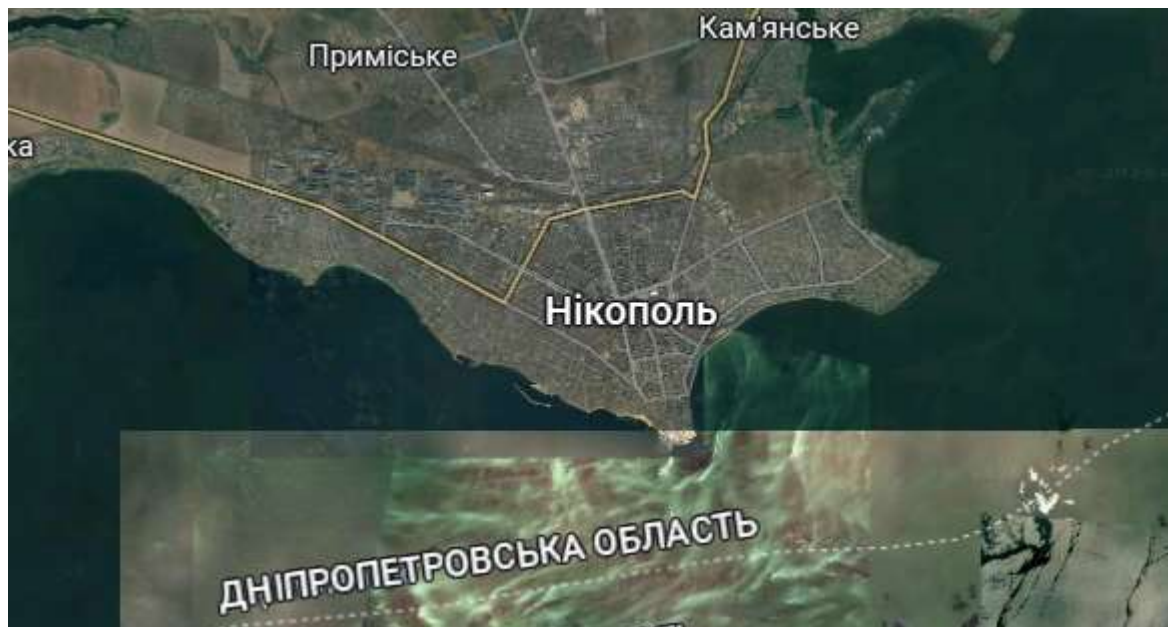


Рис.29. Супутниковий знімок міста Нікополь

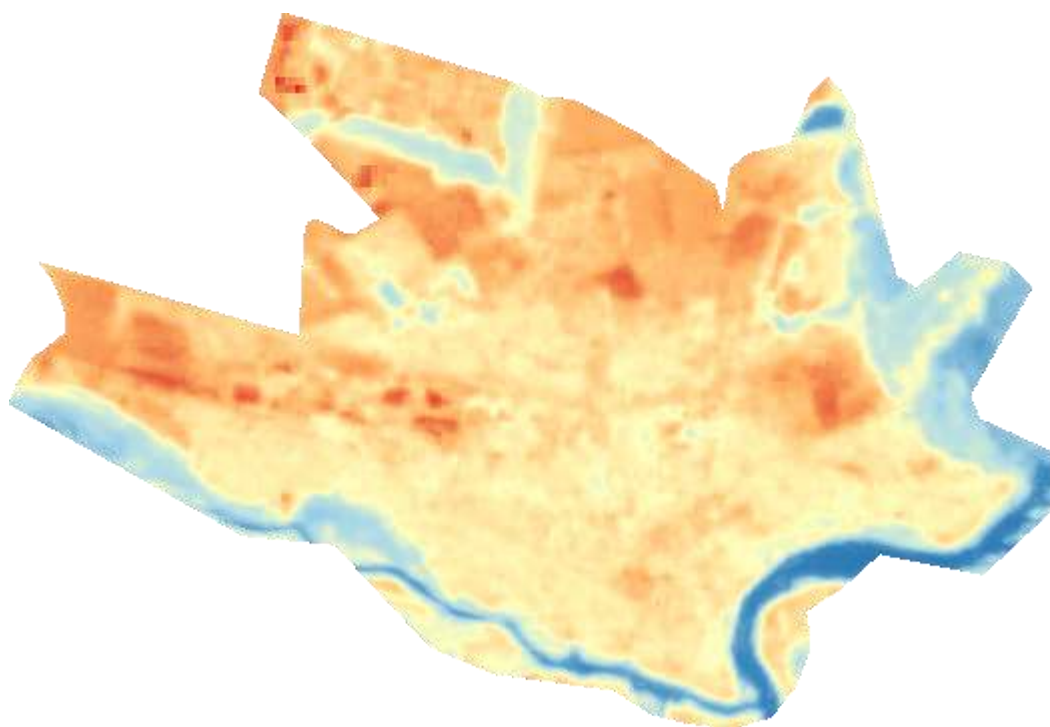


Рис.30. Теплова аномалія міста Нікополь

Як і передбачувалось велика кількість теплових аномалій(ри.40) зосереджена майже по всій території міста і всі вони спостерігаються над великими підприємствами, які є гігантами своєї галузі в даній сфері промисловості.

Житлові райони міста аномалія майже не торкнулась, але зосередження підприємств в між житловою забудовою, погіршує стан екології та теплових аномалій в місті. На даній території відсутні будь які

зелені насадження і це ще більше призводить до фатальних наслідків шаленого викиду тепла.

3.5 Визначення теплової аномалії для міста Біла Церква

Біла Церква місто обласного підпорядкування в Київській області України, адміністративний центр Білоцерківського району. Населення міста понад 200 тис. осіб. За цим показником є один із найбільших міст Київської області та займає провідне місце серед промислових центрів регіону.

На сьогодні в місті функціонує значна кількість промислових підприємств різних галузей, будівельних організацій різних форм власності та тисячі суб'єктів підприємницької діяльності. За економічними показниками Біла Церква входить до переліку найрозвиненіших міст Київської області та є промисловим і логістичним вузлом центральної України.

Білоцерківський шинний завод («Росава») має важливе стратегічне значення для України як один із найбільших виробників шин на пострадянському просторі. Підприємство виробляє широкий асортимент шин для легкових, вантажних автомобілів та сільськогосподарської техніки та забезпечує значну участь у внутрішньому ринку країни. Завод є одним із головних роботодавців міста та формує суттєвий бюджет міського бюджету.

Підприємство займається вигідним географічним положенням. Розташувавшись за 80 кілометрів від столиці та маючи розвинену мережу залізничного та автомобільного транспорту, місто забезпечує швидке постачання продукції споживачам як на внутрішньому, так і на зовнішніх ринках. Близькість до Києва значно розширює логістичні та експортні можливості підприємств міста.

Білоцерківська ТЕЦ забезпечує теплопостачання тисячам юридичних осіб і десяткам тисяч побутових споживачів Білої Церкви, а також частково покриває потреби міста в електричній енергії. Основним паливом станції є природний газ, резервним мазут.

Біла Церква є найбільшим промисловим центром Київської області після столиці. На промислові та побутові підприємства міста припадає значна частка

забруднюючих викидів у всій Київській області. Наявність великих промислових об'єктів, щільна забудова та недостатня природна вентиляція міської вуличної мережі створюють передумови для формування стійких теплових аномалій на території міста.

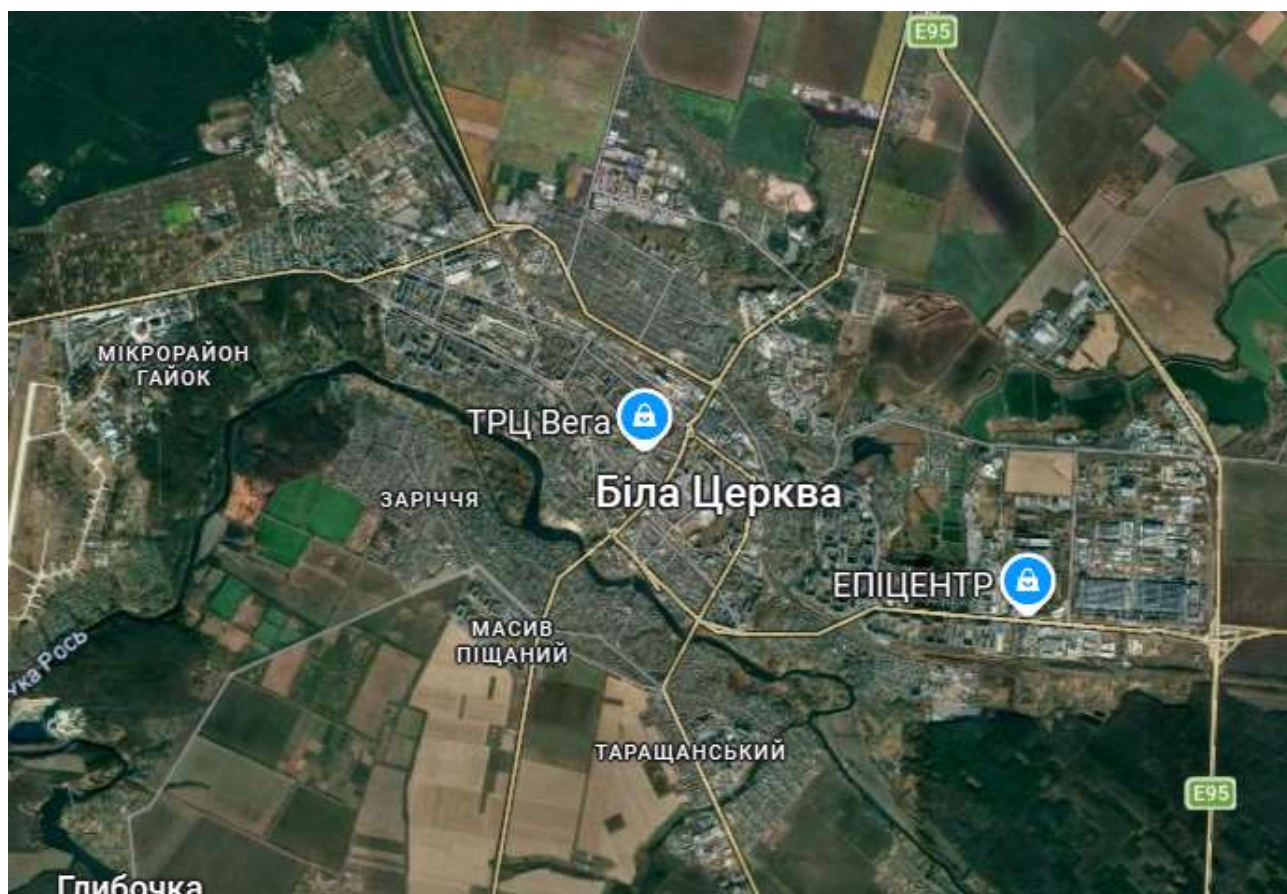


Рис.31. Супутниковий знімок міста Біла Церква

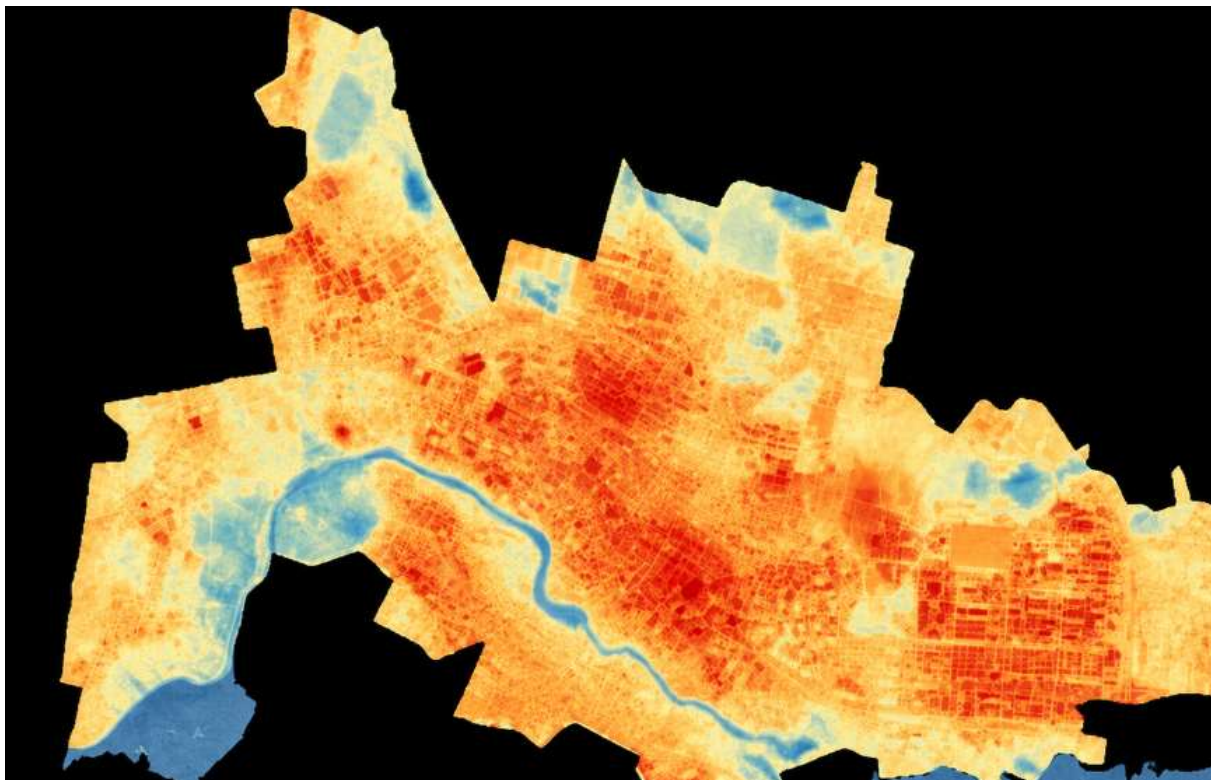


Рис.32. Теплова аномалія міста Біла Церква

Теплові аномалії в місті Біла Церква (рис.32) присутні в великій кількості, найбільше теплових викидів можемо спостерігати на півдні міста. У центральній частині міста слабо виражені великі викиди тепла, але все ж таки присутні навколо великих підприємств. Одним з плюсів міста що нівелює теплові аномалії є річка та близьке розташування міста поблизу водосховища, також у місто має чимало зелених насаджень у самому центрі. У житлових районах аномалія виражена слабо.

В усіх трьох прикладах теплові аномалії виражені чималим викидом тепла, через що страждає все місто. При будівництві даних споруд не враховувались великі викиди тепла в атмосферу міст.

3.5. Порівняння теплової аномалії України в порівнянні з аналогом

Місто Токай(рис.42), розміщене в Японії та має АЕС з однойменною назвою «Токай». АЕС Токай «Токаі» – перша атомна електростанція Японії, розташована на острові Хонсю в префектурі Ібаракі, поблизу містечка Тойкамура в 120 кілометрах від столиці країни Токіо. Першу електроенергію АЕС Токай дала в 1966 році. Всього на станції було побудовано два реактора: перший потужністю 166 МВт працював до 1998 року, другий потужністю 1100 МВт, типу BWR був зупинений після аварії на АЕС Фукусіма-1. Перший реактор АЕС Токай став не тільки першим комерційним реактором Японії, але і першим закритим в країні. Остаточний демонтаж реактора пройшов в 2011 році.

22 травня 2014 року керівники АЕС Токай подали заявку на перезапуск другого реактора – це була 18 заявка серед усіх поданих. До цього заявки подавали АЕС Такахама, Ома, Оі, Цуруга, Іката та інші. Реактори АЕС Сендай вже були запуснені в серпні 2015 року.

При цьому другий реактор АЕС Токай став найстарішим з усіх, які подали заявку на перезапуск. З 2011 по 2014 роки біля станції була зведена стіна висотою у 18 метрів для захисту від цунамі, оновлена система вентиляції, а також були покриті 18,5 тисяч метрів кабелів вогнестійким покриттям.[16]

З вересня 2013 року по серпень 2015 всі реактори японської АЕС залишалися заглушеними. Крім того, були зупинені всі дослідні реактори і заводи з переробки палива. 11 серпня 2015 року в Японії вперше з 2013 року був запуснений атомний реактор енергоблок АЕС 1 Сендай. 15 жовтня запрацював другий реактор АЕС Сендай. 29 січня 2016 року компанія Kansai Electric Power запустила третій реактор АЕС Такахама після того, як суд ухвалив рішення на користь компанії. Невдало закінчилася спроба підключити до мережі 29 лютого реактор Такахама-4, і він був знову зупинений. 9 березня окружний суд Оцу видав розпорядження про зупинку реакторів Такахама. Після чого Такахама-3 був знову зупинений. 25 березня 2016 компанія Shikoku Electric Power оголосила про рішення вивести з експлуатації перший реактор

АЕС Іката. Компанія пояснила рішення економічними міркуваннями, за яким модернізація енергоблоку не окупиться за експлуатаційний термін[14].



Рис.33. Космічний знімок міста Токай

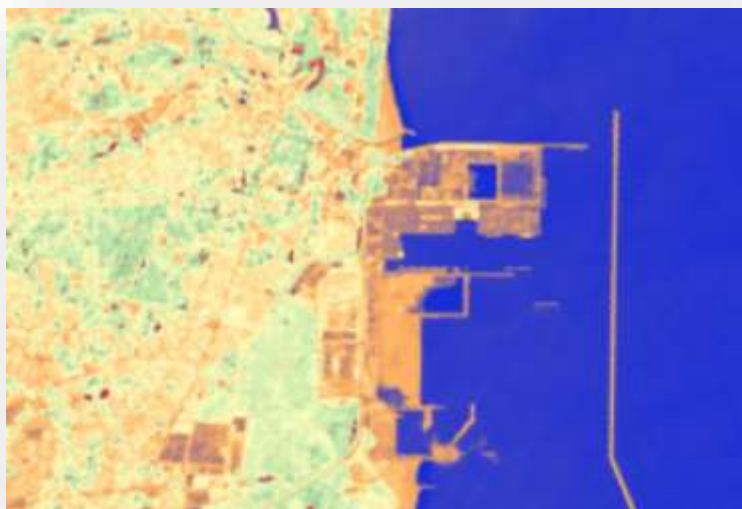


Рис.34. Теплова аномалія міста Токай

Як бачимо теплових аномалій(рис.34) взагалі не спостерігається, тільки маленькі осередки в самому місті, житлові квартали не мають жодних наслідків роботи АЕС. Станція охолоджується океаном та самою системою охолодження, як видно на спектральному знімку, що станція має меншу температуру ніж підстилаюча поверхня.

Порівняння даної території з територією українських міст ясно показує, що закордонний аналог, є набагато безпечніший та екологічніший і показує нам що шанс виникнення теплових аномалій мінімальний.

3.6. Рівень емісії парникових газів для міст України

Щоб зрозуміти, серйозною є проблема теплових аномалій у містах, недостатньо просто побачити їх на супутниковому знімку. Важливо також оцінити, скільки парникових газів викидають ці міста в атмосферу. Адже теплові острови і викиди парникових газів це два явища, які йдуть пліч-о-пліч і підсилюють одне одного.

Для розрахунку рівня викидів використовується досить простий принцип: чим більше підприємств, транспорту та енергетичних об'єктів зосереджено в місті тим більший обсяг викидів воно генерує. Основні джерела емісії в українських містах це промислові підприємства, теплоелектростанції, автотранспорт та житловий сектор.

Нікополь місто з високим рівнем промислового навантаження. Металургійні підприємства міста, зокрема Нікопольський завод феросплавів, є одними з найбільших у Європі. Виробництво феросплавів надзвичайно енергоємний процес, що супроводжується колосальними викидами CO₂, оксидів азоту та інших парникових газів. На промисловий сектор у Нікополі випадає понад 95% загального обсягу виробництва міста, і саме він є головним джерелом викидів. Якщо взяти до уваги, що лише Нікопольський завод феросплавів забезпечує 11,5% світового виробництва феросплавної продукції, то масштаб викидів стає очевидним без будь-яких додаткових пояснень. Виявлені теплові аномалії, виявлені на супутникових знімках, чітко корелюють із розташуванням саме цих підприємств найяскравіші теплові плями збігаються з промисловими зонами міста.

Біла Церква це інший тип промислового міста. Тут немає важкої металургії, проте є потужне шинне виробництво, розвинений транспортний вузол та значна кількість малих і середніх підприємств. Основний внесок в емісію парникових газів тут створюють автотранспорт, підприємство хімічної

та легкої промисловості, а також міська теплоенергетика. Через те, що Біла Церква розташована лише за 80 кілометрів від Києва, через неї проходять великі транзитні вантажопотоки, що додатково додає транспортні викиди. Рівень теплових аномалій тут нижчий, ніж у Нікополі, але характер їхнього розподілу по місту показує, що промислові зони та транспортні артерії залишаються головними генераторами надлішкового тепла.

Якщо подивитися на обидва міста разом і порівняти їх із міжнародними аналогами, наприклад із японським містом Токай, де розташована АЕС, різниця розюча. Японська станція практично не залишає теплового сліду на супутниковому знімку завдяки сучасним системам охолодження та жорстким екологічним стандартам. Українські міста, натомість, демонструють значно вищий рівень теплового забруднення при порівнянних або навіть менших потужностях виробництва.

Це пояснюється кількома речами. По-перше, значна частина промислового обладнання в українських містах морально і фізично застаріла, через що ККД таких підприємств низький більша частина енергії йде не у виробництво, а в атмосфері у вигляді тепла. По-друге, системи очищення викидів або відсутні, або не відповідають сучасним вимогам. По-третє, місто практично не має природних буферів зелених зон і водою, які могли б пом'якшувати тепловий та газовий вплив промисловості на довкілля.

Таким чином, рівень емісії парникових газів у досліджуваних містах України залишається критично високим. Супутникові дані це підтверджують наочно: теплові аномалії над промисловими зонами Нікополя та Білої Церкви свідчать про те, що проблема потребує не лише моніторингу, а й конкретних практичних рішень модернізації виробництва, розвитку зеленої інфраструктури та впровадження сучасних стандартів екологічного контролю.

3.7. Рекомендації для запобігання викидів тепла у містах

Після того, як ми з'ясували, де саме виникають теплові аномалії і чому, логічно постає питання: а що з цим робити? Нижче конкретні рекомендації, які реально працюють і вже перевірені досвідом інших країн.

Озеленення міста

Це найпростіший і водночас один із найефективніших способів знизити температуру в місті. Дерева і чагарники поглинають тепло, випаровують вологу і тим самим охолоджують повітря навколо себе. Один дорослий дерево здатний замінити кілька кондиціонерів у плані охолодження прилеглої території. Для Нікополя та Білої Церкви це особливо актуально, оскільки промислові зони в обох містах практично застосовуються будь-якої рослинності. Достатньо подивитись на супутниковий знімок, щоб це побачити там немає зелені, теплі плями найяскравіші.

Конкретно це означає: висаджування дерев уздовж доріг, створення міських парків у безпосередній близькості до промислових підприємств, озеленення дахів та фасадів будівель. Останнє так звані «зелені дахи» вже давно стало стандартом у Скандинавії та Центральній Європі. Шар обґрунтування з рослинами на даху не тільки охолоджує будівлю середини, але й знижує температуру поверхні, яку фіксують супутники.

Зміна покриття доріг і площ

Звичайний чорний асфальт поглинає до 95% сонячного випромінювання і перетворює його на тепло. Світлі покривають, навпаки, відбивають значну частину сонячного проміння і нагріваються значно менше. У деяких містах США та Японії вже масово переходять на світлі або навіть спеціальні охолоджувальні покриття для доріг і тротуарів. Для України це поки що звучить як щось далеко, але навіть часткова заміна покриттів у найбільш перегрітих районах міста дала б відчутний результат.

Окремо варто згадати про проникні покриття тобто такий, крізь який проходить вода. Вони не можуть дощовий водій вибиратися на підставі, підтримувати його вологість і забезпечувати природне випарне охолодження поверхні. Це успішніше, ніж асфальт, під яким земля повністю пересихає.

Планування вуличної мережі

Як ми вже з'ясували в попередніх розділах, блокова система вулиць, характерна для ресурсу українських міст, створює зони застою повітря. Там де повітря не рухається — тепло накопичується. Тому при будівництві нових районів слід орієнтуватися на паралельну систему вулиць, яка забезпечує наскрізну вентиляцію міського простору. Якщо подивитися на Миколаїв або на європейські міста зразок Берліна, добре видно, як грамотне планування вулиці саме по собі вирішує значну частину проблеми перегріву.

У вже існуючих кварталах можна частково компенсувати цю проблему за рахунок так званих «зелених коридорів» — смуг рослинності, що тягнуться вздовж вулиці і спрямовують повітряні потоки в середині забудови.

Модернізація промислових підприємств

Основна частина тепла, що кріпиться на супутникових знімках над Нікополем та Білою Церквою, походить саме від промислових об'єктів. Старе обладнання з низьким ККД — це по суті машина для перетворення палива на марне тепло. Модернізація виробничих ліній дозволяє суттєво скоротити кількість тепла, що викидається в атмосферу, і одночасно знизити витрати на енергоносії підприємства. Це не благодійність це вигідно економічно.

окремо, на цих підприємствах можна впроваджувати системи рекуперації тепла тобто вловлювати тепло, що утворюється в процесі виробництва, і використовувати його повторно для обігріву цехів або навіть житлових будинків поблизу. У Скандинавії промислові підприємства таким чином опалюють цілі квартали.

Водні об'єкти як природні регулятори температури

Вода має високу теплоємність вона повністю нагрівається і вільно віддає тепло, тим самим пом'якшуючи температурні коливання навколо себе. Саме тому Кременчук, розташований поруч із Дніпром та Кременчуцьким водосховищем, має менш виражені теплові аномалії відповідно до Нікополя, де водних об'єктів значно менше.

Практичний висновок тут такий: при плануванні нових житлових або промислових районів слід за можливості зберегти та відновити природні води, а

не засипати їх за будівельні майданчики. Також невеликі штучні водою, фонтани та зволожувачі в громадських приміщеннях здатні локально знизити температуру повітря на кілька градусів.

Енергоефективність будівель

Значна частина тепла в містах надходить від будівель через погану теплоізоляцію стін і дахів взимку будівлі буквально гріють вулицю. Утеплення фасадів, заміна старих вікон на сучасні енергоефективні конструкції та встановлення розумних систем управління опаленням — все це зменшує кількість тепла, що марно йде назовні.

Постійний моніторинг за допомогою ГІС

І нарешті те, про що власне і йдеться в цій дипломній роботі. Усі перераховані вище заходи будуть значно ефективнішими, якщо їх підкріпити регулярним супутниковим моніторингом. Геоінформаційні технології не дозволяють просто фіксувати теплові аномалії, а й відстежувати, як змінюється ситуація після впровадження тих чи інших рішень. Висадили дерево в певному районі — через рік зробили знімок і побачили, чи зменшилася температура поверхні. Модернізували — підприємство перевірили, чи зменшилася теплова пляма над ним.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було досліджено особливості формування теплових аномалій у міському середовищі та визначено можливості використання геоінформаційних систем і даних дистанційного зондування Землі для їх виявлення та аналізу.

Проведений аналіз наукових джерел показав, що явище міських теплових островів є одним із найбільш характерних наслідків урбанізації та антропогенного перетворення природного середовища. Встановлено, що основними чинниками формування теплових аномалій виступають ущільнення забудови, скорочення площ зелених насаджень, зростання транспортного навантаження, функціонування промислових об'єктів та збільшення обсягів енергоспоживання. Доведено, що теплові аномалії негативно впливають на екологічний стан міст, сприяють погіршенню якості атмосферного повітря, підвищенню рівня енергоспоживання та посиленню проявів кліматичних змін.

У процесі дослідження було проаналізовано сучасні методи виявлення теплових островів із використанням технологій дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем. Встановлено, що найбільш ефективним підходом до визначення теплових аномалій є використання супутникових даних Landsat, які містять теплові інфрачервоні канали та дозволяють виконувати розрахунок температури земної поверхні. Також підтверджено доцільність застосування спектральних індексів рослинності для оцінювання впливу озеленення на температурний режим урбанізованих територій.

Під час виконання роботи було здійснено аналіз основних джерел просторових даних та геоінформаційних ресурсів, що використовуються для дослідження теплових аномалій. Визначено переваги та особливості використання платформ USGS EarthExplorer, Copernicus Open Access Hub, Sentinel Hub EO Browser, NASA Earthdata та Google Earth Engine. Встановлено, що найбільш достовірні результати забезпечує комплексне використання кількох джерел супутникової інформації та сучасних геоінформаційних технологій.

У межах практичної частини роботи сформовано просторову базу даних для зберігання та обробки растрової інформації, необхідної для проведення аналізу теплових аномалій. Створена структура бази геоданих забезпечує ефективне зберігання, систематизацію та подальше використання супутникових матеріалів і результатів просторового аналізу.

На основі супутникових даних виконано визначення теплових аномалій для міст Нікополь та Біла Церква. Проведений аналіз дозволив виявити території з підвищеними температурними показниками та встановити їхній зв'язок із характером землекористування, рівнем забудови, наявністю промислових об'єктів і станом озеленення. Визначено, що найбільш інтенсивні теплові аномалії формуються в районах щільної забудови, транспортної інфраструктури та промислового використання території.

Виконано порівняння отриманих результатів із аналогічними дослідженнями теплових аномалій в інших містах. Встановлено загальні закономірності формування теплових островів, характерні для більшості урбанізованих територій, а також визначено особливості їх прояву в умовах міст України.

Проведений аналіз рівня емісії парникових газів підтвердив наявність взаємозв'язку між інтенсивністю антропогенного навантаження, розвитком теплових аномалій та процесами зміни клімату. Встановлено, що зростання обсягів викидів парникових газів сприяє підвищенню температури міського середовища та посиленню ефекту міських теплових островів.

За результатами дослідження розроблено рекомендації щодо зменшення негативного впливу теплових аномалій у міському середовищі. Основними напрямками підвищення екологічної стійкості урбанізованих територій визначено збільшення площ зелених насаджень, розвиток зеленої інфраструктури, впровадження енергоефективних технологій, використання екологічно безпечних будівельних матеріалів та вдосконалення систем просторового планування.

Отримані результати підтверджують ефективність використання геоінформаційних систем і даних дистанційного зондування Землі для

виявлення, аналізу та моніторингу теплових аномалій. Розроблений підхід може бути використаний органами місцевого самоврядування, установами екологічного моніторингу та фахівцями у сфері просторового планування для оцінювання екологічного стану міських територій та розроблення заходів адаптації до сучасних кліматичних викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Barbieri T., Despini F., Teggi S. A Multi-Temporal Analyses of Land Surface Temperature Using Landsat-8 Data and Open Source Software: The Case Study of Modena, Italy. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, No. 5. P. 1678.
2. Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 294.
3. Крылова А. Б. Мониторинг формирования и развития «теплового острова» города Киева. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2014. № 1. С. 32–37.
4. Зацерковний В. І., Оберемок Н. В., Березіна П. О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками Landsat. *Вісник Чернігівського національного технологічного університету*. 2018. № 2 (14). С. 112–120.
5. Відділ народонаселення ООН. Перспективи світової урбанізації 2025: зведені результати. Нью-Йорк : Організація Об'єднаних Націй, 2025. 45 с.
6. Met Office Hadley Centre. The Urban Heat Island Effect and Estimates of Climate Change. Exeter : Met Office, 2023. 28 p.
7. European Environment Agency. Urban Adaptation in Europe. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. 112 p.
8. NASA Earth Observatory. Urban Heat Islands. Washington, DC : National Aeronautics and Space Administration, 2024.
9. U.S. Geological Survey. Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide. Reston, VA : USGS, 2024. 196 p.

10. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2024 році. Київ : Міндовкілля України, 2025. 412 с.

11. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. Верховна Рада України.

12. Про Національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX. Верховна Рада України.

13. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. Верховна Рада України.

14. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ : Мінрегіон України, 2019. 185 с.

15. ДСТУ ISO 19115:2017. Географічна інформація. Метадані. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 146 с.

16. Santamouris M. Analyzing the Heat Island Magnitude and Characteristics in One Hundred Asian and Australian Cities and Regions. Science of the Total Environment. 2015. Vol. 512–513. P. 582–598.