

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Інформаційна технологія аналізу теплових аномалій міст»

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 124 «Системний аналіз»

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Системний аналіз

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання
на відповідне джерело*

_____ Андрій СНІГІР

Виконав: здобувач вищої освіти групи САД-41
Андрій СНІГІР

Керівник: к.т.н., доцент Ігор ПАТРАКЕСВ
науковий ступінь, _____ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
вчене звання

Рецензент: к.т.н., доцент Юрій ПЕПА
науковий ступінь, _____ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
вчене звання

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 124 Системний аналіз

Освітньо-професійна програма Системний аналіз

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

Каміла СТОРЧАК

« » 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Снігір Андрій Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Інформаційна технологія аналізу теплових аномалій міст»

керівник кваліфікаційної роботи Ігор ПАТРАКЕСВ к.т.н., доцент

(ПРИЗВИЩЕ Ім'я, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025 р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 30.05.2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: супутникові знімки високої просторової роздільної здатності (наприклад, Landsat, Sentinel-2, MODIS), які містять інформацію про теплове інфрачервоне випромінювання поверхні, метеорологічні дані, зокрема температура повітря, вологість, швидкість вітру та атмосферний тиск, отримані з відкритих джерел (наприклад, NOAA, ECMWF), історичні дані спостережень за температурними аномаліями у міському середовищі для виявлення закономірностей та трендів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Теоретичні основи аналізу теплових аномалій у міському середовищі;

4.2 Розробка елементів інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст;

4.3 Реалізація та апробація інформаційної технології на прикладі міст України.

5. Перелік графічного матеріалу: Презентаційний матеріал на слайдах.

6. Дата видачі завдання 24.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва виконання етапів роботи	Строк виконання етапів робіт	Примітки
1	Підбір науково-технічної літератури		Виконано
2	Написання першого розділу роботи		Виконано
3	Написання другого розділу роботим		Виконано
4	Написання третього розділу роботи		Виконано
5	Написання висновків по роботі		Виконано
6	Підготовка демонстраційних матеріалів		Виконано
7	Підготовка доповіді		Виконано

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Андрій СНІГІР

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи _____

(підпис)

Ігор ПАТРАКЕСВ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, загальний обсяг роботи складає 70 сторінок, має 40 рисунків, 2 таблиці. Список літератури складає 32 джерела.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці інформаційної технології для автоматизованого виявлення, аналізу та візуалізації теплових аномалій міст на основі супутникових даних та ГІС-засобів.. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим впливом ефекту міського теплового острова, який впливає на здоров'я населення, енергоспоживання та екологічний стан урбанізованих територій. Здійснено системний аналіз проблеми теплових аномалій, охарактеризовано їх природу, основні чинники формування (альбедо, вологість, щільність забудови, теплові викиди), наслідки для клімату і здоров'я населення. Детально розглянуто класифікацію теплових аномалій, їх просторово-часові особливості, а також сучасні методи виявлення: супутниковий моніторинг, розрахунок NDVI, температурне картографування та дистанційне зондування Землі. Сформовано базу вхідних даних (супутникові знімки, метеодані, цифрові карти міст), описано обмеження їх використання та інструментарій обробки (QGIS, Python, растрової бази просторових даних). Подано функціональну UML-діаграму застосування системи, наведено алгоритм обробки знімків та отримання аналітичної інформації. Запропонована ІТ-система дозволяє виявляти перегріті зони, аналізувати динаміку змін та створювати рекомендації для сталого міського розвитку. Результати дослідження є практично значущими для екологічного моніторингу, міського планування та управління ризиками в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: ТЕПЛОВІ АНОМАЛІЇ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ, МІСЬКИЙ ТЕПЛОВИЙ ОСТРІВ, ГІС, NDVI, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕПЛОВИЙ ОСТРІВ МІСТА ЯК ОБ’ЄКТ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ	9
1.1. Вплив міського середовища на виникнення теплових аномалій	9
1.2. Системний аналіз факторів впливу на теплові аномалії міст	12
1.3. Вплив теплових аномалій на кліматичні умови міста	19
1.4. Сучасні методи моніторингу та аналізу теплових аномалій міст	27
1.5. Постановка завдання побудови теплового острова міста в контексті системного аналізу	31
1.6. Висновки з першого розділу	33
Розділ 2 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ МІСТ	34
2.1. Вимоги до інформаційної технології та її архітектура	34
2.2. Формування бази просторових і теплових даних	41
2.3. Розробка алгоритмів виявлення та класифікації теплових аномалій	45
2.4. Перехід до температури випромінювання (brightness temperature):	47
2.5. Технологічна схема опрацювання супутникових знімків для виявлення теплових аномалій	48
2.6. Висновки з другого розділу	53
Розділ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ПРИКЛАДІ МІСТ УКРАЇНИ	55
3.1. Реалізація інформаційних технологій на основі застосування даних супутникового моніторингу	55
3.2. Інформаційна технологія аналізу теплових аномалій промислових міст України	60
3.3. Оцінка ефективності та формулювання рекомендацій щодо зниження теплового навантаження	61
3.4. Висновки з третього розділу	63
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	66

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

MC	—	Міське середовище
IT	—	Інформаційна технологія
DEM	—	Цифрова модель рельєфу
API	—	Інтерфейс для взаємодії між програмами
MTL	—	Метадані до супутникового знімка (Landsat)
ML/AL	—	Калібрувальні коефіцієнти для розрахунку радіансу
PostGIS	—	Геопросторова СКБД
GIC	—	Геоінформаційна система
NDVI	—	Нормалізований вегетаційний індекс рослинності
LST	—	Температура поверхні землі
DN	—	Цифрове значення пікселя на супутниковому знімку
NIR		Ближній інфрачервоний спектральний діапазон
QGIS	—	Безкоштовна ГІС-платформа з відкритим кодом
B3, B4	—	Канали знімків для RED та NIR
TIRS	—	Тепловий сенсор супутника Landsat
USGS	—	Американське геологічне агентство — джерело даних Landsat
CSV	—	Табличний текстовий формат
GeoTIFF	—	Формат растрових зображень із геоприв'язкою
ПЗ	—	Програмне забезпечення

ВСТУП

В сучасних умовах глобальних кліматичних змін особливу увагу привертає проблема теплових аномалій, що виникають внаслідок техногенної діяльності людини. Теплові аномалії — це надлишкові викиди тепла в атмосферу та водні ресурси, які поряд із викидами парникових газів є одними з основних чинників глобального потепління. Джерелами таких аномалій є теплова енергетика, транспорт, промислові підприємства, що використовують викопне паливо та ядерну енергію.

Ефективність перетворення енергії в таких системах залишається невисокою: коефіцієнт корисної дії (ККД) для сучасних атомних електростанцій становить близько 30–35 %, а для теплових електростанцій — 35–40 %. Це означає, що 60–70 % енергії втрачається у вигляді теплових викидів у навколишнє середовище. Значний внесок у теплове забруднення також здійснює транспорт із двигунами внутрішнього згоряння, який споживає основну частину продуктів нафтохімічної промисловості.

Акумуляція надлишкового тепла в міському середовищі призводить до утворення теплових островів — локальних зон підвищеної температури порівняно з навколишніми сільськими районами. Це явище спричиняє зміну мікроклімату, активізацію мікроциркуляції атмосфери, інверсію температурних шарів, а також ускладнює механізми переносу забруднюючих речовин. Крім того, теплові скиди у водні ресурси спричиняють зниження вмісту розчиненого кисню у воді, що погіршує стан водних екосистем.

Важливість проблеми визначається також вразливістю сучасної цивілізації до кліматичних змін. Людська діяльність налаштована на дуже вузький діапазон кліматичних умов, і навіть незначні відхилення середніх температур можуть мати катастрофічні наслідки. В зв'язку із зазначеним, виникає нагальна потреба в розробці методів виявлення, аналізу і прогнозування теплових аномалій для своєчасного вжиття заходів щодо їх мінімізації. Ефективне вирішення цієї задачі можливе лише за допомогою комплексного системного підходу, який дозволяє розглядати теплові

аномалії не як ізольоване явище, а як елементи складної взаємопов'язаної системи «техногенне середовище — клімат — біосфера».

Системний аналіз забезпечує формалізацію об'єкта дослідження, виявлення взаємозв'язків та залежностей між компонентами системи, постановку задач аналізу та оптимізації процесів моніторингу теплових аномалій. Застосування інформаційних технологій дає можливість обробляти великі обсяги просторових даних, виконувати автоматичне виявлення аномалій і будувати прогностичні моделі розвитку ситуації.

Метою роботи є розробка інформаційної технології для виявлення та аналізу теплових аномалій міст із застосуванням методів системного аналізу та сучасних інформаційних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети виконані наступні завдання:

- провести аналіз природи і причин виникнення теплових аномалій міського середовища на прикладі міст України;
- дослідити сучасні інформаційні технології збору, опрацювання та аналізу даних теплового моніторингу міського середовища;
- розробити елементи інформаційної технології для виявлення та оцінювання теплових аномалій міст;
- апробувати запропоновану технологію на прикладі міст України;
- сформулювати рекомендації щодо зменшення впливу теплових аномалій на міське середовище та формування відповідних заходів.

Об'єктом дослідження є теплові аномалії, що виникають у міському середовищі внаслідок техногенної діяльності.

Предметом дослідження є методи та інформаційні технології виявлення, аналізу та оцінювання теплових аномалій на прикладі міст України

РОЗДІЛ 1. ТЕПЛОВИЙ ОСТРІВ МІСТА ЯК ОБ'ЄКТ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

1.1. Вплив міського середовища на виникнення теплових аномалій

Тепловий острів міста (ТОМ) — метеорологічне явище, коли через діяльність людини температура в містах вища, ніж у навколишніх сільських місцевості. Як правило, температурна різниця помітніша вночі та при слабкому вітрі, найкраще цей феномен виражений влітку та взимку. Виявляється, цей ефект теплового міського острова вперше був описаний ще на початку дев'ятнадцятого століття. Британський хімік Люк Ховард (Luke Howard) цікавився метеорологією і першим почав спостерігати за міським кліматом, що дало йому можливість побачити значну різницю у температурі повітря за містом і в міській межі, особливо в нічний час. Звичайно ж, назва цього феномену придумав не Ховард, воно виникло набагато пізніше. На рис.1.1. зображено місто Балтимор (Baltimore), яке розташоване в американському штаті Меріленд. На зображенні показано:

- світлі ділянки в центрі (зокрема райони Inner Harbor, Patterson Park) — це зони з підвищеною температурою, тобто тепловий острів міста.
- темніші області навколо (Druid Hill Park, передмістя) — охолодженіші, часто покриті рослинністю або водою.
- позначені орієнтири: BWI Airport, Port — допомагають географічно ідентифікувати територію.

Це типовий приклад ефекту теплового острова, коли центр міста, через забудову, асфальт і малу кількість зелені, нагрівається значно сильніше, ніж околиці. Знімок, ймовірно, зроблено в тепловому інфрачервоному діапазоні за допомогою супутника Landsat [4, 3].

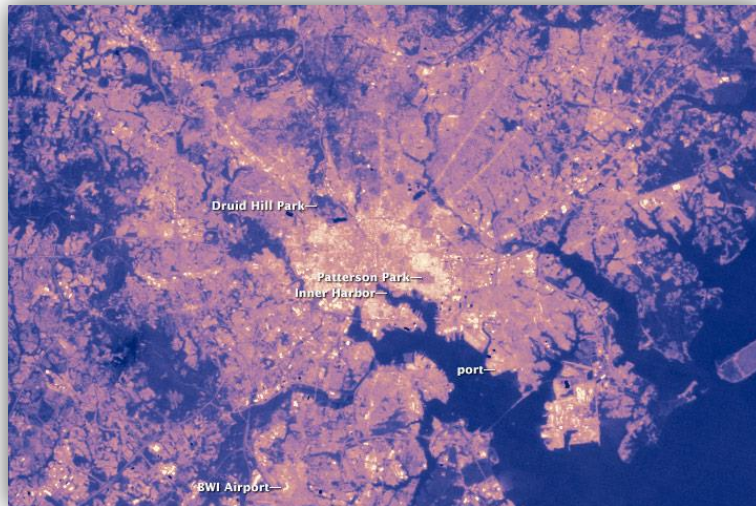


Рисунок. 1.1 – Приклад теплової аномалії міста Балтимор (Baltimore), яке розташовано в американському штаті Меріленд.

Основна причина підвищених температур у місті – антропогенні перетворення земної поверхні. Вони проявляються в щільній забудові міського середовища; покриті природними матеріалами поверхні, активно поглинають теплове випромінювання, і скорочення площ, зайнятих зеленими насадженнями, що веде до змін термічних властивостей земної поверхні і знижує сумарне випаровування. За оцінками фахівців деякий об'єм бетону може втримати приблизно в 2000 разів більше тепла, ніж еквівалентний об'єм повітря. Це призводить до зміни енергетичного балансу території, що і спричиняє за собою підвищення температури в місті в порівнянні з навколишньою місцевістю [1, 2,3].

Формування "теплового острова" пов'язано також з особливостями геометрії земної поверхні на території міста. Високі будівлі мають велику площу поверхні для відбивання і поглинання сонячного випромінювання, що збільшує інтенсивність нагріву міських територій (рис.1.2). Це явище носить назву "ефект міських каньйонів".

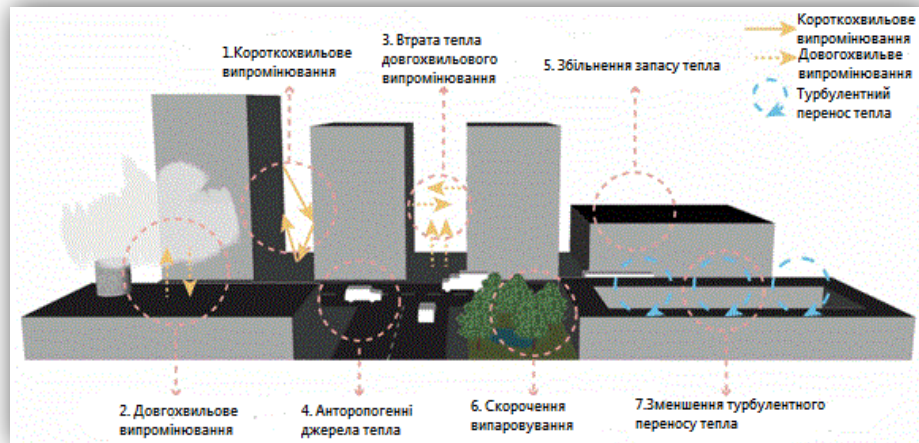


Рисунок. 1.2 – Основні чинники виникнення теплових аномалій міст

Формування острова тепла призводить до зниження комфортності міського середовища для людей. Занадто високі температури влітку і підвищена вологість взимку несприятливо впливають на здоров'я городян. Ця обставина сприяє розвитку досліджень міського острова тепла і пошуку шляхів зниження ефекту підвищення температури повітря і поверхні в межах міста [3].

Досліджується, наприклад, добова динаміка теплового поля міста; вплив особливостей використання міських земель на просторово-часову динаміку локальних теплових аномалій міста; взаємозв'язок змін температури повітря і температури земної поверхні в межах міста; проводиться моделювання міського острова тепла, як температури поверхні, так і температури повітря; моделювання енергетичного балансу міста; проводиться зіставлення температур в місті і за його межами; вивчаються відмінності в інтенсивності теплового випромінювання об'єктів вдень і вночі; при зіставленні з розрахунком за даними видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів значень вегетаційного індексу вивчають взаємозв'язки між великою кількістю рослинного покриву та інтенсивністю теплового випромінювання, особливостями

використання земель. У багатьох роботах основним джерелом інформації є дані космічної зйомки в тепловому інфрачервоному діапазоні.

Приплив сонячної променистої енергії до поверхні ґрунту залежить від широти і рельєфу місцевості, стану поверхні ґрунту (покриття рослинністю), а також часу року і доби і стану атмосфери (ясно, хмарно тощо). У Північній півкулі сумарний приплив сонячної радіації збільшується при русі з півночі на південь. Найбільший приплив сонячної радіації одержують південні схили, найменший північні.

Теплопоглинаюча здатність — здатність ґрунту поглинати променисту енергію Сонця. Вона характеризується величиною альбедо.

Альбедо — кількість короткохвильової сонячної радіації, відбитої поверхнею ґрунту і виражене в % загальної величини сонячної радіації, що досягає поверхні ґрунту. Чим менше альбедо, тим більше поглинає ґрунт сонячної радіації. Воно залежить від кольору, вологості, структурного стану, рівності поверхні ґрунту та рослинного покриву.

В залежності від середньорічної температури і тривалості промерзання ґрунту виділяють 4 типи температурного режиму ґрунтів: мерзлий, довгостроково сезоннопромерзаючий, сезоннопромерзаючий і не-промерзаючий [5, 6].

1.2. Системний аналіз факторів впливу на теплові аномалії міст

Антропогенні чинники включають в себе діяльність людини, яка змінює навколишнє середовище і впливає на клімат. У деяких випадках причинно-наслідковий зв'язок прямий і недвозначний, як, наприклад, при впливі зрошення на температуру і вологість, в інших випадках цей зв'язок менш очевидний. Різні гіпотези впливу людини на клімат обговорювалися протягом багатьох років. На рис. 1.3 подано фактори впливу на теплову аномалію міста

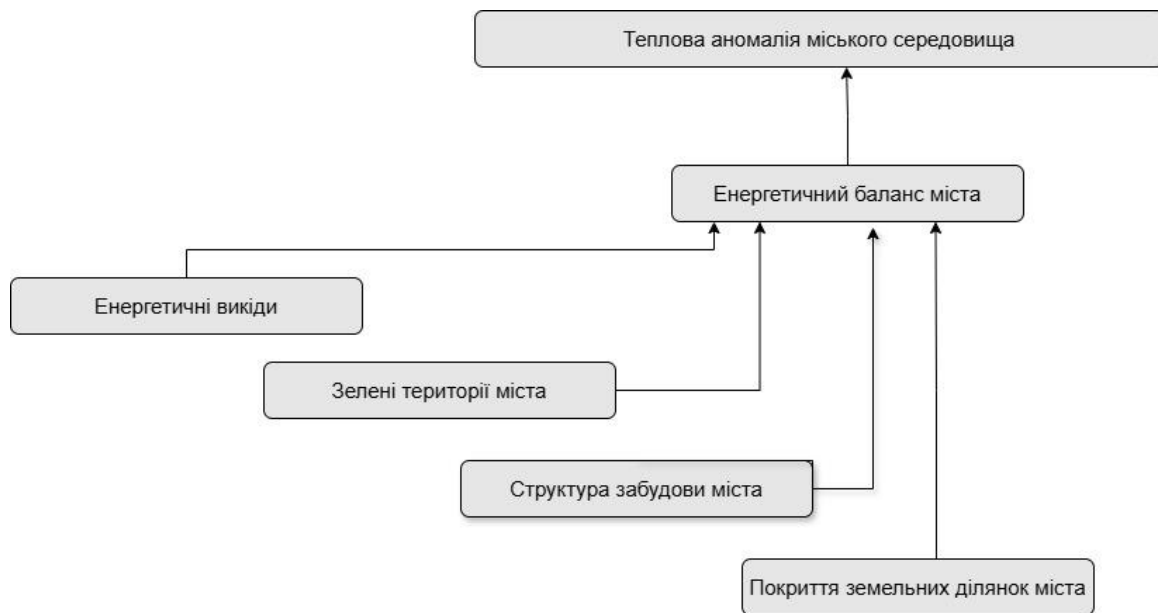


Рис. 1.3 – Фактори впливу на теплову аномалію міста

Головними проблемами є: зростаюча через спалювання палива концентрація CO_2 в атмосфері, аерозолі в атмосфері, що впливають на її охолодження, і цементна промисловість. Інші фактори, такі як землекористування, зменшення озонового шару, тваринництво і вирубка лісів, також впливають на клімат.

Це відкриття піддає сумніву давнє переконання, що цей ефект приводиться в рух головним чином шляхом зниження випарного охолодження в зв'язку з втратою рослинності. Як відомо, випарне охолодження - це процес природного випаровування води, що міститься в природних джерелах, таких як рослинність водойми, які поглинають тепло з навколишнього середовища, тому температура повітря стає нижче.

На рис.1.4 наведено узагальнену класифікацію факторів, що впливають на формування теплового острова міста. Усі фактори згруповано на дві основні категорії: **природні чинники** та **антропогенні чинники**, кожна з яких має свої характерні підгрупи.



Рис. 1.4 – Фактори теплового острова міста

Природні чинники [11, 12]:

1. Альbedo — відображувальна здатність поверхонь. Поверхні з низьким альbedo (наприклад, асфальт, покрівлі з темних матеріалів) поглинають більшу кількість сонячної енергії, що сприяє перегріву міського середовища. Випаровування — природний механізм охолодження територій. У містах зі зменшеною площею зелених насаджень та відкритих водойм рівень випаровування значно знижується, що знижує здатність середовища саморегулюватися температурно.

2. Антропогенні чинники:

Щільність забудови — висока щільність забудови перешкоджає природній вентиляції міського простору, сприяє накопиченню тепла між будівлями та формуванню «міських каньйонів».

Тип вулиці — ширина, орієнтація та забудова вулиць мають прямий вплив на циркуляцію повітря і, відповідно, на ефективність охолодження міського мікроклімату.

Теплові викиди — тепло, що виділяється внаслідок роботи транспорту, кондиціонерів, промислових і побутових установок, підсилює ефект теплового острова, особливо в нічний час.

Дана діаграма наочно демонструє, що теплові аномалії в міському середовищі формуються під впливом як природних характеристик території, так і результатів людської діяльності. Такий поділ дозволяє застосовувати системний підхід до аналізу причин теплового острова міста та формування заходів для його пом'якшення.

Вплив теплових островів на глобальні зміни клімату [10, 13, 14]:

1. Зміна частоти та інтенсивності випадання опадів. В цілому клімат на планеті стане більш вологим. Але кількість опадів не поширюється по Землі рівномірно. У регіонах, які й так на сьогоднішній день отримують достатню кількість опадів, їх випадання стане інтенсивніше.

2. Підвищення рівня моря. Протягом XX століття середній рівень підвищився на 0,1-0,2 м. За прогнозами науковців, за XXI століття підвищення рівня моря складе до 1 м. В цьому випадку найбільш вразливими виявляться прибережні території і невеликі острови. Такі держави як Нідерланди, Великобританія, а також малі острівні держави Океанії і Карибського басейну першими підпадуть під небезпеку затоплення. Крім цього почастишають високі припливи, посиляться ерозія берегової лінії (рис.1.5).



Рисунок. 1.5 – Наслідки підвищення рівня моря

3. Загроза для екосистем та біологічного різноманіття. Існують прогнози зникнення до 30 - 40% видів рослин і тварин, оскільки їх середовище проживання буде змінюватися швидше, ніж вони можуть пристосуватися до цих змін. При підвищенні температури на 1 градус прогнозується зміна видового складу лісу. Ліси є природним накопичувачем вуглецю (80% всього вуглецю в земній рослинності і близько 40% вуглецю в ґрунті). Перехід від одного типу лісу до іншого буде супроводжуватися виділенням великої кількості вуглецю (рис.1.6).



Рис. 1.6 – Основна причина для загрози екосистем

4. Танення льодовиків. Сучасне заледеніння Землі можна вважати одним з найбільш чутливих індикаторів глобальних змін. Супутникові дані показують, що, починаючи з 1960-х років відбулося зменшення площі снігового покриву приблизно на 10%. З 1950-х років в Північній півкулі площа морського льоду скоротилася майже на 10-15%, а товщина зменшилася на 40%(рис.7).

5. Сільське господарство. Вплив потепління на продуктивність сільського господарства неоднозначний. У деяких районах з помірним

кліматом врожайність може збільшитися в разі невеликого збільшення температури, але знизиться в разі значних температурних змін. У тропічних і субтропічних регіонах врожайність в цілому, за прогнозами, буде знижуватися. Найсерйозніший удар може бути нанесений найбільш вразливим країнам, найменш всього готовими пристосуватися до змін клімату.

6. Водоспоживання та водопостачання. Одним з наслідків кліматичних змін може стати нестача питної води. В регіонах з посушливим кліматом (Центральна Азія, Середземномор'я, Південна Африка, Австралія тощо) ситуація ще більш посилиться у разі скорочення рівня випадання опадів (рис.8). Через танення льодовиків істотно знизитися стік найбільших водних артерій Азії – Брахмапутри, Гангу, Хуанхе, Інду, Меконгу, Салуєна і Янцзи.

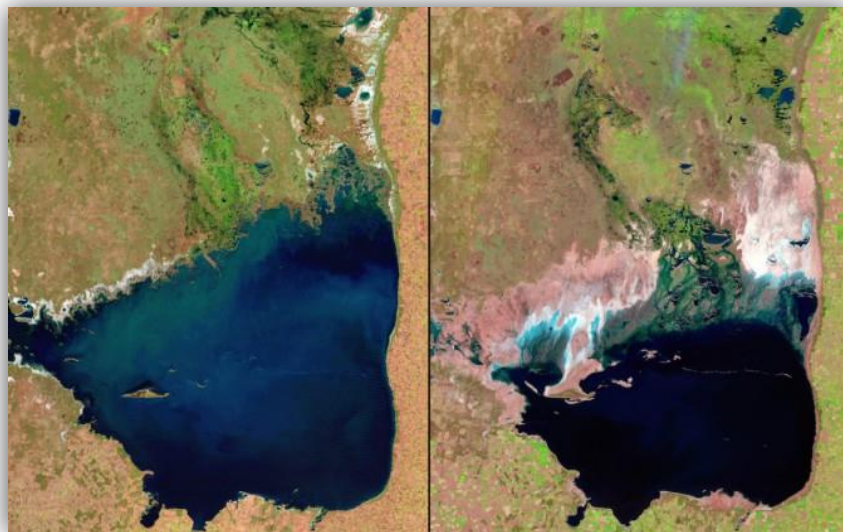


Рис. 1.7 – Нестача питної води

7. Здоров'я людини. Зміна клімату, за прогнозами вчених, призведе до підвищення ризиків для здоров'я людей, насамперед менш забезпечених верств населення. Так, скорочення виробництва продуктів харчування неминуче призведе до недоїдання і голоду. Аномально високі температури можуть призвести до загострення серцево-судинних,

респіраторних та інших захворювань. З підвищенням температури ареали теплолюбних тварин і комах (наприклад, енцефалітних кліщів і малярійних комарів) поширюватися на північ, у той час як люди, що населяють ці території, не будуть володіти імунітетом до нових захворювань [16, 18, 21].

На діаграмі (рис. 1.8) показано причинно-наслідкові зв'язки при виникненні теплової аномалії міст (Fishbone diagram або «діаграма Ішікави»), яка демонструє основні групи факторів, які спричиняють виникнення теплових аномалій у містах. Такий тип візуалізації дає змогу систематизовано представити джерела впливу на формування ефекту міського теплового острова.

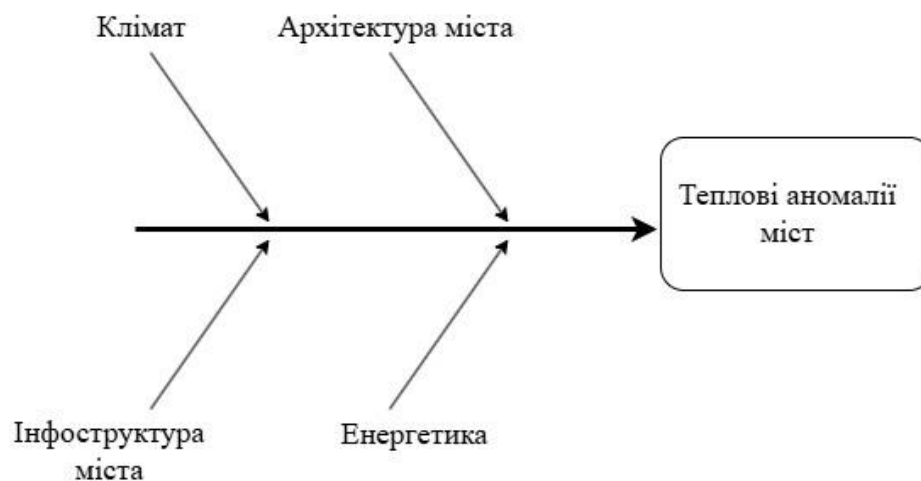


Рис. 1.8 – Діаграма причинно-наслідкових зв'язків при виникненні теплової аномалії міст (Fishbone diagram або «діаграма Ішікави»)

Основними групами причин є [16, 21]:

- **клімат**. Включає природні характеристики регіону: середньорічну температуру, кількість опадів, інсоляцію, хмарність. Від клімату залежить базовий рівень теплового навантаження, а також здатність міста до охолодження;

- **архітектура міста.** Щільність забудови, висота будинків, розташування вулиць, використані матеріали впливають на поглинання сонячного випромінювання та теплової інерцію міських поверхонь.

- **інфраструктура міста.** Дорожнє покриття, транспорт, щільність інженерних мереж впливають на вентиляцію, нагрів території, акумуляцію тепла.

- **енергетика.** Джерела теплових викидів: електростанції, кондиціонери, опалення, промислові об'єкти. Вони прямо підвищують температуру повітря в навколишньому середовищі.

Наведена діаграма дозволяє побачити теплові аномалії не як окреме явище, а як наслідок взаємодії множини факторів — як природного, так і техногенного походження. Це відповідає системному підходу, який передбачає врахування комплексу причин для розробки ефективних управлінських рішень.

1.3. Вплив теплових аномалій на кліматичні умови міста

Парниковий ефект [25] - це проблема, пов'язана з промисловою діяльністю людства, але цю проблему можна зменшити при грамотному підході і захисту навколишнього середовища. В даний час все більш актуальним стає питання про зміну клімату Землі в результаті впливу господарської діяльності людини.

Особливу тривогу викликає збільшення концентрації парникових газів в атмосфері, яке призводить до нагрівання поверхні Землі і нижньої атмосфери і, можливо, є однією з основних причин потепління клімату, яке спостерігається в останні десятиліття. Частина сонячної радіації, що залишилася після відбиття, поглинається земною поверхнею і переходить в тепло. Як відомо, всяке тіло, що має температуру, відмінну від абсолютного нуля (-273°C), є джерелом випромінювання. Чим вище температура тіла, тим більше енергії і тим коротші довжини хвиль воно випромінює. Температура

земної поверхні значно нижче температури на поверхні Сонця і коливається від 190 до 350 К. У відповідності з цими температурами земна поверхня випромінює довгохвильову радіацію в області спектра 4 - 120 мкм. Нагріта таким чином атмосфера випромінює інфрачервону радіацію приблизно в тому ж діапазоні довжини хвиль, що і земна поверхня. [23, 24,26].

Атмосфера захищає Землю від надмірного нагрівання та охолодження: вона грає роль «ковдри», який утримує тепло. При відсутності атмосфери температура земної поверхні була б -23°C , при якій життя на Землі практично неможливе. Завдяки ж атмосфері вона дорівнює $+15^{\circ}\text{C}$. Цю властивість атмосфери називають парниковим ефектом за аналогією з теплицями і оранжереями, які бережуть внутрішнє тепло для рослин. Найбільш значний природний парниковий газ - водяна пара H_2O . Вона поглинає і випромінює довгохвильову інфрачервону радіацію в діапазоні довжин хвиль 4,5 – 80 мкм. Вплив водяної пари на парниковий ефект є визначальним і створюється переважно смугою поглинання 5 - 7,5 мкм. Тим не менше, частина випромінювання поверхні Землі в областях спектру 3 - 5 мкм і 8 - 12 мкм, які називають вікнами прозорості, йде крізь атмосферу у світовий простір.

Парниковий ефект водяної пари посилюється смугами поглинання вуглекислого газу, який потрапляє в атмосферу в результаті вулканічної діяльності, природного кругообігу вуглецю в природі, гниття органічних речовин у ґрунті при нагріванні, а також людської діяльності, головним чином внаслідок спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу) та знищення лісів. Крім вуглекислого газу в атмосфері збільшується вміст таких парникових газів, як метан, закис азоту і тропосферний озон. Метан надходить в атмосферу з болот і глибоких тріщин в земній корі.

Концентрацію закису азоту збільшують використання азотних добрив, викиди літаків, а також процеси окислення. Озон в тропосфері збільшується в результаті хімічних реакцій під дією сонячних променів між вуглеводнями і оксидами азоту, що утворилися внаслідок спалювання викопного палива

Концентрація цих газів зростає швидше, ніж концентрація вуглекислого газу, і в майбутньому їх відносний внесок у парниковий ефект атмосфери може збільшитися [28, 29, 30]. Зростанню парникового ефекту атмосфери сприяє також збільшення концентрації сильно поглинаючого аерозолію індустриального походження (сажа) з радіусом частинок 0,001 - 0,05 мкм. Збільшення в атмосфері Землі змісту парникових газів і аерозолів може значно підвищити глобальну температуру і викликати інші кліматичні зміни, екологічні та соціальні наслідки яких поки важко передбачити.

Міське середовище є одним з багатьох джерел забруднення атмосфери. Спалювання палива в котлах і двигунах транспортних засобів, супроводжується утворенням оксидів азоту, які викликають зміни. При процесах згоряння палива найбільш інтенсивне забруднення приземного шару атмосфери відбувається в мегаполісах і великих містах, промислових центрах зважаючи на широке поширення в них автотранспортних засобів, ТЕЦ, котелень та інших енергетичних пристроїв, які працюють на вугіллі, мазуті, дизельному паливі, природному газі і бензині. Внесок автотранспорту в загальне забруднення атмосферного повітря досягає 40-50 %. Потужним і надзвичайно небезпечним фактором забруднення атмосфери є катастрофи на АЕС (Чорнобильська аварія) і випробування ядерної зброї в атмосфері.

Забруднене повітря над великими містами простягається на висоту 1,5-2,0 км. Ця щільна шапка затримує влітку до 20% сонячних променів, а взимку, коли і так мало світла, поглинає половину його. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) за 2020 рік, щорічно у світі приблизно 3,7 мільйонів людина помирає через забруднення атмосферного повітря.

Загальна кількість смертей, пов'язаних із впливом забрудненого повітря як в приміщеннях, так і в атмосфері, досягає 7 мільйонів в рік. За даними Міжнародного агентства по вивченню раку, забруднення повітря є головною причиною виникнення онкологічних захворювань.

Основними парниковими газами, в порядку їх оцінюваного впливу на тепловий баланс Землі, є [25, 26, 28]:

1. Водяна пара — газоподібний стан води. Немає кольору, смаку та запаху. Міститься в тропосфері. Утворюється молекулами води при її випаровуванні.

2. Оксид вуглецю — безбарвний газ без запаху, зі злегка кислуватим смаком.

3. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері Землі складає в середньому 0,0395%.

4. Метан — найпростіший вуглеводень, безбарвний газ (в нормальних умовах) без запаху. Малорозчинний у воді, легший за повітря. Основний компонент природного газу (77-99 %). За сучасними даними, в атмосферах планет-гігантів сонячної системи в помітних концентраціях міститься метан.

5. Озон — складається з молекул трьохатомних O_3 алотропних модифікацій кисню. При нормальних умовах — блакитний газ. Висока окислююча здатність озону і створення у багатьох реакціях з його участю вільних радикалів кисню визначають його високу токсичність.

Парниковий газ на основі молекул метану в вісімдесят разів більш сильніший, ніж вуглекислий газ, але він присутній в набагато менших концентраціях. Внесок в парниковий ефект, найважливішими газами [15]:

- водяний пар, який вносить 36-72%;
- вуглекислий газ, який вносить 9-26 %;
- метан, який вносить 4-9%;
- озон, який вносить 3-7 %.

Не можливо заявити, що визначений газ викликає точний відсоток парникового ефекту. Наприклад, після того, як міський мікроклімат змінюється, наприклад, з благоустроєм території – зведенням міського парку, то енергоспоживання будівель в районі парку буде відрізнятися від середнього енергоспоживання будівель всього міста.

Про різницю температури повітря на міській території порівняно з сільською місцевістю спочатку згадано у знаменитому дослідженні Люка Ховарда в 1820 році. У своїй книзі під назвою *The Climate of London*, Говард повідомив про виміри температури повітря в центрі Лондона в районі Тоттенхем Грін, що є в 1820-ті роки сільською місцевістю на північ від Лондона. Його виміри, які були проведені протягом кількох місяців показали, що температура в Лондоні була помітно вище, ніж температура в Тоттенхем Грін, особливо в нічний час. Він дуже просто відзначив різницю між температурами повітря по рівнянню:

$$\Delta T(\text{місто} - \text{село}) = T_{\text{місто}} - T_{\text{село}}$$

В епоху, що почалася під час 1980-х років, вчені намагалися описати реальні причини ефекту міського острова тепла, та проаналізувати фактори, що впливають на міський клімат.

Грунтуючись на дослідженні, ми можемо визначити сім причин, як найбільш значимих чинників, що впливають на міський мікроклімат [28]:

1. Посилене короткохвильове випромінювання (багаторазові відбиття від фасадів будівель або від поверхні землі).
2. Довгохвильове випромінювання (в основному викликане забрудненням повітря).
3. Зниження втрат тепла довгохвильового випромінювання (геометрія «міського каньйону» або аналогічних міських елементів, що перешкоджають вивільненню довгохвильового випромінювання).
4. Антропогенні джерела тепла (наприклад, тепло, яке виділяється автомобілям, промисловістю і т.д.).
5. Збільшення запасу тепла (використання будівельних матеріалів, тротуарних матеріалів тощо).
6. Зниження випаровування (зменшення числа водних об'єктів, рослинності).
7. Зниження турбулентного переносу тепла (низька швидкість вітру в міських районах, низький рівень міської вентиляції).

Ще однією з причин виникнення теплових аномалій в містах, це розташування вулиць в містах (рис.1.9).

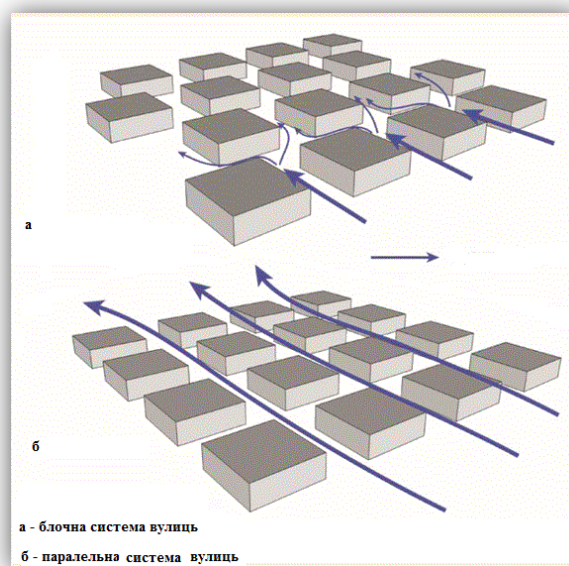


Рисунок. 1.9 – Існуючі системи вулиць

Через неоднорідність вуличної мережі, відбувається так званий застій повітряних мас, які завдають найбільшої шкоди людям. Існує два типи розміщення вулично-дорожньої мережі, це паралельна система вулиць та блочна. Блочна система розповсюджена здебільшого в містах з давньою історією або в історичних районах міст.

Тільки зараз люди зрозуміли як можна було боротись з проблемою застою повітря в місті і починають будувати міста та райони міст з паралельною системою вулиць. Але і паралельна система вулиць розповсюджена не так сильно, в більшості випадків це молоді міста. Також розташування вулиць у місті залежить від розташування міста в певному типі клімату, тоді як блочна система вулиць у північних регіонах дозволяє зберігати тепло в містах, та зекономити на обігріві міста. А в містах розташованих в південних регіонах планети, паралельна система дозволяє охолодити міста.

Міста України складаються з блочних або комбінованих систем вулиць, а це в свою чергу створює передумови для поганої циркуляції

повітря і до застою повітря, що викликає теплові аномалії та шкодить екосистемі [28,29,30].

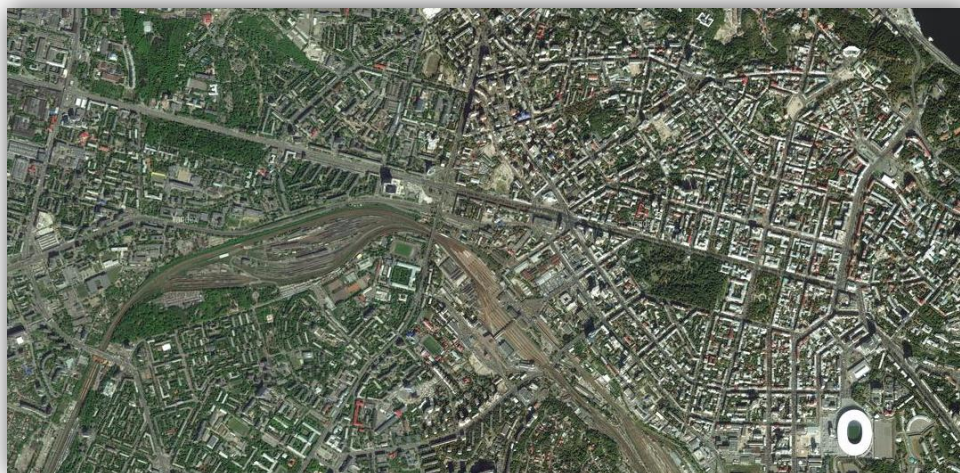


Рисунок. 1.10 – Приклад розміщення вулиць в місті Київ

Як показано на прикладі міста Києва, система вулиць блочна (рис.1.10), що зумовлює утворення поганої циркуляції повітря в місті, але місто рятує багато парків, яких стає все менше через забудовування центральної частини Києва, та вигідне положення біля річки Дніпро. Така ж ситуація в усіх містах України, і не всі мають багато зелених насаджень та великі водні артерії. В Україні є тільки два міста з паралельним розташуванням вулиць це Миколаїв (рис.1.11) та Ізмаїл (рис.1.12).

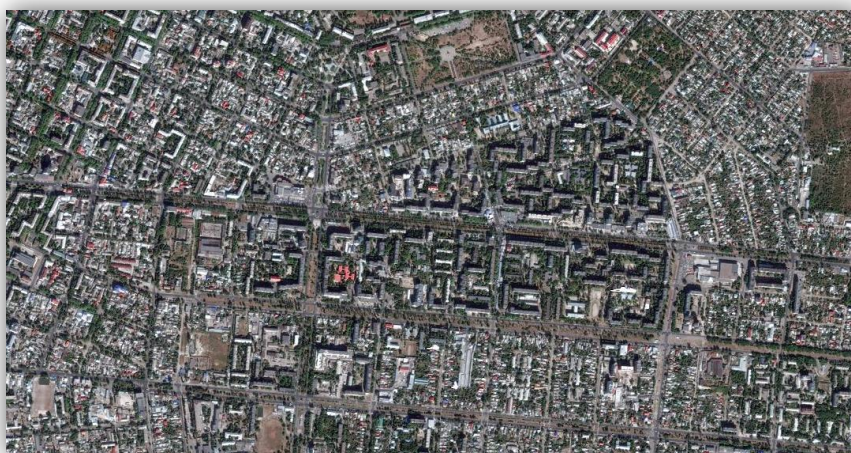


Рисунок. 1.11 – Приклад розміщення вулиць в місті Миколаїв

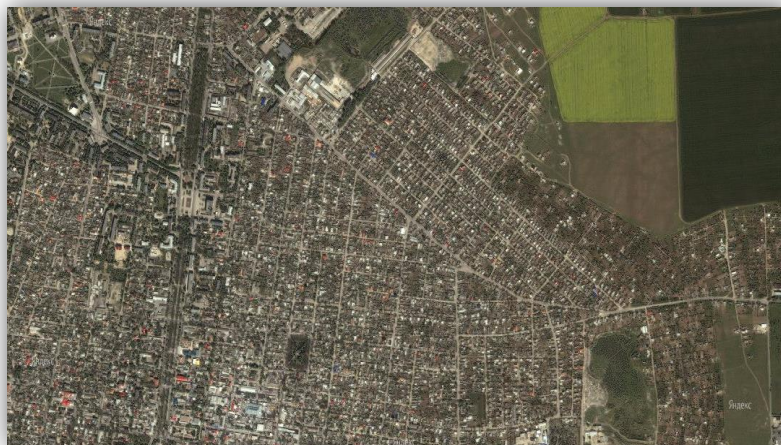


Рисунок. 1.12 –Приклад розміщення вулиць в місті Ізмаїл

Ці міста розташовані на чорноморському узбережжі, що дозволяє їм охолоджувати свою територію в теплу пору року за допомогою постійної циркуляції повітря в місті.

Тепер розглянемо міста Європи, такі як Рим (рис.1.13) та Берлін (рис.1.14), які мають паралельну систему вулиць, це навіть відслідковується в історичних районах. Міста з багатою культурною спадщиною, що свідчить про розуміння тодішніх вчених про циркуляцію повітря.

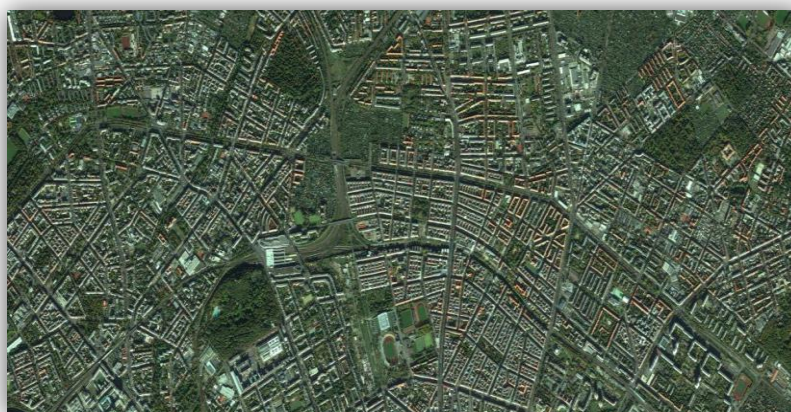


Рисунок. 1.13 – Приклад розміщення вулиць в місті Рим



Рисунок. 1.14 – Приклад розміщення вулиць в місті Берлін

Враховуючи той факт, що в зв'язку з ефектом міського острова тепла температура в міських районах протягом року вище порівняно з сільською місцевістю, це може бути вигідно для навантажень на опалення в зимовий період. З іншого боку, якщо розглядати цю ситуацію в теплій країні, де навантаження на охолодження в літній період є більш значним, ніж навантаження на опалення на весь рік, ефект міського острова тепла збільшить навантаження на охолодження. У цьому випадку, цей ефект не може розглядатися як позитивне явище.

1.4. Сучасні методи моніторингу та аналізу теплових аномалій міст

На рис.1.15 подано концепцію функціонування існуючих інформаційних технологій **аналізу теплових аномалій міст**, відображаючи її основні входи, виходи та коло суб'єктів взаємодії. Такий підхід відповідає вимогам системного аналізу, що передбачає урахування інформаційного обміну між підсистемами інформаційного середовища.

Центральний елементом є інформаційна технологія аналізу теплових аномалій міст — основна система, яка виконує аналіз супутникових даних, обчислення NDVI, температур поверхні та формує вихідну аналітичну інформацію. Суб'єктами моніторингу та контролю можуть бути:

- фахівці з охорони довкілля;
- екологічні служби та аналітики;

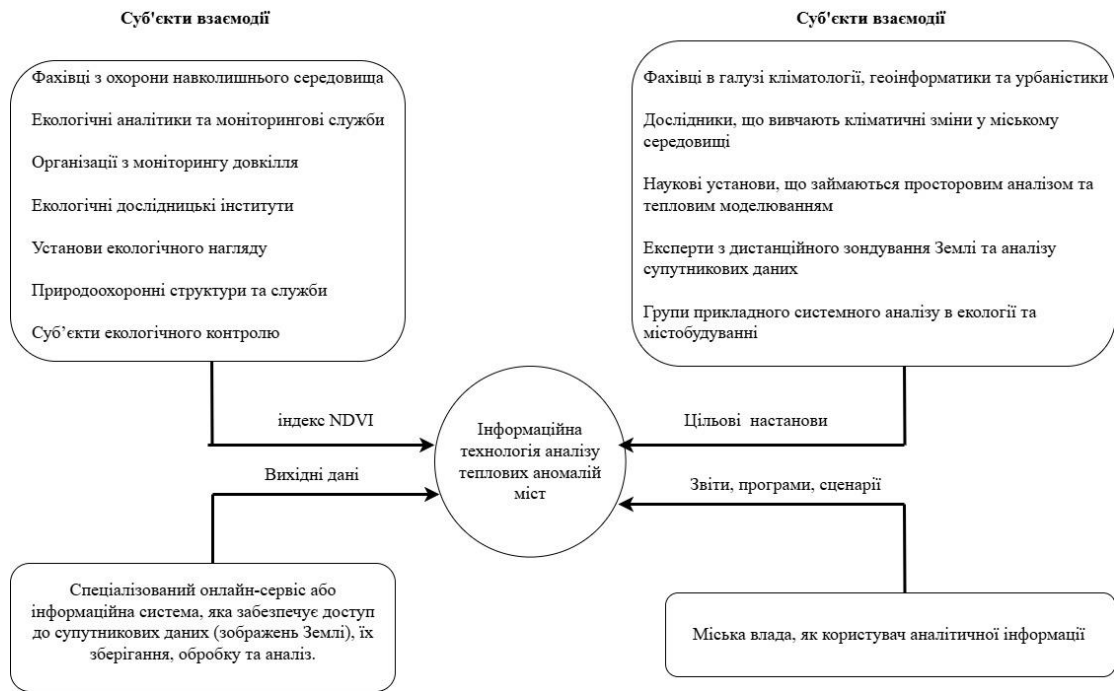


Рис. 1.15 – Концепція функціонування існуючих інформаційних технологій аналізу теплових аномалій міст

- природоохоронні інституції;
- дослідницькі екологічні установи.

Вхідні дані формуються на основі застосування інформаційного онлайн-сервіс або системи, яка забезпечує доступ до супутникових зображень Землі.

Суб'єктами науково-експертної взаємодії є фахівці в галузі кліматології, геоінформатики, урбаністики [26, 27, 28]:

- експерти з дистанційного зондування Землі;
- наукові установи з теплового моделювання;
- системні аналітики в екології та містобудуванні.

Науково-експертний кластер формулює вимоги до даних та завдань інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст.

Кінцевим кластером користувачів інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст є міська влада, яка:

- приймає управлінські рішення на основі звітів;

- використовує аналітику для планування розвитку міста;
- отримує сценарії реагування на теплові аномалії.

Діаграма на рис. 1.15 чітко показує, що інформаційна технологія аналізу теплових аномалій функціонує як центр обробки даних, отримуючи вхідну інформацію від екологічних та наукових установ, використовуючи супутникові платформи та передаючи результати владі і науковцям. Це підтверджує роль такої системи як ключового елемента в сучасному кліматичному управлінні містом.

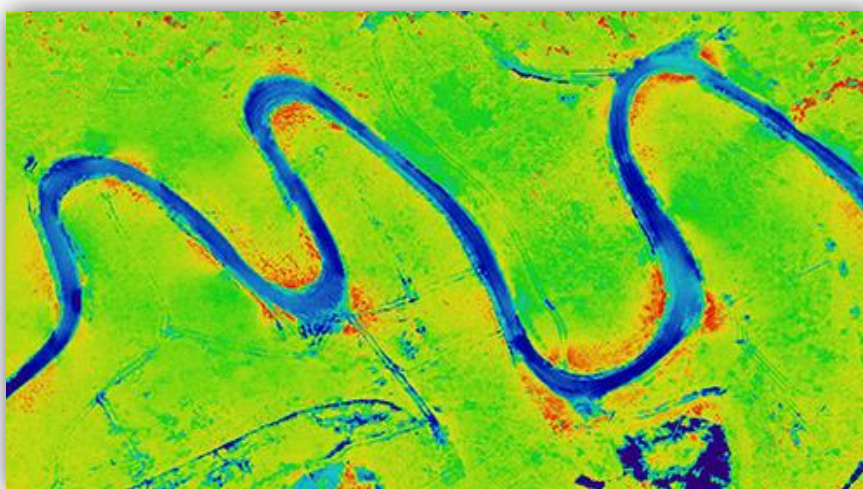


Рис. 1.16 – Приклад спектрального каналу NIR

NDVI часто використовується по всьому світу для моніторингу посухи, моніторингу та прогнозування сільськогосподарського виробництва, надання допомоги у прогнозуванні небезпечних зон пожеж і карт настання пустелі. NDVI краще для глобального моніторингу рослинності, оскільки допомагає компенсувати зміну умов освітлення, ухил поверхні, експозицію та інші зовнішні фактори (Lillesand 2004). Різні відображення в червоному і інфрачервоному (ІЧ) каналах дозволяють контролювати щільність та інтенсивність росту зеленої рослинності з використанням спектрального відбиття сонячної радіації. Зелене листя зазвичай показує найкраще відображення в близькому діапазоні

інфрачервоних довжин хвиль, ніж в діапазонах видимих довжин хвиль [32].

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 голого 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.

Інфрачервоне випромінювання — електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла (з довжиною хвилі $\lambda = 0,74$ мкм і частотою 430 ТГц) і мікрохвильовим радіовипромінюванням ($\lambda \sim 1\text{-}2\text{мм}$, частота 300ГГц).

Інфрачервоне випромінювання становить більшу частину випромінювання ламп розжарювання газорозрядних ламп, близько 50% випромінювання Сонця; інфрачервоне випромінювання дають деякі лазери. Для його реєстрації користуються тепловими і фотоелектричними приймачами, а також спеціальними фотоматеріалами.

Весь діапазон інфрачервоного випромінювання умовно ділять на три області [26]:

ближня: $\lambda = 0,74\text{-}2,5$ мкм;

середня: $\lambda = 2,5\text{-}50$ мкм;

далека: $\lambda = 50\text{-}2000$ мкм.

Наприклад, дані теплового інфрачервоного діапазону, отримані з метеорологічних супутників серії NOAA, дозволили ще в 1998-1999 рр. створити підсистему супутникового екологічного моніторингу міста, яка була здатна виявляти великі теплові аномалії, зокрема, викиди промислових відходів (ТЕЦ, великі виробництва, ставки-охолоджувачі), реєструвати димні шлейфи від труб, що виникають в результаті великих лісових і торф'яних пожеж на околицях міста. Процес виявлення теплових аномалій включав в себе: класифікацію ділянок зображення за значенням

радіаційної температури і виявлення аномальних на даній території джерел випромінювань; виділення теплових аномалій на основі аналізу часових рядів. Залежно від завадової обстановки, часу доби та природно-кліматичних умов використані різні стандартні алгоритми виявлення теплових аномалій, а також алгоритми, які успішно апробовані при виявленні пожеж. Приклад виділення джерел випромінювання від теплових електростанцій. При відомих розмірах джерела теплових випромінювань, наприклад, труб ТЕЦ, ставків-охолоджувачів, корпусів сталеливарних виробництв і тому подібних об'єктів, а також при здійсненні теплової зйомки в декількох спектральних діапазонах одночасно, можливе отримання абсолютних значень температур.

1.5. Постановка завдання побудови теплового острова міста в контексті системного аналізу

На рис. 1.17 зображено структуровану модель постановки завдання побудови теплового острова міського середовища з позицій системного аналізу. Діаграма відображає логічну послідовність етапів, необхідних для визначення сутності задачі, її мети, вхідних параметрів, обмежень і очікуваних результатів. Така структура дозволяє формалізувати задачу для інформаційної технології, що досліджує теплові аномалії.

Метою дослідження визначено виявлення, оцінювання та прогнозування теплових аномалій у межах міської території, що охоплює як формування теплових геоінформаційних моделей «на сьогодні», так і передбачення динаміки майбутніх теплових аномалій.

Завдання бакалаврської роботи формулюється як знайти та визначити просторово-часові зони теплових аномалій на супутникових знімках на основі застосування інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст.

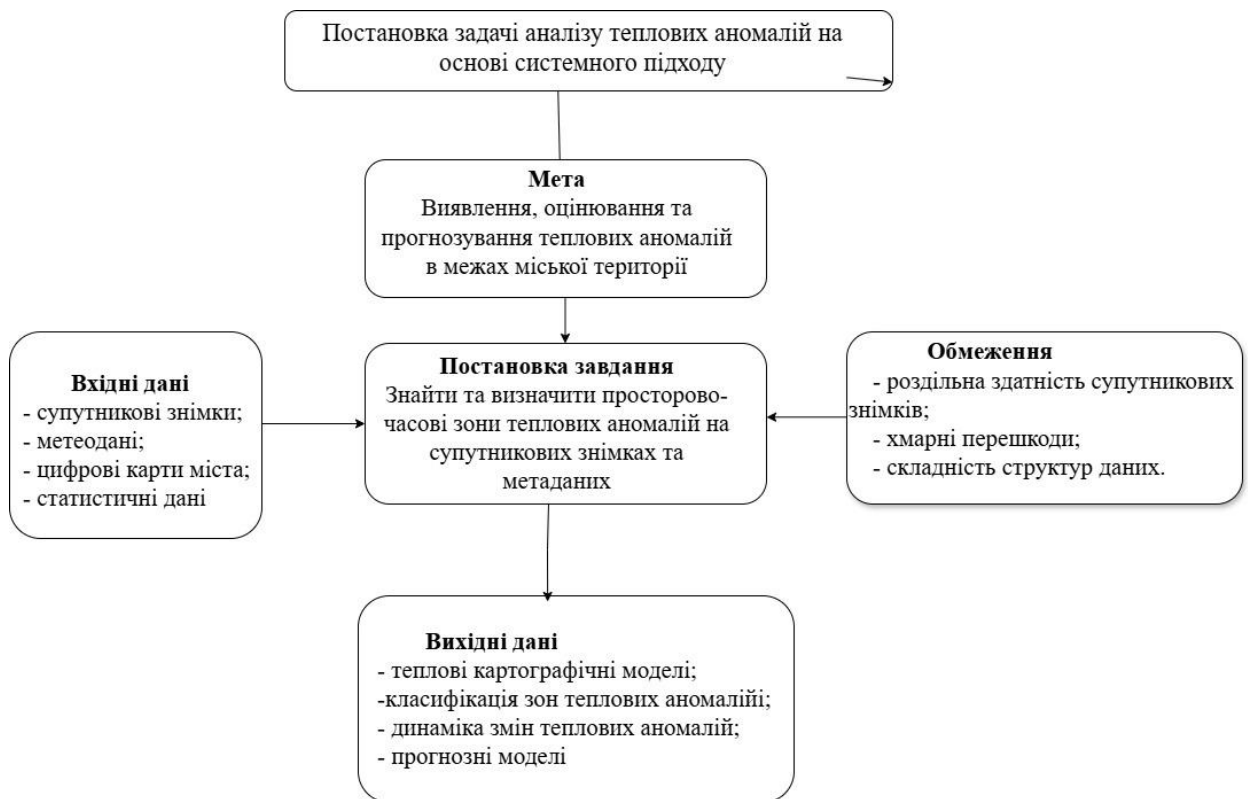


Рис. 1.17 – Діаграма постановки задачі аналізу теплових аномалій в контексті системного аналізу.

Такий підхід дозволяє системі автоматично аналізувати багатоспектральні знімки, знаходити відхилення температур, зіставляти їх із об'єктами, які є джерелами та причинами теплових аномалій.

Вхідними даними для інформаційної технології є [18, 22]:

- супутникові знімки (Landsat, Sentinel);
- метеодані (температура, вологість, вітрові поля);
- цифрові карти міста (зонування, забудова);
- статистичні дані (густота населення, енергоспоживання).

Очікуваними результатами інформаційної системи є:

- теплові картографічні моделі (визначають інтенсивність перегріву в місті);
- класифікація зон теплових аномалій (за ступенем ризику);
- аналіз динаміки змін у різні періоди (день/ніч, сезон, рік);

- прогностні моделі для прогнозування розвитку теплових аномалій.

Діаграма на рис.1.17 дозволяє чітко структуровано сформулювати задачу бакалаврської роботи — від мети до реалізації. Такий підхід демонструє володіння методами системного аналізу та здатність побудувати інформаційну технологію, що працює з просторовими та часовими даними для оцінки екологічного стану міста.

1.6. Висновки з першого розділу

В першому розділі проведено всебічний аналіз проблеми теплових аномалій міст, як складного системного явища, що формується під впливом низки природних і антропогенних факторів. Системний підхід дозволив представити міське середовище як сукупність взаємопов'язаних підсистем, які впливають на просторово-часовий розподіл температури.

В підсумку проведеного аналізу теплового острова міста як об'єкта системного аналізу, можна зробити наступні висновки:

1. Описано природу явища «тепловий острів міста», його історичне відкриття, добову та сезонну динаміку, наслідки для якості життя населення та екологічної ситуації. Продемонстровано на прикладі м. Балтимор реальне існування такого ефекту.

2. Розглянуто природні (альbedo, випаровування, рельєф) і антропогенні (щільність забудови, теплові викиди, тип вулиць) чинники. Запропоновано класифікацію причин виникнення аномалій за допомогою блок-схем і причинно-наслідкової діаграми Ішікави.

3. Розкрито роль теплових аномалій у глобальних кліматичних змінах — зростанні температури, парниковому ефекті, підвищенні рівня моря, загрозі для біорізноманіття, сільського господарства, здоров'я населення.

4. Визначено ключові сучасні методи дослідження аномалій: супутниковий моніторинг, обчислення NDVI, інфрачервоні знімки, температурне картографування, ГІС-аналіз, дистанційне зондування Землі. Виділено суб'єкти взаємодії: екологи, науковці, міська влада.

5. Сформульовано задачу бакалаврської роботи: виявити, класифікувати та спрогнозувати просторово-часові зони теплових аномалій міста на основі супутникових знімків, метеоданих та цифрових моделей. Наведено блок-схему, що описує структуру входів, обмежень і вихідних даних.

6. Зроблено узагальнення, що застосування інформаційних технологій у поєднанні з системним аналізом є ефективним інструментом для виявлення та управління тепловими аномаліями в урбанізованих середовищах. Це створює підґрунтя для подальшої розробки прикладної ІТ-системи в межах дипломної роботи.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ МІСТ

2.1. Вимоги до інформаційної технології та її архітектура

Інформаційна технологія (ІТ) аналізу теплових аномалій міських територій повинна забезпечувати виконання таких функцій:

- збір вхідних даних: супутникові знімки (наприклад, Landsat, Sentinel) з відповідними спектральними каналами;
- попередня обробка зображень (корекція, обрізання, нормалізація);
- обчислення індексів (LST – температура поверхні, NDVI – індекс рослинності, NDBI – індекс забудови);
- побудова тематичних карт теплових аномалій;
- виявлення "теплових островів" у міському середовищі;
- формування аналітичних звітів та рекомендацій для містобудівного планування;
- інтеграція з ГІС-середовищем, зокрема QGIS.

Вихідними даними проекту є:

- супутникові знімки високої роздільної здатності, зі супутника Landsat 8;

- програмні ресурси QGIS;
- геопортали супутникових знімків [25, 26]:

За допомогою цих ресурсів користувачі зможуть отримати доступ до ресурсів єдиного банку геоінформаційних даних, а також здійснювати пошук по єдиному каталогу інформації дистанційного зондування Землі, розрахунок координат і відстаней для вибраних об'єктів на фотокарті і формування замовлення на архівні матеріали. Космічний апарат Landsat 8 (рис.16), отримує зображення у видимому діапазоні хвиль, в ближньому ІЧ і в далекому ІЧ, з роздільною здатністю знімків від 15 до 100 метрів на точку. Проводиться зйомка суші і полярних регіонів. У добу знімається близько 400 сцен (у попереднього LandSat - 7 було всього 250 сцен в день). Сенсори OLI і TIRS мають більш високе відношення сигнал-шум (SNR) і дозволяють знімати до 12 біт на точку. Параметри продукції Landsat 8 [27]:

- рівень обробки: 1T (корекція рельєфу);
- формат зображень: GeoTIFF;
- розмір пікселя: 15метрів/30метрів/100м.(панхроматичний канал/мультиспектральний канал/дальній ІЧ);
- проекція: UTM, також полярна стереографічна для Антарктиди;
- система координат: WGS 84;
- точність позиціонування: ООО: КВО 12 метрів (90 %).

На рис.2.1. наведено зображення Landsat-8 — супутника дистанційного зондування землі, який створено спільно NASA та USGS та виведеного на орбіту 11 лютого 2013 року. Супутник був побудований на основі платформи Leostar-3 корпорацією Orbital Sciences [29].

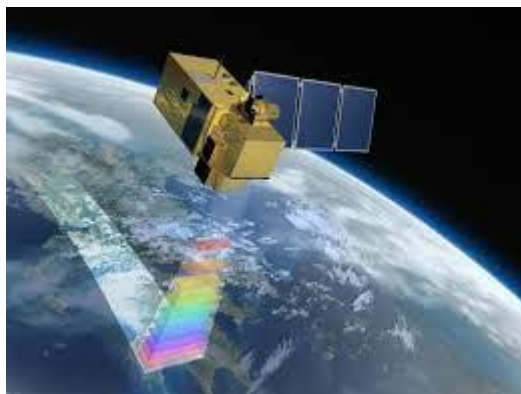


Рис. 2.1 – Landsat-8 - супутник дистанційного зондування землі, який створено спільно NASA та USGS

Супутникові зображення — збірна назва даних, яку отримують за допомогою космічних апаратів (КА) в різних діапазонів електромагнітного спектра, які візуалізуються потім за певним алгоритмом. Як правило, під поняттям супутникових зображень в широких масах розуміють оброблені дані дистанційного зондування Землі, представлені у вигляді візуальних зображень.

Для отримання знімків було обрано два інформаційних ресурси, які надають знімки супутника Landsat 8 безкоштовно та у вільному доступі.

Через веб-ресурс EarthExplorer (рис.2.2), можна шукати знімки за географічними назвами або координатами, задавати певні часові рамки, вибирати супутники, день-ніч, рівень хмарності. Знімки доступні у кількох форматах. Всі знімки йдуть з геоприв'язкою, тобто це дає змогу працювати з ними у будь-якій геоінформаційній системі.

Для обробки знімків використовується системне забезпечення QGIS, яке в повній мірі дає можливість для виконання поставленої задачі.

Платформа QGIS дозволяє публікувати географічну інформацію для доступу та використання будь-якими користувачами. У тисячах організацій різних галузей діяльності люди використовують QGIS у великому діапазоні застосувань, включаючи планування, аналіз, управління майном, ознайомлення з операціями, робота на майданчику, наприклад, мобільний

огляд та застосування заходів, дослідження ринку, логістика, освіта і пропаганда. Зазвичай широко використовується QGIS тому, таке програмне забезпечення допомагає:

QGIS дозволяє виконувати наступне [17,18]:

- створювати, обмінюватися і використовувати інтелектуальні карти;
- компіляція географічної інформації;
- створювати і управляти базами географічних даних;
- рішення задач за допомогою просторового аналізу;
- створення додатків на підставі карт;
- зв'язок і обмін інформацією з використанням сили географії та візуалізації.

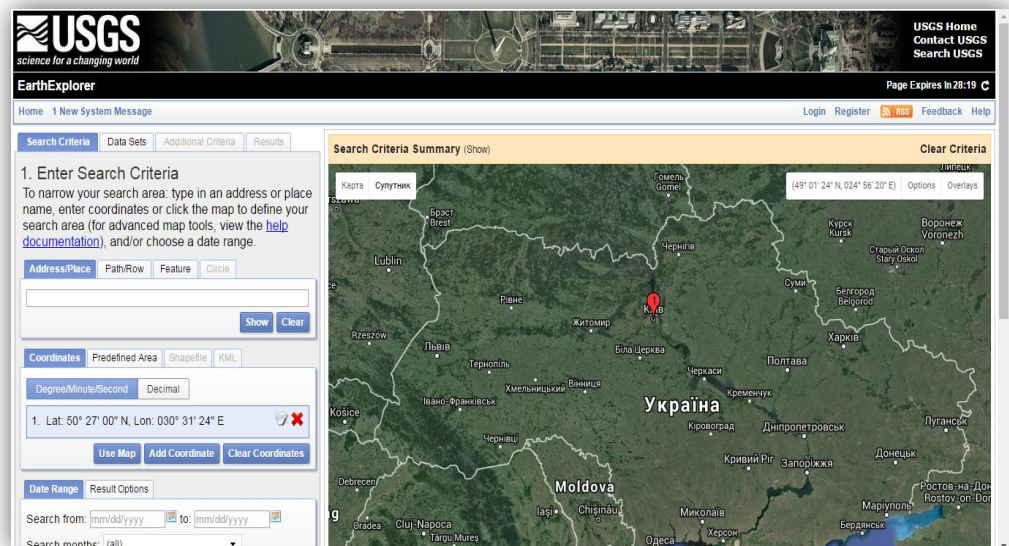


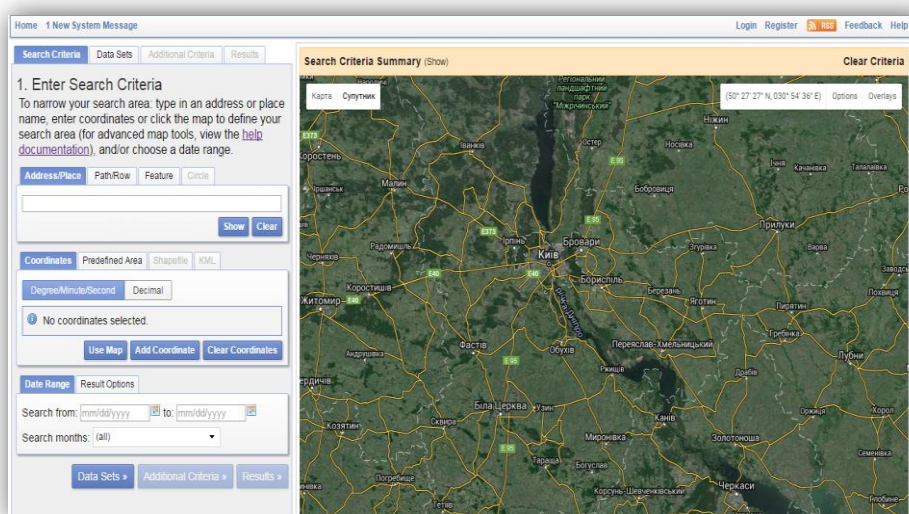
Рис. 2.2 – Приклад інформаційного ресурсу USGS

Завантаження потрібного знімку просте та зрозуміле і не потребує спеціальних навичок (рис.2.3).



Рис. 2.3 – Скачування знімку

Другим геопорталом є earthexplorer.usgs.gov що дозволяє отримувати знімки для обробки та визначення теплових аномалій. Його використання значно складніше але повністю та в цілому задовольняє наші потреби в повноцінному отриманні знімків для роботи. Присутня функція зміни режиму перегляду знімків (карта та супутник). Інтерфейс (рис.2.4) доволі складний та не зрозумілий, але великий вибір функціонального забезпечення все компенсує, що дає змогу в повній мірі використовувати геопортал на всі 100%.

Рис. 2.4 – Інтерфейс геопорталу earthexplorer.usgs.gov

Для пошуку знімків в лівій частині геопорталу знаходиться панель пошуку потрібної місцевості для вибору знімка, що є великою перевагою. Адже ми можемо шукати місцевість як і по карті, так і вбити в пошукову строку. Пошук (рис.2.5) можемо здійснювати як і по назві місця так і по координатам.

To narrow your search area: type in an address or place name, enter coordinates or click the map to define your search area (for advanced map tools, view the [help documentation](#)), and/or choose a date range.

Address/Place Path/Row Feature Circle

Київ

Show Clear

Click on an Address/Place to show the location on the map and add coordinates to the Area of Interest Control.

Num	Address/Place	Latitude	Longitude
1	Київ, Україна 02000	50.4501	30.5234

Coordinates Predefined Area Shapefile KML

Degree/Minute/Second Decimal

No coordinates selected.

Use Map Add Coordinate Clear Coordinates

Date Range Result Options

Search from: mm/dd/yyyy to: mm/dd/yyyy

Search months: (all)

Рис. 2.5 –Пошукова панель

Також на цій панелі знаходиться пошук знімків за певний період часу на даній території. Після вибору часового періоду, переходимо на панель вибору супутників (рис.2.6), що є безперечно великим плюсом.

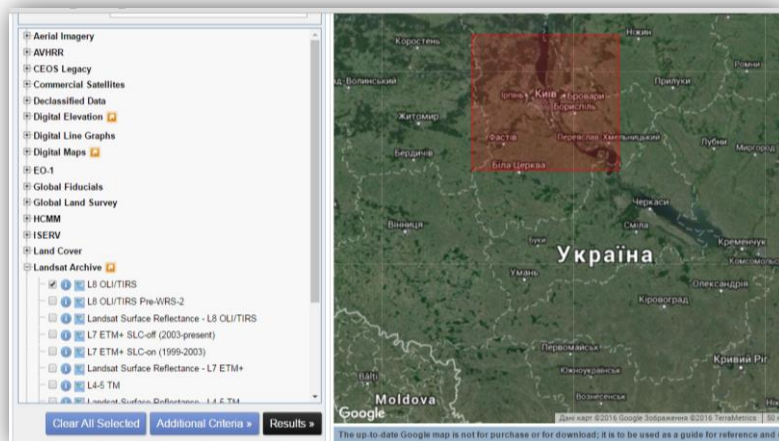


Рис. 2.6 – Вибір супутників

Вибір знімку не займає великий проміжок часу, тому присутня функція накладання знімку на карту і це дає можливість побачити всю картину повністю (рис.2.7).

Але вибір самого знімку доводиться проводити візуально, спостерігати за освітленістю знімка чи його прозорістю. Також відсутнє сортування за датою завантаження знімка є простою задачею, адже ми можемо вибрати потрібний формат.

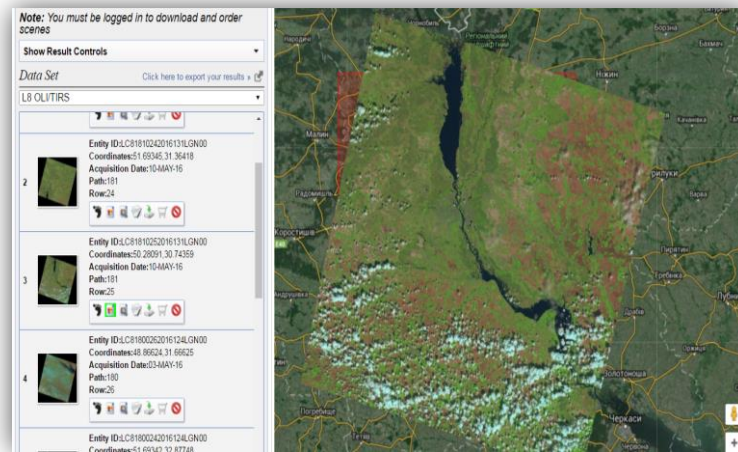


Рис. 2.7 – Накладання знімка на карту

Основними недоліками геопорталу є відсутність скачування (рис.2.8) знімків без реєстрації та неудосконалений заплутаний інтерфейс.

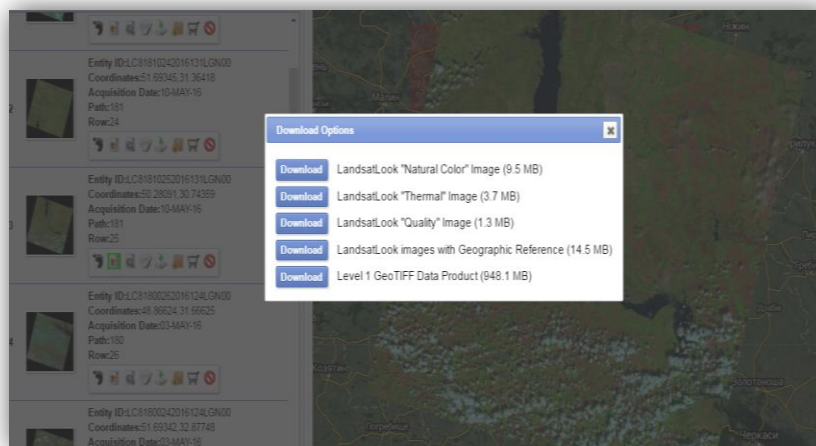


Рис. 2.8 – Процес скачування супутникових знімків

На рис. 2.9 подано діаграму варіантів використання інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст, яка відображає взаємодію зовнішніх користувачів (акторів) із функціональністю інформаційної системи

Така UML-діаграма дозволяє формально описати функціональні вимоги до системи на ранніх етапах проєктування. Основними акторами є [19, 20,21]:

-ГІС аналітики — використовують систему для аналізу NDVI, моніторингу стану зелених зон, формування екологічних оцінок;

-експерти з планування стійкого розвитку міста — отримує звіти про зони теплових аномалій, використовує результати для застосування заходів щодо сталого розвитку міста;

-сервер супутникових знімків — надає вхідні дані (зображення, метадані).

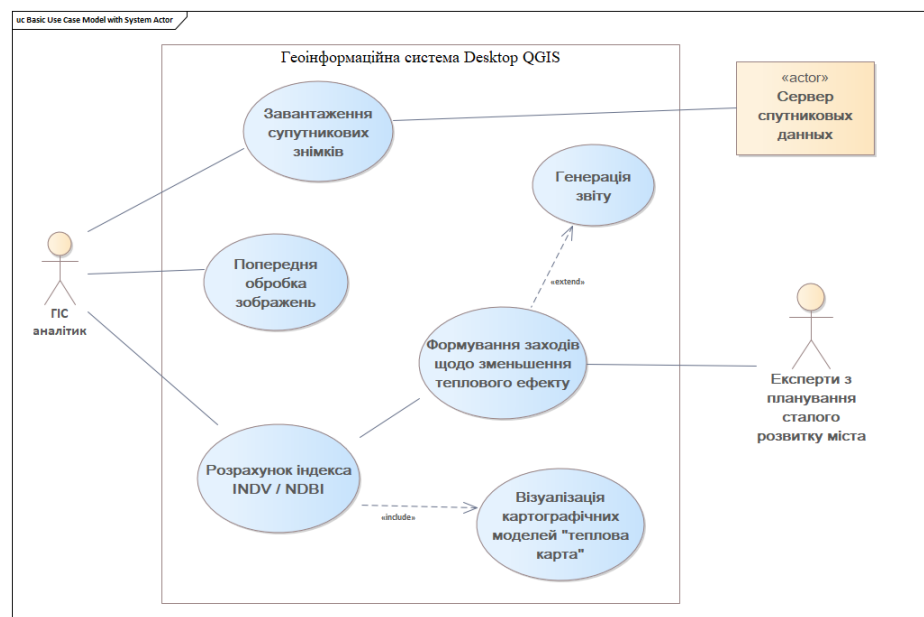


Рис. 2.9 – Діаграма Use Case інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст

Діаграма наочно демонструє, які саме функції реалізує інформаційна технологія і які групи користувачів зацікавлені у її застосуванні. Вона є основою для подальшої деталізації структури системи, проєктування інтерфейсів та програмних модулів.

2.2. Формування бази просторових і теплових даних

Векторні дані є широко використовуваним засобом подання даних у базі геоданих, які придатні 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".

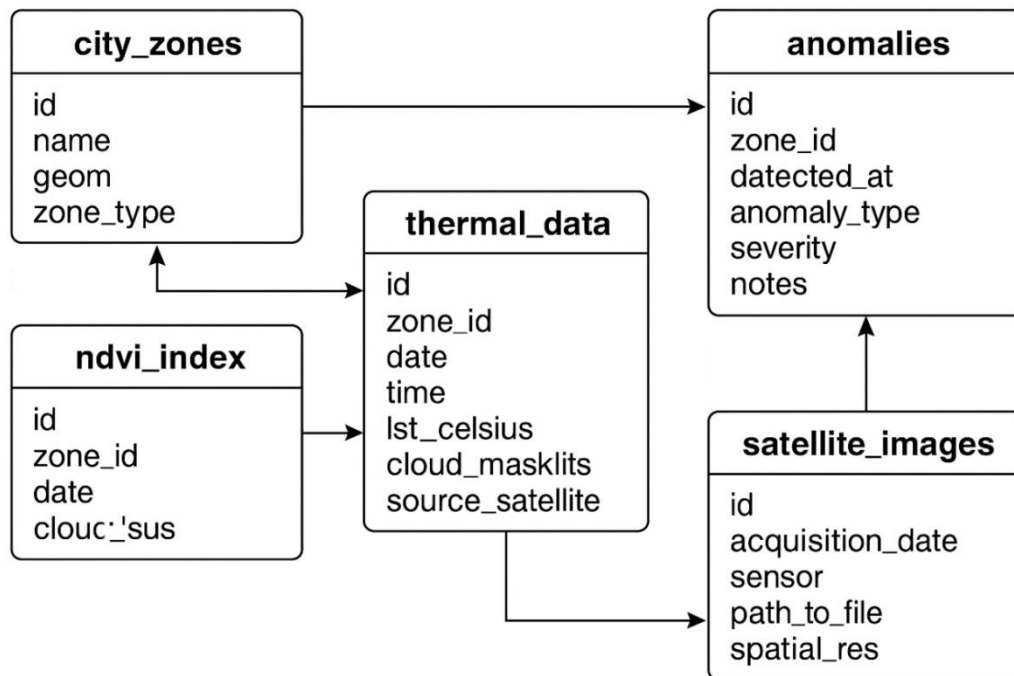


Рис. 2.10 – Діаграма Use Case інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст

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.

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 а бо 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.

Набір класів географічних об'єктів. Сукупність класів географічних об'єктів з однаковою просторовою прив'язкою. Класи географічних об'єктів можуть бути організовані у виді мереж чи просторових топологій.

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.

Геометричні мережі. Обумовлений користувачем набір класів географічних об'єктів, що утворюють частину нерозривної мережі, що складається з крайових елементів, переходів і поворотів.

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 водняні об'єкти, можуть використовувати спільно загальні границі полігонів. Будь-яка зміна, внесена в загальну границю, автоматично оновлює 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 в мережах.

Растрові дані. Бази геоданих можуть містити набори растрових даних, кожен растр представляє зображуваний простір у виді однакових за розмірами елементів чи пікселів. QGIS працює з растровими даними. Коли створюється бізнес-таблиця зі стовпцем растрового типу, QGIS розглядає цей стовпець як набір растрових даних. Растрові набори даних в 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. 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.

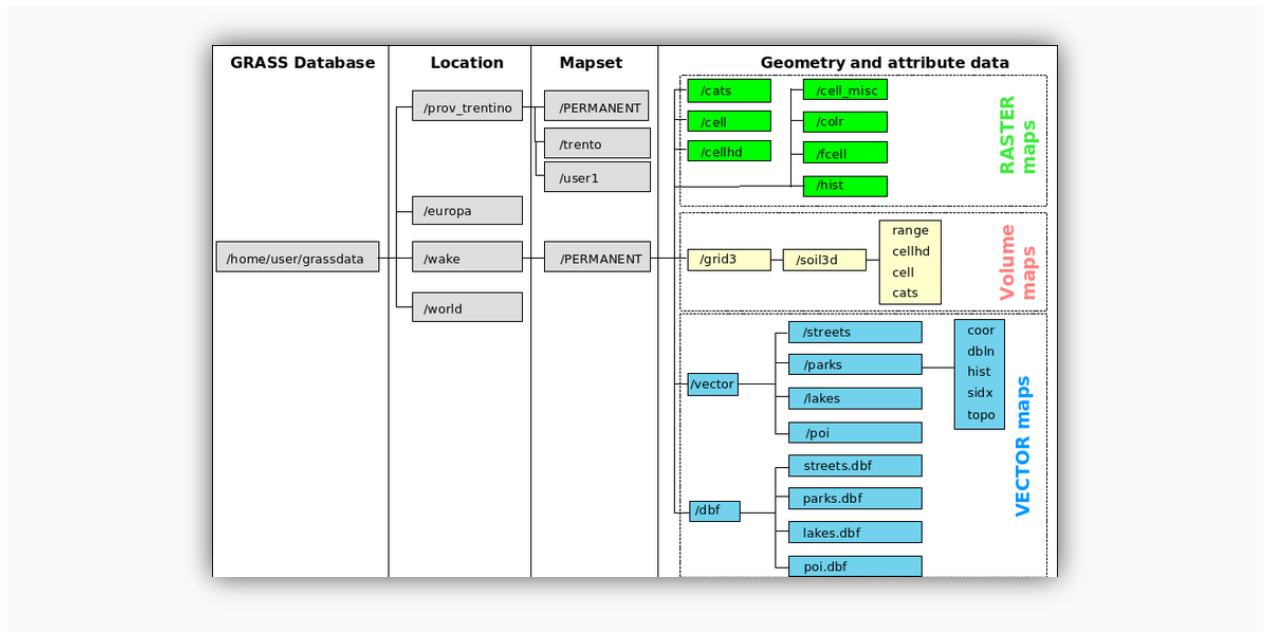


Рис. 2.11 – Структура бази растрових даних

2.3. Розробка алгоритмів виявлення та класифікації теплових аномалій

Методика розрахунку *NDVI* та *LST* —показників, які використовуються для аналізу теплових аномалій в містах. Основним індексом який використовується є *NDVI* — Normalized Difference Vegetation Index.

NDVI — це індекс вегетаційної активності, що розраховується на основі супутникових знімків у червоному (*RED*) та ближньому інфрачервоному (*NIR*) спектральних діапазонах.

де

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

NIR (Near Infrared) — канал ближнього ІЧ-діапазону (наприклад, Band 5 у Landsat 8);

RED — канал червоного спектра (наприклад, Band 4 у Landsat 8).

Інтерпретація значень індекса *NDVI* показано в таблиці 1.

Таблица 1

Значення NDVI	Стан покриву
< 0	Вода, хмари
0–0.2	Пісок, будівлі, без рослин
0.2–0.5	Розріджена або суха зелень
> 0.5	Густа, здорова рослинність

Алгоритм реалізації:

Отримати супутниковий знімок (наприклад, Landsat, Sentinel-2).

Обчислити значення RED і NIR каналів

Провести нормалізацію пікселів.

Застосувати формулу NDVI до кожного пікселя.

Побудувати карту NDVI з палітрою кольорів.

Методика розрахунку індикатора LST — Land Surface Temperature. Індикатор LST — температура земної поверхні, яку можна оцінити з теплових інфрачервоних каналів (TIR) супутника.

Основні етапи розрахунку:

1. Перетворення цифрових значень (DN) в радіанси:

$$L_{\lambda} = ML \times Q_{cal} + AL$$

де:

ML , AL — коефіцієнти калібрування (з метаданих супутника);

Q_{cal} — цифрове значення пікселя (DN).

Радіанс (Radiance) — це **фізична величина**, яка описує кількість електромагнітного випромінювання (світла, тепла), що надходить з **одиниці площі поверхні у певному напрямку**. У контексті супутникових знімків — це енергія, яка надходить до сенсора супутника від земної поверхні.

Супутникові знімки зберігаються у вигляді цифрових значень пікселів (DN — Digital Numbers), які:

- не є фізичними одиницями виміру;
- залежать від налаштувань сенсора;

- змінюються від 0 до 255 або 0–65535 (залежно від глибини зображення).

Щоб використовувати ці дані для об'єктивного аналізу температури або розрахунків NDVI/LST, DN потрібно перевести у реальні одиниці випромінювання — радіанси ($\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$).

$$L_{\lambda} = ML \times Q_{cal} + AL$$

де:

L_{λ} — радіанс (вимірюється у $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$);

ML — коефіцієнт масштабу (Radiance Mult.);

AL — адитивна поправка (Radiance Add.);

Q_{cal} — значення DN пікселя (цифрове значення).

Коефіцієнти беруться з метаданих супутникового знімка (наприклад, з .MTL файлу для Landsat 8).

2. Перехід до температури випромінювання (brightness temperature):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)}$$

де:

K_1, K_2 — константи супутника (наприклад, для Landsat 8: $K_1 = 774.89$, $K_2 = 1321.08$);

T_B — температура в Кельвінах.

3. Оцінка коефіцієнта емісивності земної поверхні (ϵ):

Можна взяти типові значення:

0.98 — для рослинності

0.93 — для міських поверхонь

4. Розрахунок LST (в $^{\circ}\text{C}$):

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot T_B}{\rho} \cdot \ln \epsilon \right)} - 273.15$$

де:

λ — довжина хвилі TIR -каналу (бл. 10.8 мкм),

$\rho = h \cdot c / \sigma \approx 1.438 \times 10^{-2}$ м·К (фізична константа).



Рис. 2.12 – Алгоритм обчислення значень індекса $NDVI$ та LST

2.4. Технологічна схема опрацювання супутникових знімків 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 голого 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 замовчуванням

Розрахунок індексу NDVI в програмному забезпеченні QGIS.

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.2.13). Тепер після невеликого теоретичного вступу можна переходити до практичної частини.

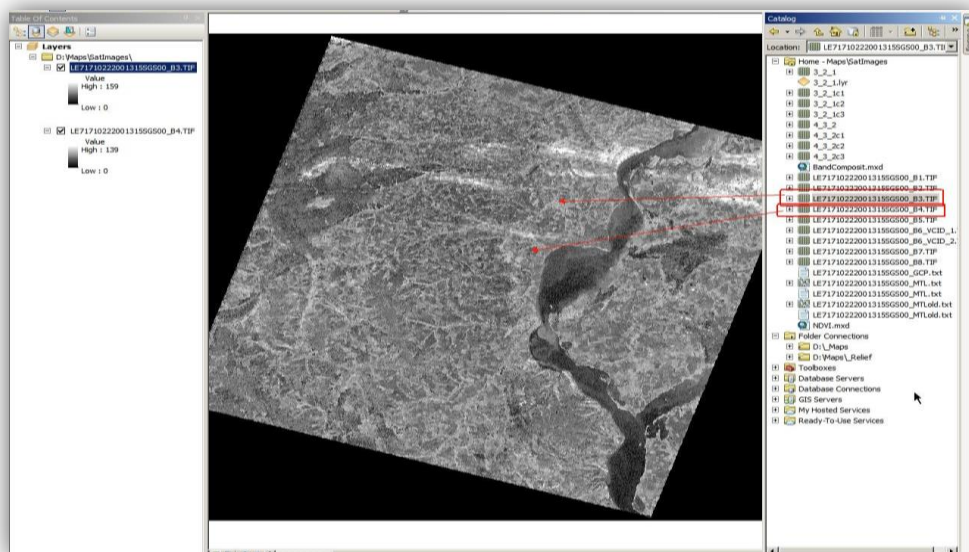


Рис. 2.13 – Вибір супутникових знімків

Як показано на картинці вище, просто беремо і витягуємо мишкою панелі Catalog у вікно подання карти знімки з суфіксами B3 (червоний канал) і B4 (ближній інфрачервоний 1 канал.) Далі в наборі інструментів Map Algebra шукаємо утиліту Raster Calculator:

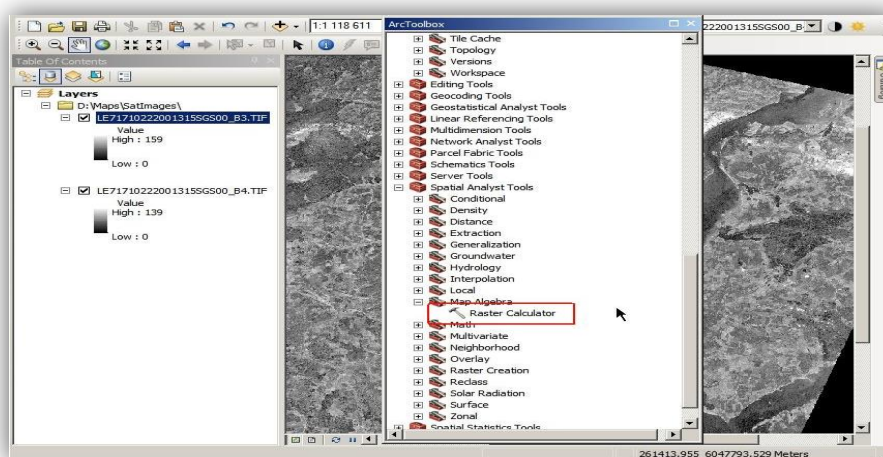


Рис. 2.14 –Вибір інструментаріїв з опрацювання супутникових знімків

У полі для складання формули обчислень пишемо вираження згідно з наведеною напочатку статті формулою для підрахунку індексу *NDVI* (рис.2.15) (обведено червоним):

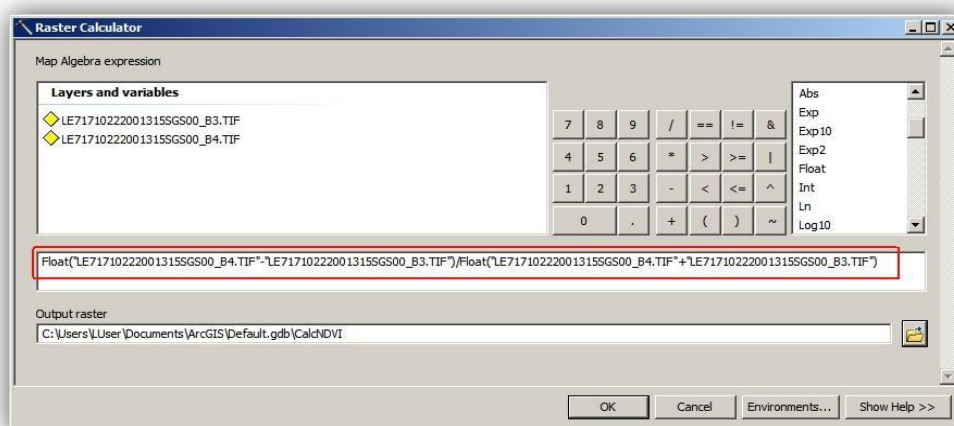


Рис. 2.15 – Набір відповідного виразу в растровому калькуляторі.

Спочатку синтезований (рис. 2.16) таким чином растр зі значенням розподілу індексу *NDVI* виглядає зовсім не виразно:

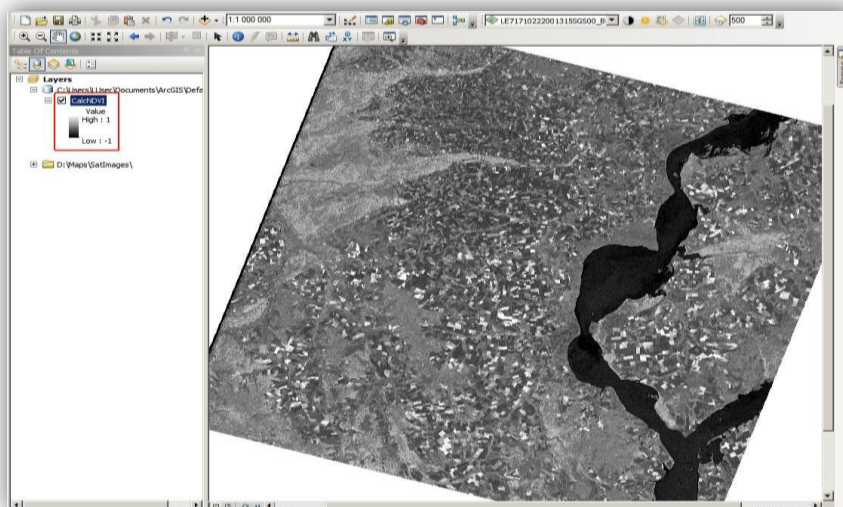


Рис. 2.16 – Синтезований знімок на основі застосування растрового калькулятора.

Щоб зробити картинку більш наочною, має сенс замінити ч/б панелі наприклад на червоно - зелену. Карта стала більш змістовною - зелений колір відповідає більш високому значенню *NDVI*.

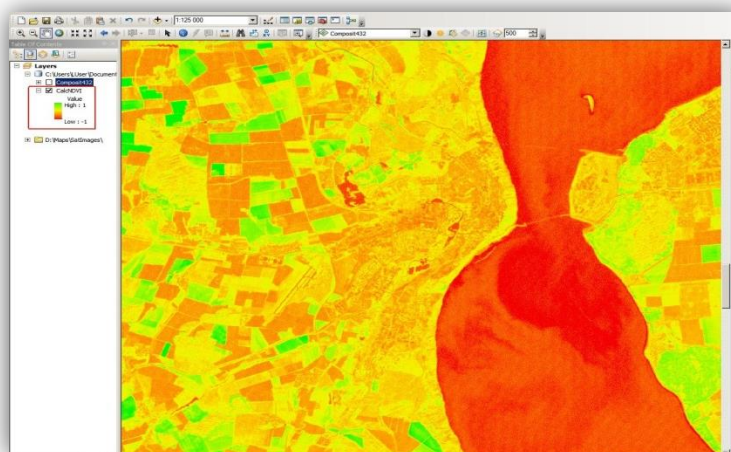


Рис. 2.17 – Результаті опрацювання супутникового знімку

В результаті опрацювання супутникового знімку отримано теплову аномалію даної території.

На рис. 2.18 зображено узагальнену технологічно-ресурсну модель, яка демонструє повний комплекс **вхідних ресурсів** та **вихідних результатів** при реалізації інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст на основі супутникових знімків Landsat 8.

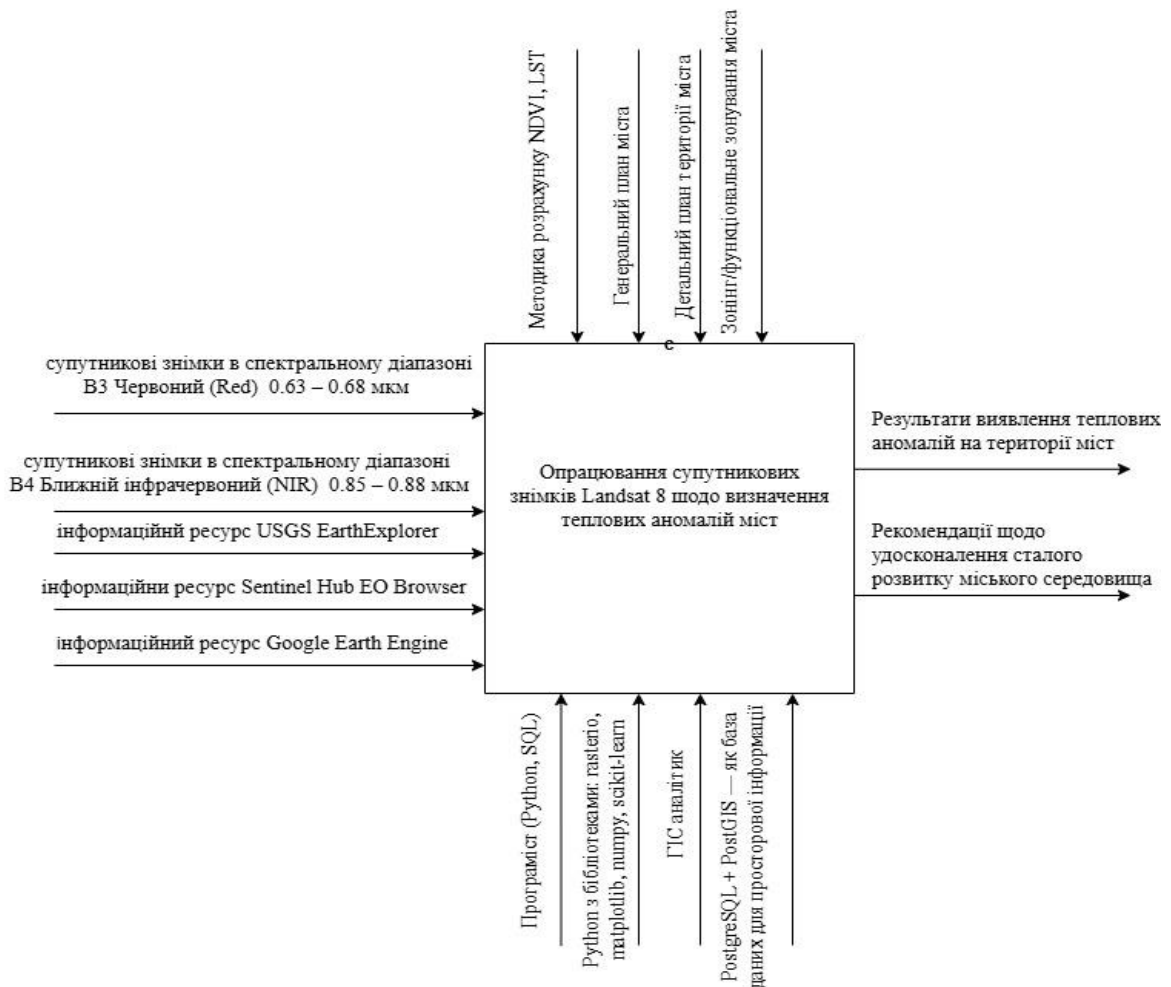


Рис. 2.18 – Інтегрована схема ресурсного та інформаційного забезпечення обробки супутникових знімків для визначення теплових аномалій міст

На завершення розробки елементів інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст представлено інтегровану схему, що ілюструє повний цикл обробки супутникових знімків Landsat 8 з метою виявлення теплових аномалій на території міських утворень. В межах цієї схеми поєднуються всі основні компоненти: вхідні дані, інформаційні ресурси, програмне забезпечення, нормативні документи, а також результати, що генеруються в результаті аналізу. Як вхідні дані використовуються спектральні канали

супутникових знімків у червоному (B3) та ближньому інфрачервоному (B4) діапазонах, що є базою для обчислення вегетаційного індексу NDVI та температури поверхні (LST). Дані завантажуються через ресурси USGS EarthExplorer, Sentinel Hub EO Browser та Google Earth Engine. В процесі обробки застосовуються програмні засоби, зокрема мова Python з бібліотеками rasterio, numpy, matplotlib, scikit-learn, а також просторові ГІС-інструменти (QGIS, PostGIS) та геобазы даних. Додатково залучаються містобудівні документи — генеральний план, детальні плани територій і функціональне зонування, які дозволяють зіставляти результати супутникового аналізу з реальним просторовим розподілом забудови.

В результаті формується просторове подання виявлених аномальних зон, які можуть бути проаналізовані та бути підґрунтям для підготовки практичних рекомендацій щодо сталого розвитку міського середовища — зокрема, щодо збільшення площ озеленення, зниження щільності забудови у перегрітих зонах або вдосконалення вентиляції міських кварталів. Схема відображає системний характер рішення завдань, поєднуючи в єдину структуру дані, методи, інструменти та отримані результати.

2.5. Висновки з другого розділу

В другому розділі було здійснено детальний проєктно-технологічний аналіз і розробку ключових елементів інформаційної технології для виявлення теплових аномалій у міському середовищі на основі супутникових знімків.

1. На основі системного підходу сформульовано функціональні вимоги до технології, розглянуто її архітектуру, а також інструменти реалізації — включаючи використання ГІС-платформ (QGIS), супутникових даних (Landsat 8) і алгоритмів аналізу індексів NDVI та LST. Особливу увагу приділено побудові бази просторових і теплових даних, організації

векторних і растрових шарів, їх просторовій прив'язці, атрибутивному наповненню та формуванню структури просторової бази даних.

2. Описано алгоритм розрахунку індексу NDVI, що дозволяє виявити стан рослинного покриву, а також методику розрахунку LST — температури поверхні, на основі якої визначаються аномальні перегріті ділянки. Було представлено технологічну схему обробки супутникових знімків у середовищі QGIS, а також продемонстровано результат створення тематичної карти теплової аномалії. У завершальній частині запропоновано інтегровану модель, яка поєднує всі ресурси, інструменти та дані в єдину систему для оперативного аналізу теплових процесів у місті.

В розділі підтверджується технічна та методологічна здійсненність побудови інформаційної технології виявлення теплових аномалій на основі супутникових знімків, що є основою для практичного впровадження в подальших етапах дослідницької роботи.

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ПРИКЛАДІ МІСТ УКРАЇНИ

3.1. Реалізація інформаційних технологій на основі застосування даних супутникового моніторингу

Штучно створене урбанізоване середовище кардинально змінює температурні характеристики міської поверхні у порівнянні з природним ландшафтом. Це явище, відоме як «міський тепловий острів» (УНІ), є предметом багатьох геоекологічних досліджень і розглядається як результат складної багатофакторної системи, де переплітаються природні, техногенні та соціально-економічні чинники [26].

Історично ефект УНІ вперше було задокументовано ще у 1810 році британським метеорологом Люком Ховардом, однак лише з появою технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема теплової супутникової зйомки, стало можливим вивчення цього явища у динаміці та на масштабному рівні. Перші дані такого моніторингу з'явилися у 1960-х роках (TIROS), але лише із запуском Landsat із сенсором TIRS теплове картографування отримало високу просторову роздільну здатність (~100 м) та систематичну доступність. В межах системного підходу це значно підвищило точність вхідних даних і дозволило формувати більш надійні моделі.

Згідно з принципами системного аналізу, міський тепловий острів слід розглядати як відкрите термодинамічне середовище, в якому є [16, 17, 18]:

-входи (сонячна радіація, викиди CO₂, будівельні матеріали, кількість зелених насаджень, антропогенна діяльність);

- процеси трансформації (зміна альбедо, поглинання тепла, інфрачервоне випромінювання, циркуляція повітря);

- виходи (зростання температури поверхні, локальні кліматичні зміни, підвищене енергоспоживання, екологічні ризики).

В системі існують зворотні зв'язки, наприклад: зростання температури спричиняє збільшення енергоспоживання на охолодження, що в свою чергу посилює теплові викиди та підвищує концентрацію парникових газів. Це спричиняє позитивний зворотний зв'язок, який призводить до посилення глобального потепління.

Особливо критичним є порушення радіаційного балансу міського середовища, на який впливають як природні (сонячна активність), так і антропогенні чинники (викиди, аерозолі, урбанізація). Найбільш потужним впливом є зростання концентрації CO_2 , яке знижує здатність біосфери до саморегуляції, що, згідно зі схемою зворотних зв'язків (рис.3.1.), веде до ланцюгових хімічних змін в атмосфері та гідросфері.

Крім того, антропогенні викиди парникових газів (CO_2 , CH_4) — це системоутворюючий чинник, який впливає на всі рівні екологічної системи. З точки зору сталого розвитку, дослідження вказують на необхідність досягнення економічного зростання без збільшення екологічного навантаження, що також є важливим принципом системної оптимізації.

Таким чином, феномен «теплового острова» потребує не лише моніторингу, а й комплексного системного моделювання, яке враховує вхідні дані з супутників, кліматичні фактори, соціально-економічні показники та можливі сценарії зниження негативного впливу через управлінські рішення.

Для дослідження «теплового острова» було відібрано знімки, зроблені в різні пори року (тепловий інфрачервоний канал 11, 2015 рік). Як вхідні дані використовувалися супутникові знімки з супутника Landsat із сенсорами OLI (Operational Land Imager) та TIRS (Thermal Infrared Sensor) з просторовою роздільною здатністю 100 м. Початковими даними цього дослідження є

супутникові знімки високої роздільної здатності. Ці знімки були отримані з супутника Landsat 8 у форматі GeoTIFF (рис.3.2).



Рисунок. 3.1 – Схема взаємодії та зворотних зв'язків в ланцюгових хімічних змінах в атмосфері та гідросфері.

Аналіз зображень було виконано з використанням програмного забезпечення Desktop QGIS. На основі значень теплових каналів (табл. 3.1) можна визначити радіолюмінесцентну температуру підстилаючої поверхні міської території [28, 29, 30]. Теоретично точність визначення температури

становить близько 0,5 °С; однак наявність серпанку в атмосфері знижує це значення на кілька градусів.

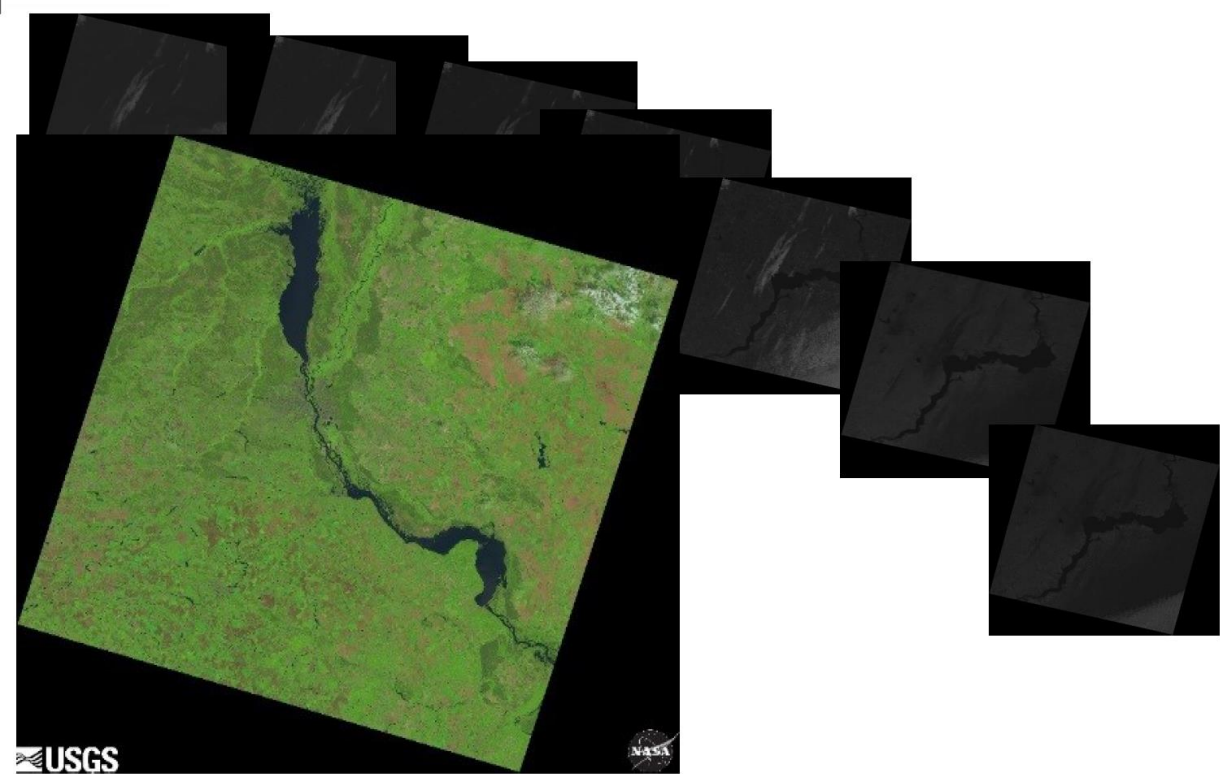


Рис. 3.2 – Супутникові знімки високої роздільної здатності, отримані з супутника Landsat у форматі GeoTIFF

Таблица 3.1.

Відповідність між діапазонами електромагнітного випромінювання та номерами каналів супутників Landsat

The range	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
RED	5	5	5	3	3	3	4
NIR	6	6	6	4	4	4	5
Thermal	—	—	8	6	6	61. 62	10. 11

Інтенсивність випромінювання R є вихідною величиною для визначення значення температури, що надходить до сенсора супутника та реєструється в межах теплового каналу. Інтенсивність випромінювання R визначається за формулою:

$$R = M_R \cdot Q + A_R,$$

де M_R , A_R — калібровочні коефіцієнти можна знайти у файлі мета даних з ім'ям «*_mtl.txt»,

Q — дискретне калібровочне значення пікселя.

Для Landsat 8 температура T визначається відповідно до формули:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{R} + 1\right)} - 273,15(^{\circ}\text{C}),$$

де значення констант K_1 та K_2 отримуються відповідно до кожного теплового каналу даної сцени з її файла метаданих (рис. 3.3).

```
GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.89
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.89
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.08
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.14
END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
```

Рис. 3.3 – Калібровочні константи для обчислення температури поверхні на урбанізованих територіях

Кластеризація обраних теплових знімків дозволила виявити структуру теплового поля міст України, визначити відповідність об'єктів до природних і антропогенних урбогеосистем. На основі даних неконтрольованої класифікації проведено картографування теплової

структури и тепловых аномалий місцевості. Виявлення теплових аномалій пов'язано з об'єктами підвищеної інтенсивності теплового випромінювання (промислові об'єкти).

3.2. Інформаційна технологія аналізу теплових аномалій промислових міст України

Приклад результатів визначення значень температури поверхні на урбанізованих територіях промислових міст України. По ланам теплового каналу показано на рис. 3.4 - 3.5.

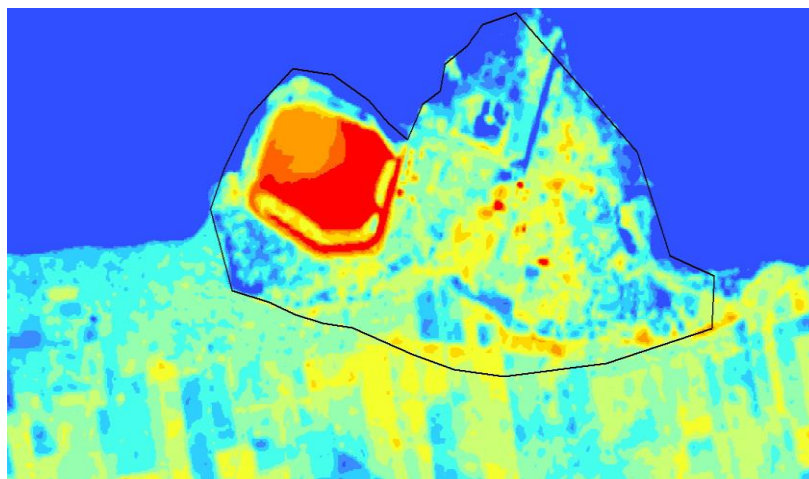


Рис. 3.4 – Теплова структура промислового міста України: 1- теплове забруднення водоймища скидами промислових вод, 2- локалізація зон теплового забруднення, джерелом якого є промислові об'єкти

Таким чином, можна зробити наступні висновки:

- по-перше, створені картографічні моделі на основі дешифрування теплових даних космічної зйомки, дозволяють виділити об'єкти, що надають максимально великий вплив на загальну інтенсивність теплового випромінювання на території міст;

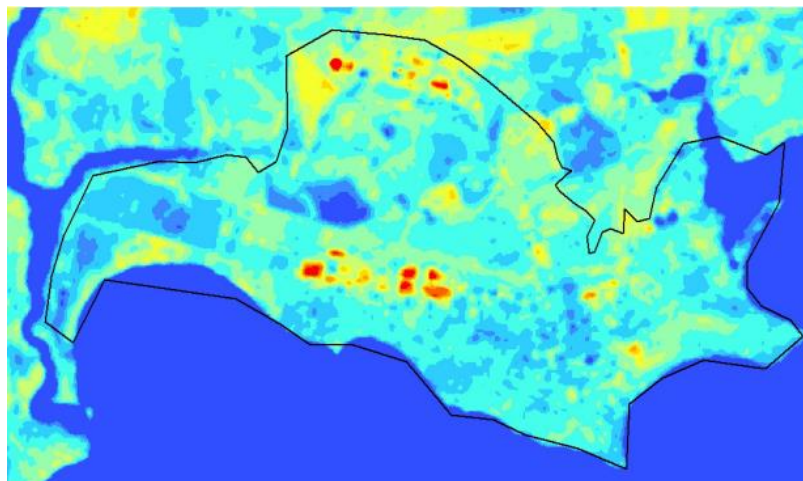


Рис. 3.5 – Теплова структура виробничого міста України: 1- теплове забруднення від заводу сталевих труб, 2- забруднення, джерелом якого є завод феросплавів

- по-друге, присутність на картографічних моделях теплових аномалій свідчать про наявність в міському середовищі зон екологічної напруженості, які впливають на природно-техногенну структуру міста та комфортне мешкання населення. Великі промислові підприємства є об'єктами, що підвищують ступінь інтенсивності теплового поля в техногеосистемі;

- по-третє, в контексті територіального планування та проектування, визначення теплових аномалій техногеосистем можна використовувати як один з елементів в розробці та прогнозуванні нового стійкого, низьковуглеродного напрямку розвитку міського середовища з використанням поновлюваних енергетичних ресурсів [28, 29 32].

3.3. Оцінка ефективності та формулювання рекомендацій щодо зниження теплового навантаження

Прогнози, опубліковані останнім часом Інститутом Землі і школою громадського здоров'я Mailman стверджують, що до 2020 року кількість

смертей пов'язаних з тепловим ефектом буде вище, ніж ті, які пов'язані з холодом. Він показав середнє збільшення на 20% смерті через спеку, в порівнянні з 12%-ним зниженням для тих, які стосуються холоду. Цей передбачуваний розрив продовжує збільшуватися в 2050 і в 2080 році, так як глобальне потепління викликає більш спекотне літо і м'які зими. Аналогічні результати були отримані в минулому році Агентством з охорони здоров'я (НРА) у Великобританії, з неймовірним зростанням 540% смертності пов'язаної зі спекою до 2080-го року [28, 29,30].

Понад 80% з нас живуть в забудованій середовищі. Повільно, але неухильно ми видалили себе з природи, причому настільки, втрачену плакучу вербу, готові прийняти за чужорідний вид. Швидка урбанізація призводить до того, що ми, дивлячись на екрани моніторів, найближчим часом почнемо себе переконувати, що це наше природне середовище. Не можна уявити, що всі залишають міста і відправляються до дерев найближчим часом. Можемо зробити, щоб міста стали більш комфортними є два основних напрямки:

По-перше, ми повинні зменшити автомобільний трафік у наших містах; вимагаючи від місцевих і національних органів влади, покращення громадського транспорту і збільшення велосипедних маршрутів.

Перепад температур між міськими районами і оточуючими приміськими або сільськими районами може бути так само як. Майже 40 відсотків того збільшення відбуваються із-за поширеності темних дахів з залишком, що прибувають з темного тротуару і зменшується присутності рослинності.

Тепловому острівній ефекту можна протидіяти трохи за допомогою білих або рефлексивних матеріалів, щоб побудувати будівлі, даху, тротуари та дороги, таким чином збільшуючи повне альbedo міста. Щодо виправлення інших джерел проблеми, замінюючи темну покрівлю вимагає найменшої кількості суми інвестицій для самого безпосереднього повернення. Прохолодний дах, зроблений з рефлексивного матеріалу, такого як вініл,

який відображає принаймні 75% променів сонця. Другий варіант полягає в тому, щоб збільшити кількість добре политої рослинності. Ці два варіанти можуть бути об'єднані з впровадженням зелених дахів. Зелені дахи - чудові ізолятори протягом місяців теплої погоди, і заводи охолоджують навколишнє середовище.

Зелені дахи - інший метод зменшення міського теплового острівного ефекту. Зелений дах - практика наявності рослинності на даху; як наявність дерев або саду.

Установка дерев навколо міста може бути іншим способом збільшити альбедо і зменшити міський тепловий острівний ефект. Дерев поглинають вуглекислий газ і забезпечують відтінок. Рекомендується посадити листяні дерева, тому що вони можуть надати багато переваг, таких як більше відтінку влітку [16].

Міські теплові острови збільшують попит на споживання енергії протягом літа, коли температури підвищуються. В результаті збільшеного споживання енергії є збільшення забруднення повітря та викидів парникових газів. Ця політика зосереджується на зниженні викидів парникових газів, який сприяє зниженню теплового острівного ефекту.

Дерев і сади допомагають психічному здоров'ю; великий відсоток людей, які живуть в міських районах, мають доступ до парків і садів в своїх областях, які є, мабуть, єдиними зв'язками, які вони мають з природою. Дослідження показує, що наявність контакту з природою допомагає сприяти нашому здоров'ю і добробуту.

3.4. Висновки з третього розділу

В третьому розділі було реалізовано практичну частину інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст України на основі супутникових даних. Проведене дослідження дозволило підтвердити ефективність

системного підходу до аналізу явища «міського теплового острова», яке є результатом складної взаємодії природних і антропогенних чинників.

Було доведено, що супутникові знімки високої роздільної здатності (зокрема, з сенсорів OLI та TIRS супутника Landsat 8) можуть бути успішно використані для обчислення температури поверхні міських територій. Аналіз даних, оброблених у QGIS, дозволив виявити теплові аномалії, локалізувати їх в межах техногеосистем і класифікувати відповідно до джерел теплового навантаження, таких як промислові зони, транспортні вузли або щільна забудова.

Інформаційні моделі, створені в результаті кластеризації, демонструють наявність стабільних зон теплового забруднення в урбанізованому середовищі. Ці зони мають прямий вплив на мікроклімат, рівень енергоспоживання, а також на комфортне існування мешканців. Було виявлено, що великі промислові підприємства значно підвищують інтенсивність теплового випромінювання на міській території.

В підрозділі 3.3 проаналізовано вплив теплового навантаження на якість життя населення, а також наведено практичні рекомендації щодо його зниження. До ефективних засобів протидії тепловому острову віднесено: використання світловідбивних покрівельних матеріалів, запровадження зелених дахів, озеленення міського середовища, зменшення автомобільного трафіку та розвиток громадського транспорту.

Таким чином, результати апробації розробленої інформаційної технології підтверджують її придатність для системного аналізу урбаністичних теплових ефектів, а також демонструють її потенціал для використання у просторовому плануванні, екологічному моделюванні та розробці заходів зі сталого розвитку міст.

ВИСНОВКИ

В процесі підготовки кваліфікаційної роботи були виконані наступні завдання:

1. В першому розділі проведено всебічний аналіз проблеми теплових аномалій міст, як складного системного явища, що формується під впливом низки природних і антропогенних факторів. Системний підхід дозволив представити міське середовище як сукупність взаємопов'язаних підсистем, які впливають на просторово-часовий розподіл температури. Зроблено:

- описано природу явища «тепловий острів міста», його історичне відкриття, добову та сезонну динаміку, наслідки для якості життя населення та екологічної ситуації. Продемонстровано на прикладі м. Балтимор реальне існування такого ефекту.

- розглянуто природні (альbedo, випаровування, рельєф) і антропогенні (щільність забудови, теплові викиди, тип вулиць) чинники. Запропоновано класифікацію причин виникнення аномалій за допомогою блок-схем і причинно-наслідкової діаграми Ішікави.

- розкрито роль теплових аномалій у глобальних кліматичних змінах — зростанні температури, парниковому ефекті, підвищенні рівня моря, загрозі для біорізноманіття, сільського господарства, здоров'я населення.

- визначено ключові сучасні методи дослідження аномалій: супутниковий моніторинг, обчислення NDVI, інфрачервоні знімки, температурне картографування, ГІС-аналіз, дистанційне зондування Землі. Виділено суб'єкти взаємодії: екологи, науковці, міська влада.

- зроблено узагальнення, що застосування інформаційних технологій у поєднанні з системним аналізом є ефективним інструментом для виявлення та управління тепловими аномаліями в урбанізованих середовищах. Це створює підґрунтя для подальшої розробки прикладної ІТ-системи в межах дипломної роботи.

2. В другому розділі було здійснено детальний проєктно-технологічний аналіз і розробку ключових елементів інформаційної технології для виявлення теплових аномалій у міському середовищі на основі супутникових знімків.

На основі системного підходу сформульовано функціональні вимоги до технології, розглянуто її архітектуру, а також інструменти реалізації — включаючи використання ГІС-платформ (QGIS), супутникових даних (Landsat 8) і алгоритмів аналізу індексів NDVI та LST. Особливу увагу приділено побудові бази просторових і теплових даних, організації векторних і растрових шарів, їх просторовій прив'язці, атрибутивному наповненню та формуванню структури просторової бази даних.

В розділі підтверджується технічна та методологічна здійсненність побудови інформаційної технології виявлення теплових аномалій на основі супутникових знімків, що є основою для практичного впровадження в подальших етапах дипломної роботи.

3. В третьому розділі було реалізовано практичну частину інформаційної технології аналізу теплових аномалій міст України на основі супутникових даних. Інформаційні моделі, створені в результаті кластеризації, демонструють наявність стабільних зон теплового забруднення в урбанізованому середовищі. Ці зони мають прямий вплив на мікроклімат, рівень енергоспоживання, а також на комфортне існування мешканців. Було виявлено, що великі промислові підприємства значно підвищують інтенсивність теплового випромінювання на міській території.

Таким чином, результати апробації розробленої інформаційної технології підтверджують її придатність для системного аналізу урбаністичних теплових ефектів, а також демонструють її потенціал для використання у просторовому плануванні, екологічному моделюванні та розробці заходів зі сталого розвитку міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. BALDINA E. A., GRISHCHENKO M. Y. 2014. Method of interpretation of multi-temporal space imagery in thermal infrared band. Moscow University Bulletin. Series 5. *Geography*. 2014, 3, 35-42.

2. GORNIY V. I. 2004. Space measurement methods for the thermal infrared band for monitoring potentially dangerous phenomena and objects. In *Modern problems of Earth remote sensing from Space. Physical basics, methods and monitoring technologies of the environment, potentially dangerous phenomena and objects*, 10–12 November 2003, Poligrafservis, 2003, 10–16.

3. DUBROVSKAYA S. A., RAHOV G. V. Thermal structure and anomalies of the city of Magnitogorsk. Problemy ecology scientific-practical conference. 2015, **10**(185), 287–302.

4. TRONIN A. A., SHILIN T. V. Monitoring of plumes of municipal wastewater treatment plants aerospace thermal photography. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2008, **II** (5), 586-594.

5. The Multispectral Scanner System, 2016 [online]. NASA. GOV. [cit. 19.3.2017]. Available from: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3227>

6. The Thematic Mapper // NASA.GOV: сервер Національного управління США по повітряплаванню та дослідженню космічного простору.
URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3229>.

7. The Enhanced Thematic Mapper Plus // NASA.GOV: Національного управління США по повітряплаванню та дослідженню космічного простору.
URL: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3225>.

8. Landsat 8 Science Data Users Handbook [Електронний ресурс] // NASA.GOV: сервер Національного управління США по повітряплаванню та дослідженню космічного простору.
[URL:http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf](http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf)

9. Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.146389](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389)

10. Weng, Q. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. DOI: [10.1016/j.rse.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005)

11. Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. DOI: 10.1002/joc.859
12. Stewart, I. D. (2006). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 26(1), 1–26. DOI: 10.1002/joc.2141
13. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335–344. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007
14. Weng, Q., Fu, P., & Gao, F. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 145, 55–67. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.003
15. Zheng, Q., Weng, Q., & Wang, K. (2021). Characterizing urban land changes of 30 global megacities using nighttime light time series stacks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 173, 10–23. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.01.002
16. Firozjaei, M. K., Weng, Q., Zhao, C., Kiavarz, M., & Lu, L. (2020). Surface anthropogenic heat islands in six megacities: An assessment based on a triple-source surface energy balance model. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111751. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111751
17. Xie, Y., Weng, Q., & Fu, P. (2019). Temporal variations of artificial nighttime lights and their implications for urbanization in the conterminous United States, 2013–2017. *Remote Sensing of Environment*, 225, 160–174. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.008
18. Weng, Q., & Lu, D. (2009). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117(2), 34–49. DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.030
19. Марінін І. Л., Єнґаличева О. Р. Основні характеристики і просторове розподілення острова тепла в м. Одеса // *Науковий вісник*

Одеського державного екологічного університету. – 2017. – № 1. – С. 35–42.
– Режим доступу: <https://bulletin.odeku.edu.ua/...> (дата звернення: 10.05.2025).

20. Шишкін Є. А. Урбоекологія та міська кліматологія: конспект лекцій. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 96 с.
<https://eprints.kname.edu.ua/...>

21. Роговий А. С. Числове моделювання теплового острова у міському середовищі (м. Харків) // *Автомобільний транспорт*. – 2019. – Вип. 44. – С. 87–94. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/...>

22. Зацерковний В. І., Тішаєв І. С. Аналіз підходів щодо моніторингу «островів тепла» // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. – 2023. – № 79. – С. 86–92.
<https://geology.bulletin.knu.ua/article/view/1422>

23. Каштан В. Ю., Сергієєва К. Л., Коробко О. В., Іванов Д. В. Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках // *Системні технології*. – 2023. – № 3(146). – С. 66–74.
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1264>

24. Уль А. В., Мельник О. В., Мельник Ю. А., Вакулюк Л. А., Резь Р. А. Дистанційний моніторинг теплового режиму в містах: теоретичні основи // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. – 2023. – № 10(20). – С. 142–149.
<https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/article/view/1266>

25. Шевченко О. Г., Сніжко С. І. Міський острів тепла: особливості формування та вплив на мікроклімат міста // *Український гідрометеорологічний журнал*. – 2011. – № 11. – С. 67–73. – Режим доступу: <https://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2011/05/11.pdf> (дата звернення: 10.05.2025).

26. Богушенко А. О., Хоменко І. А. Кліматична (не)справедливість: вплив зміни клімату на вразливі групи населення в містах України // *Аналітичний звіт*. – Київ: Фонд ім. Г. Бьоля, 2020. – 56 с.
<https://ua.boell.org/sites/default/files/2021>

27. Патракеєв І.М. Визначення теплових аномалій техногеосистем за результатами дешифрування мультиспектральних зображень. Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Геоінформаційні технології у територіальному управлінні», 15–16 вересня 2016 р., м. Одеса. – Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2016. – С. 107–112. https://www.oridu.odessa.ua/9/buk/new_01_11_16_gein.pdf

28. Патракеєв І., Зіборов В., Міхно О. Інтелектуальна технологія оцінювання якості міського середовища // *Geographia Technica*. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 147–160. – DOI: 10.21163/GT_2020.152.15.

29. Карпінський Ю., Лященко А., Патракеєв І., Зіборов В. Принцип багатомасштабності в геоінформаційному моніторингу міського середовища // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Т. 1150. – С. 012006. – DOI: 10.1088/1755-1315/1150/1/012006.

30. Patrakeyev, Igor & Ziborov, Victor & Lazorenko, Nadiia. (2017). Determination of Anthropogenic Changes in Urbanized Territories Using GIS Technology. *GeoScience Engineering*. 63.

31. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – Vol. 89, No. 4. – P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.

32. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – Vol. 86, No. 3. – P. 370–384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8