

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 004.942:551.524:528.8:631.147:911.52

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва ННІ)

\_\_\_\_\_ В.В. Каплун  
(підпис) (ПІБ)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

В.о. завідувача кафедри автоматики  
та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.1667"С".2024.09.26.013.ПЗ**

на тему **«РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ОСТРОВІВ ТЕПЛА  
ДЛЯ ПОТРЕБ УРБАНІЗОВАНОГО ФЕРМЕРСТВА»**

**Спеціальність:**

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
(шифр і назва)

**Освітньо-наукова програма:**

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(назва)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_

(підпис)

В.В. Івашук, д.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

\_\_\_\_\_

(підпис)

С.С. Омельченко  
(П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

О.О. Опришко, д.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2025**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка  
О.О. Опришко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ**  
**СТУДЕНТУ**  
(бакалаврської, дипломної)

**Омельченку Станіславу Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

**Спеціальність:** 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

**Освітньо-наукова програма:** Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської роботи **«РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ОСТРОВІВ ТЕПЛА ДЛЯ ПОТРЕБ УРБАНІЗОВАНОГО ФЕРМЕРСТВА»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 року №1667«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2025 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Теоретико-методологічні основи дослідження острова тепла.
2. Сучасні технології урбанізованого фермерства.
3. Поширення ефекту острова тепла у світі та в Україні.
4. Теоретичні основи дистанційного моніторингу теплового режиму в містах.
5. Дослідження ефекту острова тепла за даними дистанційного зондування на прикладі міста Київ.
6. Дослідження впливу зелених зон Києва на зменшення інтенсивності прояву ефекту острова тепла.

**Дата видачі завдання** «27» вересня 2024 року

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_

(Підпис)

Опришко О.О.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_

(Підпис)

Омельченко С.С.

(Прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень і скорочень .....	4
Вступ .....	5
РОЗДІЛ 1. Теоретико-методологічні основи дослідження острова тепла .....	8
1.1. Характеристика феномену острова тепла .....	8
1.2. Методологічні основи дослідження острова тепла .....	10
1.3. Аерокосмічні дослідження острова тепла .....	13
РОЗДІЛ 2. Сучасні технології урбанізованого фермерства .....	17
2.1. Передумови виникнення урбанізованого фермерства .....	17
2.2. Сучасні технології інтенсивного рослинництва і урбанізованого фермерства .....	21
РОЗДІЛ 3. Поширення ефекту острова тепла у світі та в Україні .....	25
3.1. Поширення ефекту острова тепла у світі .....	25
3.2. Формування ефекту острова тепла у найбільших містах України	28
РОЗДІЛ 4. Теоретичні основи дистанційного моніторингу теплового режиму в містах .....	34
4.1. Найпоширеніші методи визначення LST та LSE .....	34
4.2. Розробка методів і засобів для визначення стабільних островів теплової енергії .....	44
РОЗДІЛ 5. Дослідження ефекту острова тепла за даними дистанцій- ного зондування на прикладі міста Київ .....	59
5.1. Аналіз просторово-часових рядів даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні в період з 1992 року по 2018 рік для міста Києва	59
5.2. Характеристика території міста Києва за ступенем теплового навантаження .....	70
РОЗДІЛ 6. Дослідження впливу зелених зон Києва на зменшення інтенсивності прояву ефекту острова тепла .....	76
6.1. Дослідження впливу зелених зон на зміну температури повітря в районах м. Києва .....	76
6.2. Аналіз впливу зелених зон на зміну температури повітря .....	81
6.3. Аналіз перепаду температури повітря в межах острова тепла .....	88
Висновки .....	93
Література .....	95

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ**

- БПЛА - безпілотний літальний апарат
- ГІС - геоінформаційна система
- СОТ - Світова організація торгівлі
- ОТ - острів тепла
- САК - система автоматичного керування
- FAO - Food and Agriculture Organization (Продовольча та сільсько-господарська організація ООН)
- IGBP - Міжнародна програма з геосфери та біосфери
- LSE - Land Surface Emissivity (Випромінювання земної поверхні)
- LST - Land Surface Temperature (Температура поверхні землі)
- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Нормалізований відносний вегетаційний індекс (індекс рослинності))
- TIR - Thermal Infrared (Термальне інфрачервоне зондування)
- UHI - Urban Heat Islands (Міські острови тепла)

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Заміни природного ландшафту штучним середовищем призвели до зміни екосистеми та фізичних властивостей поверхні, таких як теплоакумулююча здатність та властивості теплопровідності [1]. Це ускладнює передачу тепла між міськими районами та довкіллям.

Одним з аспектів формування якості довкілля у великому місті наразі є прояви ефекту **острова тепла** (ОТ) – локального метеорологічного феномену різниці температур між центром міста та його периферією, який являє собою одну з найбільш значних змін клімату міста, викликаних людиною.

Зображення температури поверхні землі (*Land Surface Temperature, LST*) з різних супутників широко використовуються для дослідження міського теплового середовища. Карти LST забезпечують повне просторове охоплення, що відрізняє їх від точкових даних про температуру повітря, отриманих з метеорологічних станцій. Зважаючи на це, в останні десятиліття зростає науковий інтерес до вивчення проблеми так званих міських островів тепла (*Urban Heat Islands, UHI*). "**Міські острови тепла**" виникають, коли міста замінюють природний покрив землі щільними концентраціями тротуарів, будівель та інших поверхонь, які поглинають і утримують тепло. Цей ефект призводить до збільшення витрат на споживання електроенергії (наприклад, на кондиціонування повітря), підвищується рівень забруднення повітря, а також захворюваність та смертність, пов'язані зі спекою. Так, наприклад, темні поверхні (низьке альbedo) поглинають більше енергії від сонячного світла, ніж поверхні, що відбивають світло (високе альbedo). Поглинена енергія з часом виділяється у вигляді теплової енергії, яку людина може відчути. Різницю температур між поверхнями з високим і низьким альbedo можна побачити за допомогою інфрачервоної камери.

З іншого боку, у сучасному світі стрімко розвивається так зване "міське та приміське сільське господарство", або "*урбанізоване сільське господарство*".

За даними FAO, цей термін можна визначити як практичну діяльність, що дозволяє отримувати продукти харчування та іншу сільськогосподарську продукцію на території міст і прилеглих районів. У такому виробництві беруть участь, насамперед, саме міські та приміські суб'єкти, у тому числі міські спільноти. *Урбанізоване сільське господарство* включає в себе: місця, політику, установи, системи, екологічні умови та методи господарювання, значною мірою передбачає використання та відновлення місцевих ресурсів для задоволення мінливих потреб місцевого населення, переслідуючи безліч цілей і виконуючи різні функції

В Україні, станом на перші десятиріччя XXI сторіччя, цей тренд мало розвинений, хоча його перспективи та потенціал достатньо великі.

Мегаполіси, які поки що є нетрадиційними для практик рослинництва, мають певні особливості, що можуть бути вдало використані в аграрному виробництві. Характерною відмінністю великих міст є вищі, порівняно з навколишніми селами й незаселеними територіями, температури протягом року. Розподіл температур є нерівномірним, спостерігаються осередки ОТ, що влітку негативно впливають на якість життя населення. За державного регулювання для компенсації негативного впливу ОТ в плани міст закладали зелені зони парків та скверів. Характерна для мегаполісів України в XXI сторіччі комерційна забудова передбачає ущільнення й мінімізацію "зелених зон", і питання балансування населення й необхідних для здоров'я рослин стало вкрай актуальним.

Отже, пошук і аналіз просторового розподілу міських островів тепла є важливим завданням у сучасних дослідженнях навколишнього середовища. Це дозволить використовувати ефективні методи боротьби і запобігання негативному впливу теплових аномалій з одного боку, і розвивати урбанізоване сільське господарство з іншого.

На основі сказаного вище, головною *метою даної кваліфікаційної магістерської* роботи є аналіз закономірностей просторово часових змін проявів ефекту острова тепла в межах м. Києва, заснований на виявленні вихідного довгохвильового випромінювання міста, зареєстрованого тепловою космічною зйомкою, та дослідження впливу зелених зон міста на зменшення інтенсивності ОТ.

Для досягнення мети були поставлені наступні *завдання*:

- висвітлити теоретико-методологічні основи дослідження "острова тепла";
- дослідити поширення ефекту острова тепла у світі;
- встановити закономірності поширення та дослідити особливості формування феномену острова тепла на території міст України;
- побудувати та проаналізувати просторово-часові ряди даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні в період з 1992 року по 2018 рік для міста Києва;
- охарактеризувати території міста Києва за ступенем теплового навантаження;
- визначити вплив зелених зон на зміну температури повітря в районах м. Києва;
- виявити закономірності перепаду температур в межах острова тепла.

*Об'єктом дослідження* виступає ефект "острова тепла", а *предметом* – причини виникнення "острова тепла" та вплив зелених зон на зменшення інтенсивності прояву ОТ та на можливості розвитку урбанізованого фермерства.

Основними *методами дослідження* є: описовий, історичний, аерокосмічний, картографічний, аналіз і синтез, географічний аналіз, а також методи порівняння і узагальнення.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСТРОВА ТЕПЛА

### 1.1. Характеристика феномену острова тепла

У наш час близько 55% населення світу проживають у містах [2]. За підрахунками ООН цей показник зросте майже до 66% до 2050 року [3]. Швидке зростання міст призводять до великої кількості проблем, однією з яких є ефект *міського острова тепла (Urban Heat Island)*. **Острів тепла (ОТ)** – це локальний метеорологічний феномен різниці температур між центром міста та його периферією, який являє собою одну з найбільш значних змін клімату міста, викликаних людиною [4]. Даний феномен був відкритий англійським вченим Люком Говардом ще на початку ХІХ століття, але систематичні його дослідження почалися лише у другій половині ХХ століття [5]. Феномен ОТ утворюється при сукупній взаємодії декількох факторів, що викликають приріст рівня теплової радіації, зміну показників вологості, інтенсивності циркуляції повітря та збільшення теплоємності середовища міста, які в підсумку призводять до утворення такої температурної аномалії [6]. До цих факторів відносяться:

1. *Щільність забудови та висота будівель.* Чим більша впорядкованість і щільність забудови, тим вище температура в місті в порівнянні з навколишньою, приміською місцевістю. Результати досліджень [6] показали, що міста з упорядкованою сіткоподібною структурою утримують більше тепла, ніж ті, в яких будинки розташовані більш хаотично або на значній відстані. Це пов'язано з тим, що будинки, які розташовані навпроти, виділяють та водночас поглинають тепло один одного, створюючи замкнену схему теплопередачі, а також заважають природній циркуляції

повітря. Разом ці фактори провокують затримку тепла, яке за нормальних умов повинно розсіюватися.

*2. Переважання штучних матеріалів у містобудуванні.* В містах домінуючими матеріалами є асфальт та бетон, що мають велику теплоємність та теплопровідність, в наслідок чого поглинають більше короткохвильової сонячної радіації, тому можуть сильно нагріватися та довгий час зберігати тепло [7]. Крім того, перекриття ґрунтів бетонним та асфальтовим покриттям призводить до порушення природного випаровування і вологообміну. В наслідок чого, сонячна енергія не витрачається на випаровування роси, процес гутації у рослин тощо, а поглинається будинками та асфальтом [8].

*3. Незначний відсоток зелених насаджень в містах.* Деревя є головними поглиначами вуглекислого газу, який у великих концентраціях пригнічує активність людини та є парниковим газом (затримує тепло в повітрі). Крім того, випаровуючи воду, рослини охолоджують навколишній простір, тому над парковими зонами повітря прогрівається помітно менше, ніж над штучно забудованими територіями [9].

*4. Забруднення повітряного басейну.* Висока концентрація аерозолів в атмосфері над великими транспортними розв'язками, вулицями з інтенсивним рухом та промисловими об'єктами призводить до зниження ефективного випромінювання та нічного вихолодження міста [8]. В сукупності усі вищеперераховані фактори призводять до погіршення екологічної ситуації та формування острова тепла. Зазвичай, температурна різниця між центром міста й передмістями становить 1–5°C і залежить від розмірів та інфраструктури міста. Ввечері, різниця температур є максимальною і може сягати 10-12°C [8]. Це пов'язано з тим, що у денний час асфальт, поверхневі води та забудована територія нагріваються, а вночі віддають тепло у навколишнє середовище [10].

Наслідками прояву феномену ОТ є:

- зниження термічного комфорту, тепловий стрес;
- погіршення якості води;
- загроза здоров'ю міських жителів (виникає потенційний ризик для розвитку серйозних серцево-судинних та респіраторних захворювань);
- зниження працездатності (згідно з дослідженням Р. Х'юстона [11], тепловий стрес може знизити продуктивність праці в містах в середньому на 25% до 2030 року, обмежуючи здатність людини до активності);
- погіршення стану інфраструктури міста (руйнування дорожнього покриття, корозія металів, погіршення якості пам'яток культури);
- приріст витрат енергії системами клімат-контролю та збільшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу (використання кондиціонеру призводить до викидів гідрофторвуглеців, які утримують в тисячі разів більше тепла в атмосфері, ніж вуглекислий газ) [12].

Проблема формування ОТ у містах є прогресуючою. Цей феномен не тільки ускладнює проживання людей у містах і шкодить здоров'ю жителів, а також й призводить до погіршення якості інфраструктури. В цьому випадку вкрай важливим є підбір правильної методології дослідження даного феномену, що допоможе локалізувати проблему та виявити територіальні особливості його розвитку.

## **1.2. Методологічні основи дослідження острова тепла**

Ефект утворення міського острова тепла вперше був описаний у 1818 році британським метеорологом, фармацевтом та хіміком Люком Говардом у його праці «Клімат Лондону» [13]. Вплив міста на власний клімат був виявлений вченим, коли він порівнював температурні показники околиць Лондона з тими, які були зроблені в Сомерсет-Хаус (центр Лондона). Він зробив висновок, що *«температура міста не повинна розглядатися як*

клімат; це надмірна частина штучного тепла, викликана власною структурою міста, яке переповнене людьми, та викидами великої кількості продуктів згорання палива» [13]. Аналіз Говарда базувався на даних про температуру, зібраних з трьох різних місць за межами Лондона та з одного місця в центрі Лондона. Ефект ОТ розглядався ним як різниця температур між «міськими» та «сільськими» територіями. На жаль, його спостереження та розрахунки не можна вважати достовірними, оскільки розміщення його термометрів було далеким від признаних стандартів, але не зважаючи на ці умови, Говарду вдалось виявити, що температура на околицях Лондона відрізняється від центру міста на  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Після цього він продовжував досліджувати клімат, однак питанню міського острова тепла більше не приділялось значної уваги [13].

Найпершим вченим, що створив картографічну схему ефекту острова тепла став Т. Чандлер (рис. 1.1). Він досліджував температурні показники Лондона та його околиць і для цього використав метод поєднання ізоліній однакових температур [14].

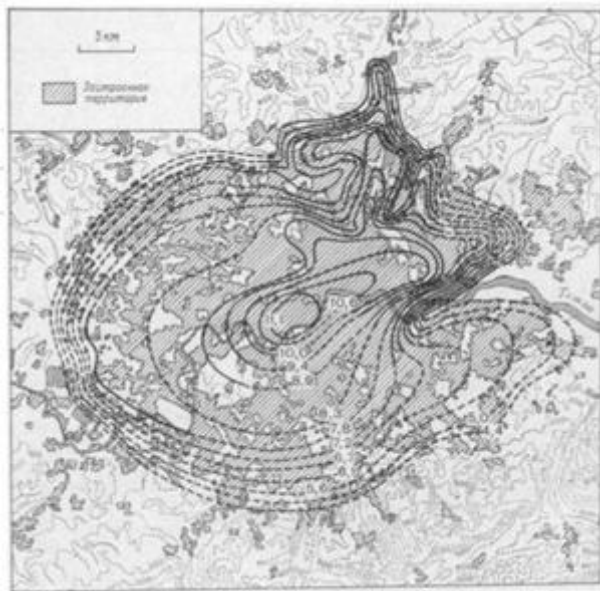


Рис. 1.1. Острів тепла у Лондоні 14 травня 1959 року, зображений за допомогою ізоліній мінімальної температури [14]

Великий вклад у дослідження ефекту острова тепла зробив американський кліматолог Гельмут Лансберг, випустивши у 1981 році свою книгу під назвою «Клімат міста», в якій ефекту ОТ присвятив окремий розділ [6]. Безпосередні дослідження Лансберга почалися ще за 10 років до видання його книги. У своїй роботі він посилався на дослідження Говарда й удосконалив їх, використовуючи власний підхід. Так, Лансбергом було досліджено, що ефект острова тепла найбільш чітко виявляється в містах зі стійкими антициклонними типами погоди, в той час як хмарність та сильний вітер можуть розвіювати цей ефект. Для дослідження ОТ Лансберг також використав метод поєднання ізолій, однак на відміну від Чандлера, він використовував вже обраховані показники різниці температур. Так він зміг визначити епіцентр острова тепла у місті Меріленд (Колумбія, 1974 р.) та виявити різницю температур в 7 °С між містом і його околицями. Варто зазначити, що розвиток ОТ Лансберг пов'язував з ростом чисельності населення. До кінця ХХ ст. наукові дослідження зміни клімату поступово розширилися, включивши в себе багато нових дисциплін, що значно поліпшило розуміння причинно-наслідкових зв'язків та збільшило методологічну базу. Це вплинуло і на розвиток досліджень острова тепла, а саме заклало початок комп'ютеризації цих досліджень [15].

Подальший розвиток науки та техніки все більше глобалізував ГІС технології, що вперше реально запрацювали у Канаді. Поступово ГІС укоренилися і в області вивчення островів тепла та нині є основним методом дослідження цього феномену. У більшості робіт основним джерелом інформації є дані космічного знімання у тепловому інфрачервоному діапазоні.

В Україні дослідженнями формування островів тепла почали займатися з 90-х років. На сьогодні провідною установою, що проводить дослідження феномену ОТ є Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України. Співробітниками центру була розроблена спеціальна методика, що базується на використанні супутникових знімків серії Landsat [16].

### 1.3. Аерокосмічні дослідження острова тепла

На сьогодні важливими матеріалами для вивчення просторових особливостей міського острова тепла стали зображення Землі в тепловому інфрачервоному діапазоні (теплові знімки). На теплових знімках зображується інтенсивність теплового випромінювання, дані про просторовий розподіл якого вкрай складно отримати іншим чином. Використання теплових інфрачервоних зображень дозволяє спостерігати об'єкти земної поверхні за відсутності сонячного світла, що дає можливість вивчення внутрішньодобової динаміки теплового випромінювання. Використання різносезонних теплових знімків відкриває шлях до вивчення сезонної динаміки теплового випромінювання, наявність великих архівів теплових знімків дозволяє аналізувати багаторічну динаміку, а знімки різного просторового розрізнення та охоплення дають змогу вивчати теплове випромінювання на різних масштабних рівнях [17].

Особливості внутрішньодобової, сезонної та багаторічної динаміки острова тепла є одними з найскладніших сторін цього явища. Вивчення просторово часової динаміки ОТ в місті дозволяє визначити причини виникнення цього явища, його вплив на міські об'єкти, а також механізми, що дозволяють звести цей вплив до мінімуму. ОТ впевнено дешифруються на теплових знімках, де їх чітко можна помітити як зони підвищеної яскравості [17].

Дані теплової інфрачервоної зйомки застосовуються в географічних дослідженнях просторових особливостей островів тепла міст різного просторового охоплення. Масштаб просторового охоплення дослідження в цілому визначає просторову роздільну здатність знімка. Так, знімки низької просторової роздільної здатності (близько 1 км), такі як NOAA/AVHRR і Terra/MODIS, використовуються в дослідженнях широкого просторового охоплення, що дають можливість вивчати не тільки ОТ, а і його вплив на околиці, дозволяють оцінити загальну потужність такого явища [17]. Інший

підхід являє собою використання в дослідженні просторових особливостей острову тепла знімків вищої просторової роздільної здатності, таких як ASTER, TM і ETM +, Landsat. Такі знімки дозволяють виявити внутрішню просторову структуру ОТ, простежити розвиток у часі та просторі локальних теплових аномалій, оцінити тепловий вплив різних міських об'єктів один на одного. При вивченні просторових особливостей ОТ відомі приклади [12] комплексування даних теплового діапазону високої та низької роздільної здатності, отриманих з різних супутників (MODIS, ASTER, Landsat) [17].

З лютого 2011 року розпочав зйомку новий космічний апарат Landsat-8, на якому встановлена апаратура TIRS, що проводить зйомку в двох ділянках теплового інфрачервоного діапазону з просторовою роздільною здатністю 100м, яка дозволяє розшифрувати внутрішню структуру поверхневого ОТ з точністю до міських кварталів. Використовуючи різночасові теплові знімки, ми можемо отримати інформацію про просторово-часову динаміку поверхневого ОТ. За допомогою наземних метеорологічних спостережень можна фіксувати інтенсивність і внутрішню структуру самого ОТ. Зіставлення метеорологічних даних і супутникових знімків дозволяє отримати детальні дані про міський острів тепла [17].

В Україні при дослідженні теплових островів, в більшості випадків, використовують матеріали космічної зйомки супутників серії Landsat. Методика досліджень базується на розробленій в Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України технології розрахунку приповерхневої температури за даними теплового діапазону (10,4-11,5 мкм) КЗ серії Landsat з оцінкою коефіцієнта теплового випромінювання по *нормалізованому вегетаційному індексу (NDVI)* [16].

У 2016 році співробітниками американської компанії EOS Data Analytics з офісом в Україні, яка спеціалізується на аналізі та обробці великих об'ємів ГІС даних, був створений інструмент Land Viewer. Цей інструмент оперує великою кількістю даних, що зібрані за допомогою двох супутників: американського Landsat 8 і європейського Sentinel 2A. За допомогою цього

інструменту можна для будь-якої обраної ділянки завантажити супутниковий знімок та, шляхом накладання на нього різної комбінації теплових каналів, отримати потрібну інформацію, що зробило дослідження ОТ доступнішими [18].

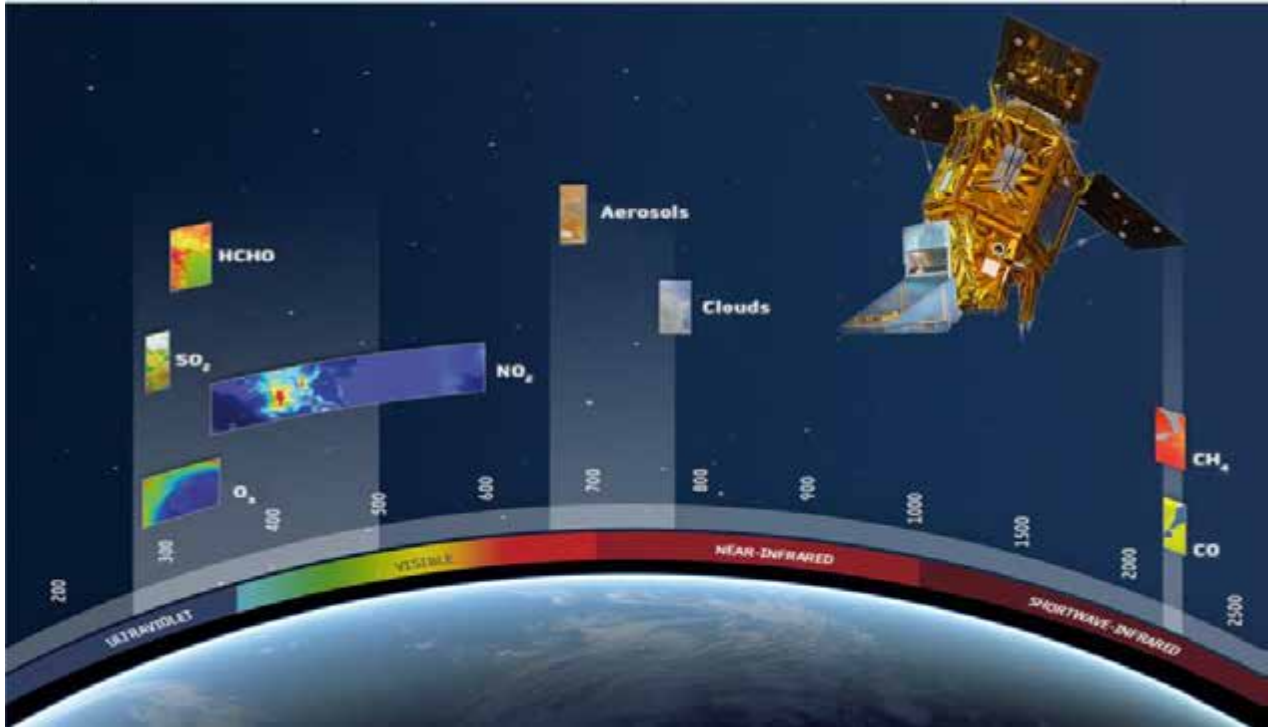


Рис. 1.2. Принцип моніторингу атмосфери з платформи Sentinel

Таблиця 1.1.

Супутники для визначення LST (Land Surface Temperature)

Супутник	Сенсор	Просторове розрізнення LST, м	Часові серії LST
Landsat	TM	120	Миттєво
	ETM	60	
	TIRS	100	
NOAA	AVHRR	1100	Миттєво
EOS (Terra, Aqua)	MODIS	1000	За день
		1000	За 8 днів
EOS (Terra)	ASTER	90	Миттєво
METOR	AVHRR-3	1100	За 10 днів

Для з'ясування розподілу температур навколо окремих об'єктів, таких як будинки, дерева або клумби, що є важливим для дослідження феномену ОТ, також часто проводиться зйомка компактним тепловізором за допомогою мультироторного *безпілотного літального апарата* (БПЛА). Зйомка проводиться з висоти 100 м, що дозволяє отримати теплові карти з просторовим розділенням в декілька сантиметрів. БПЛА також може бути обладнаний звичайною камерою, що дозволяє порівнювати теплові карти з візуальними [19].

Отже, ефект *міського острова тепла* – це локальний метеорологічний феномен різниці температур між центром міста та його периферією, який являє собою одну з найбільш значних змін клімату міста, викликаних людиною. Вперше ефект острова тепла був досліджений Люком Говардом у 1818 році, а активне дослідження ефекту по всьому світу почалось з 90-х років ХХ ст., що було пов'язано з розвитком *геоінформаційних технологій*.

Найпоширенішими чинниками, які спричинюють виникнення ОТ є щільна та висока забудова, переважання штучних матеріалів у містобудуванні, відсутність зелених насаджень та забруднення повітряного басейну над містом. Цей феномен викликає тепловий стрес, негативно впливає на здоров'я людей, якість споруд, доріг, призводить до збільшення рівня споживання енергії. Важливим є проведення своєчасних досліджень островів тепла з глибоким аналізом факторів, які провокують утворення даного феномену в місті, що допоможе локалізувати проблему та обрати способи її вирішення. Сучасна методологічна база досліджень ОТ є широкою і дозволяє оперувати різними інструментами та техніками, однак на разі найефективнішим способом виявлення та дослідження ОТ стали зображення Землі в тепловому інфрачервоному діапазоні (теплові знімки).

## РОЗДІЛ 2

### СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ УРБАНІЗОВАНОГО ФЕРМЕРСТВА

#### 2.1. Передумови виникнення урбанізованого фермерства

Передумовою для розробки проектів міського фермерства послужили фундаментальні зміни, пов'язані з постійним зростанням населення планети, що в найближчому майбутньому призведе до нестачі територій сільськогосподарського призначення. За оцінками та прогнозами ООН населення світу збільшиться на 40%, перевищивши 9,7 мільярдів осіб, до 2050 року, і знадобиться на 70% більше продовольства для задоволення потреб ще 3 мільярдів жителів у всьому світі. Щоб прогодувати 9 мільярдів людей на планеті, потрібні фермерські господарства, які покривають землю площею, рівною території всієї Південної Америки [2].

Всі технології сіті-фермерства без надзвичайних умов реалізуються на базі споруд. Історія ж містить спогади про використання для вирощування продукції міських парків, скверів, клумб (рис. 2.1), проте це були надзвичайні вимушені умови.



Рис.2.1. Друга світова війна: підсобне господарство у саду Лувра, Франція (зліва) городи в скверах блокадного Ленінграду, СРСР (справа)

У міському фермерстві паралельно розвиваються рішення в різних форматах та масштабах. Найменший масштаб реалізується у домашніх умовах, у контейнерах на балконах та у спеціальних кімнатах – "гроубоксах" (growbox – ящик для вирощування, який у вітчизняній термінології може називатися фітокамерою чи фітотроном). Такий спосіб використовується тими, для кого рослинництво є швидше хобі.

Масштабні технології реалізуються на дахах будівель, зокрема в теплицях та зимових садах. Такий формат затребуваний для дрібносерійного виробництва, як хобі, для освітніх цілей тощо. Можуть вирощуватися як однорічні культури, так і кущі й ліани (рис. 2.2).

Наймасштабніше серійне виробництво реалізується на рослинних «фабриках» – вертикальних фермах.



Рис. 2.2. Приватний садочок на даху будівлі в ЄС (ліворуч) і овочева ферма та водоймище з лотосами на даху пивоварні в Лючжоу, Гуансі-Чжуанський автономний район Китаю (справа)

Сучасні підходи для міського фермерства можна умовно поділити на 3 групи:

1. Розробка та імплементація до мегаполісів нових високотехнологічних споруд для промислового виробництва продукції рослинництва. До таких можна віднести вертикальні теплиці, гідропоніку, аеропоніку тощо. Такий новаторський підхід потребує значного фінансування і орієнтований на гарантовані врожаї завдяки високопотенційним гібридам,

комплексній системі удобрення, досвічуванню, за впровадження автоматизації й робототехніки (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Вертикальна ферма «Щастя Здоров'я» [20]

2. Орієнтація на перспективу аграрного виробництва в підвалах чи на верхніх поверхах за проектування офісних, житлових та виробничих споруд. Такі рішення є цікавими з огляду на оптимізацію енергоефективності рослинництва, насамперед для тепличних підприємств. У офісних, особливо великоколективних, приміщеннях виділяється значна кількість  $\text{CO}_2$ , тому потрібна вентиляція, а отже – витрати енергії на кондиціонування повітря. Традиційні рішення щодо впровадження систем рекуперації тепла потребують значних капіталовкладень на встановлення та сервісне обслуговування обладнання. Постачання в теплицю відпрацьованого в офісних приміщеннях повітря дозволяє ефективно використати енергію та зменшити карбоновий слід, оскільки  $\text{CO}_2$  використовується рослинами. Прикладом такого рішення є “Небесна ферма” в м. Ганджоу, що дає до 4-х врожаїв за рік (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Ферма Тяньцзі в Yuexiu Financial Building розташована на 70 поверсі будівлі і займає площу близько 250 квадратних метрів



Рис. 2.5. Засновник найбільшої в Гонконгу компанії міського фармінгу City farm Осберт Лам (Osbert Lam), де городи розміщують на дахах будівель [21]

3. Адаптація існуючих споруд без масштабних капіталовкладень в перебудову для створення городів. Зазвичай, це здійснюється на плоских дахах житлових та виробничих споруд, розміщуючи рослини у спеціальних контейнерах із субстратом (рис. 2.5). Такі рішення орієнтовані, насамперед, на

ручну працю і відносно невеликі об'єми виробництва, коли, наприклад, родина вирощує городину для власного споживання. У протигагу, існують комерційні рішення, що дозволяють розширити асортимент продукції, спеціалізуватися на популярних видах продукції, наприклад, для закладів національної кухні, а частіше – виключно комерційний вибір.

## 2.2. Сучасні технології інтенсивного рослинництва і урбанізованого фермерства

1) *Гідропоніка*. Її можна вважати формою вертикального рослинництва, за якої рослини ростуть в поживних розчинах замість ґрунту, що можна зробити за допомогою або без використання інертного середовища. Це відносно проста й доступна технологія, з низкою переваг і вимог. Так, вона виключає ґрунтові шкідливі організми, проте не виключає шкідливі мікроорганізми, що передаються через воду й можуть поширюватися швидше, ніж у ґрунті, а тому невід'ємним є постійний суворий контроль. Живлення рослин так саме забезпечується високоточним штучним регулюванням.



Рис. 2.6. Гідропонна ферма листових овочів із використанням світлодіодного освітлення.

Автор фото Nikolay\_E/Shutterstock.com

2) Аеропоніка – ще одна форма вертикального рослинництва, яка не потребує ґрунту, але, на відміну від гідропоніки, використовує туман, що розпилюється на коріння рослин, щоб забезпечити необхідними поживними речовинами. Ця технологія не потребує великої кількості води, як гідропоніка, і на 95 % менше порівняно з традиційним вирощуванням рослин у ґрунті (ґрунтосумішах), що робить її життєздатним рішенням для територій із дефіцитом чи неможливістю постачання значних кількостей води (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Схема аеропонічної установки(ліворуч) і аеропонічна ферма листових овочів (справа)

3) Аквапоніка – можливе поєднання рециркулятивного рибництва та інтенсивного рослинництва в єдиній замкненій системі (рис. 2.8). Розроблена технологія для систем замкненого водопостачання – рециркулятивної аквакультури («recirculation aquaculture») розведення риби та нерибних об'єктів (наприклад, раків, креветок). Найбільш поширеним видом риб, що культивуються в аквапонічних системах, є тилapia (Tilapia).

4) Вирощування комах. Ферми для розведення комах як джерела альтернативного протеїну (рис. 2.9), у тому числі і для створення продуктів харчування (наприклад, цвіркуни є основою протеїнових батончиків компанії ECHO (США)), протеїну для сільськогосподарських кормів (наприклад, розведення колоній мух компанії "AgriProtein" (ПАР)).



Рис. 2.8. Принцип аквапоніки (зліва) та аквапонна ферма, де вирощують овочі та рибу (справа)



Рис. 2.9. AgriProtein – промислова ферма з вирощуванням личинок, заснована на органічних відходах (зліва) та продукція швейцарського стартапу Essento щодо високобілкової їжі з мух та цвіркунів (справа)

5) Альгофлора. Культивування водоростей (мікродоростей) для подальшого виробництва продуктів харчування, лікарських засобів, сільськогосподарських кормів, палива та добрив. Водорості, завдяки своєму унікальному складу, називають джерелами вічної молодості, оскільки є природним реліктовим продуктом. Вони містять більш як 20 видів амінокислот, велику кількість макро- та мікроелементів. Лідерами у вирощуванні мікродоростей є США, Австралія, Німеччина, Голландія та Південно- Африканська Республіка (рис. 2.10).

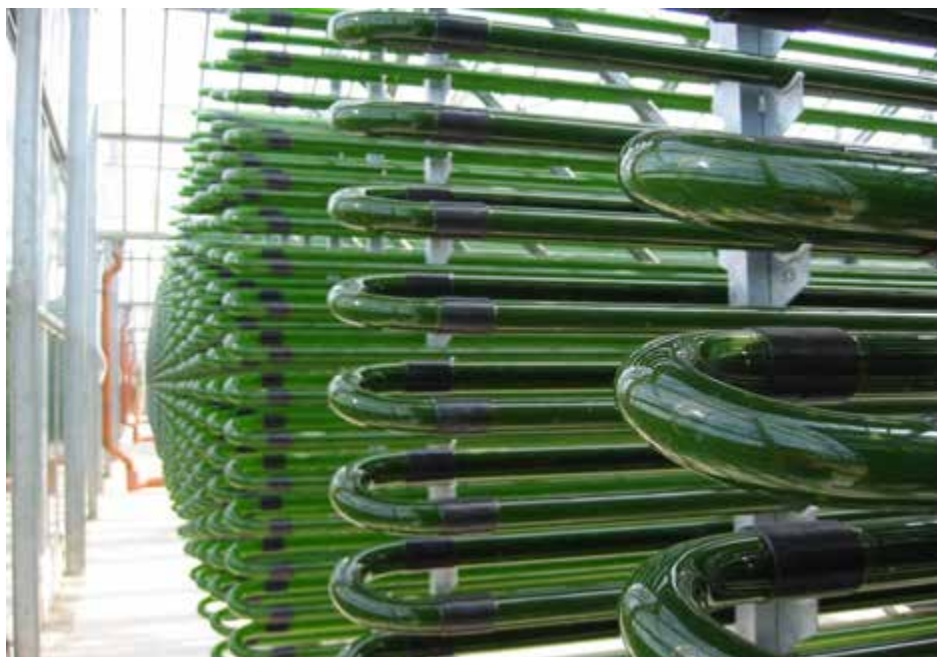


Рис. 2.10. Цех із вирощування мікробіодоростей

Культивування мікробіодоростей – це стратегічний напрямок виробництва, причому з різностороннім застосуванням. Зазначимо основні з них. Тенденція зростання вартості вуглеводнів, цікавість щодо виробництва біопалива з альтернативних джерел значна. Традиційною сировиною є ріпак, соя, рибні та тваринні жири, проте дослідники розглядають в цій ніші саме мікробіодорості, оскільки їх виробництво не потребує площ ґрунтів. Мікробіодорості значно швидше, ніж традиційні рослини, накопичують біомасу, і вихід готового продукту складає до 50 % від первинної біомаси. Їх культивування не потребує великих площ і характеризується відносно низькою трудоємністю. Щодо енергетичної цінності, мікробіодорості містять майже в 210 разів більше ліпідної фракції – компоненту, найбільш близького своїм складом до нафти.

Сучасні технології дозволяють на базі екстрактів альгофлори виготовляти біологічно активні добрива, особливо цінні для збіднених органікою ґрунтів. Водорості можна вважати відновлювальними ресурсами. Для прикладу, в азіатських країнах синьо-зелені водорості *Anabena* традиційно використовують для підживлення рису.

## РОЗДІЛ 3

### ПОШИРЕННЯ ЕФЕКТУ ОСТРОВА ТЕПЛА У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

#### 3.1. Поширення ефекту острова тепла у світі

Розвиток та вдосконалення наявної методології, а також виникнення нових методів дослідження ефекту острова тепла, дозволили розширити інформаційну базу щодо даного феномену. Вчені з усього світу вивчають сутність прояву островів тепла не тільки на глобальному, а й на регіональному і локальному рівнях. З кожним роком кількість наукових публікацій, присвячених цій темі, зростає, що дозволяє відстежувати та виявляти чинну тенденцію розвитку даного метеорологічного ефекту у світі.

Зокрема, було з'ясовано, що ефект ОТ не має чіткого географічного поширення, він не обмежується лише середніми широтами чи великими містами. Наприклад, у м. Барроу, штат Аляска, спостерігається ОТ з перевищенням температур на  $2^{\circ}\text{C}$ , що здійснює незначний, проте постійний вплив на багаторічну мерзлоту міста [22]. Міста середнього розміру, такі як Колумбія, штат Міссурі [22], або Даллас, штат Техас [23], також мають прояви ефекту ОТ, що збільшують температуру цих міст в середньому на  $1-2^{\circ}\text{C}$ , в порівнянні з передмістями. Хоча ці відмінності в температурах є порівняно незначними, проте зміна температури навіть на один градус може означати різницю між дощем та снігом.

У 2014 році було проведено дослідження проявів ефекту міського острова тепла для 60 міст США [24], яке показало, що в 57 із 60 досліджених міст спостерігається відчутне посилення ефекту ОТ за останні 10 років. Найбільш інтенсивні прояви ОТ були зафіксовані у наступних містах: Лас-Вегас ( $4^{\circ}\text{C}$ ), Альбукерке ( $3,2^{\circ}\text{C}$ ), Денвер ( $2,7^{\circ}\text{C}$ ), Портленд ( $2,6^{\circ}\text{C}$ ), Канзас-Сіті ( $2,5^{\circ}\text{C}$ ), Колумбус ( $2,4^{\circ}\text{C}$ ).

Загалом, вчені прийшли до спільної думки, що поштовхом для виникнення островів тепла у містах по всьому світу стали швидкі теми урбанізації та глобальне потепління. Однак, на особливості, конфігурацію, умови виникнення та подальшого розвитку ОТ впливають саме локальні чинники, які можуть бути виявлені лише при аналізі внутрішнього середовища міста. Це, в першу чергу, стосується показника концентрації промислових підприємств, міського трафіку, форми забудови, кількості зелених зон, топографії тощо. Разом ці фактори створюють унікальні умови для виникнення та розвитку ефекту острова тепла, який в кожному місті матиме свої особливості [24].

Так, острів спеки у Нью-Йорку має нетипову конфігурацію, оскільки місто розділено на декілька частин річкою Іст-Рівер, тому для кожного округу та району Нью-Йорка є характерними різні умови для формування острову тепла. Наприклад, в центрі Манхеттена знаходиться великий Центральний парк, який охолоджує навколишній простір і сильно зміщує епіцентр спеки в сторону. Зовсім інша ситуація у Брукліні, де острів тепла має найінтенсивніший прояв, оскільки цей округ має найбільшу кількість населення та найвищу щільність забудови. Навпаки найслабший прояв ефекту фіксується у Стейтен-Айленді, для якого характерним є відносно невисокі показники температур та особливий мікроклімат, оскільки він найбільш віддалений від інших округів Нью-Йорка та оточений річкою з усіх сторін [25].

Міста по всій Європі також потерпають від проявів даного феномену. Ефект ОТ був зафіксований у Барселоні [26], де він проявляється у вигляді концентричних кіл через нетипову протяжну паралельну забудову кварталів, а також піддається впливу бризів з Середземного моря (значення ОТ 2-7°C); в Лондоні [27], де на його формування впливає щільна забудова центральних районів, високий трафік, значне забруднення повітря, а також особлива циркуляція вітрів (значення ОТ 4-8°C); та в багатьох інших містах по всій Європі. Загалом, дослідження [28] показали, що для європейських міст

перепад температур між центром та периферією в середньому становить 2-6°C. У 2020 році було опубліковано дослідження «Аналіз теплових хвиль та ефекту острова тепла у містах Центральної Європи та їх вплив на міське планування» [29]. Дана робота підтвердила важливість впливу локальних чинників на виникнення ефекту острова тепла. Так, наприклад, значний вплив на ОТ в Загребі справляють топографія і морфологія міста. Висхідні і низхідні вітри, які утворюються на схилах прилеглої гори Медведніца в літній антициклонічний період, можуть впливати на термічне навантаження і якість повітря в міських районах. Це відбувається внаслідок того, що місцеві вітри впливають на теплову циркуляцію вниз по схилу гори, посилюючи висхідний рух повітря на південних схилах пагорбів, тим самим сприяючи виникнення додаткового тепла, яке розсіюється над містом і посилює значення ОТ [29].

Краків, як і більшість міст Центральної Європи, розвивався навколо історичного центру, а його інфраструктура зазнала інтенсивний просторовий розвиток у другій половині 20 століття. Тому осередок формування ОТ знаходяться в центрі міста, розширюючись вбік основних транспортних артерій і промислових зон. Впливають на прояви ОТ і водні ресурси Кракова – річка Вісла, що протікає через все місто, поглинаючи тепло та охолоджуючи навколишній простір, та озеро Закшувек, в долині якого формуються холодні вітри, що призводять до температурної інверсії, в наслідок якої вертикальна циркуляція повітря уповільнюється і всі продукти життєдіяльності міста не можуть піднятися у верхні шари атмосфери та розсіятися [29].

Прояв даного феномену також широко зустрічається в містах Азії. Особливо великої шкоди ефект острова тепла завдає для міст тропічного та екваторіального поясів, де температури є високими протягом року. Наприклад, в Сеулі острів тепла має особливий характер формування внаслідок декількох факторів. По-перше, через мусонний клімат літо у Сеулі є дуже жарким та вологим, через що люди гірше переносять спеку, а поверхні сильно нагріваються в наслідок високих температур. По-друге, через свою близькість до Жовтого моря Сеул знаходиться під сильним впливом морських

бризів (особливо влітку), які зміщують та розширюють острів тепла. По-третє, Сеул розділений річкою Ханган на дві половини, тому у цьому місті формуються два великі острови спеки – північний та південний [30].

Схожа ситуація і в Сінгапурі, де на формування ОТ впливає його острівне положення та розташування в центрі міста великої лісопаркової зони з озерами «Central Water Catchment», що зміщує острів тепла на периферію міста, а саме – на північ, де знаходяться бізнес-центр та промислові зони. В свою чергу, вітри, що дмуть з Сінгапурського проливу, утримують тепло в межах міста і не дають йому вільно розсіюватись над морем [10].

Отже, проблема виникнення ефекту острова тепла нині фіксується у різних містах по всій планеті, не маючи певних закономірностей поширення, не обмежуючись лише середніми широтами чи великими містами. На його виникнення та конфігурацію у кожному місті впливають локальні фактори та територіальні умови. Однак, для будь-яких островів тепла спільним є те, що вони утворюються внаслідок нестачі охолоджувальних елементів природного походження в межах міста і завдають негативних наслідків здоров'ю населення, що робить це явище особливо небезпечним в умовах глобального потепління.

### **3.2. Формування ефекту острова тепла у найбільших містах України**

В Україні, як і у світі, цей феномен, тою чи іншою мірою, проявляється практично у всіх містах. Детальне дослідження «українських» островів тепла проводилось у липні 2016 року для Одеси, Дніпра, Львова, Харкова та Києва за допомогою оцінки температури поверхні та *нормалізованого відносного індексу рослинності (NDVI)* [31]. *Нормалізований відносний індекс рослинності (NDVI)* – це кількісний показник активної (здатної до фотосинтезу) біомаси, використання якого в дослідженнях островів тепла

дозволяє доволі точно визначити їх конфігурацію: чим меншим буде показник NDVI, тим більшим буде значення температури поверхні і, відповідно, острову тепла [32]. Для отримання цих даних було використано супутникові знімки Landsat 8 за 2015–2016 роки [31]. Одеса, в порівнянні з іншими містами, в межах яких проводились дослідження теплових островів, має найбільш виражену проблему сильного нагрівання поверхні, оскільки, як видно з рис. 3.1., більшість території міста знаходиться у червоному спектрі, що свідчить про температуру 36°C і вище.

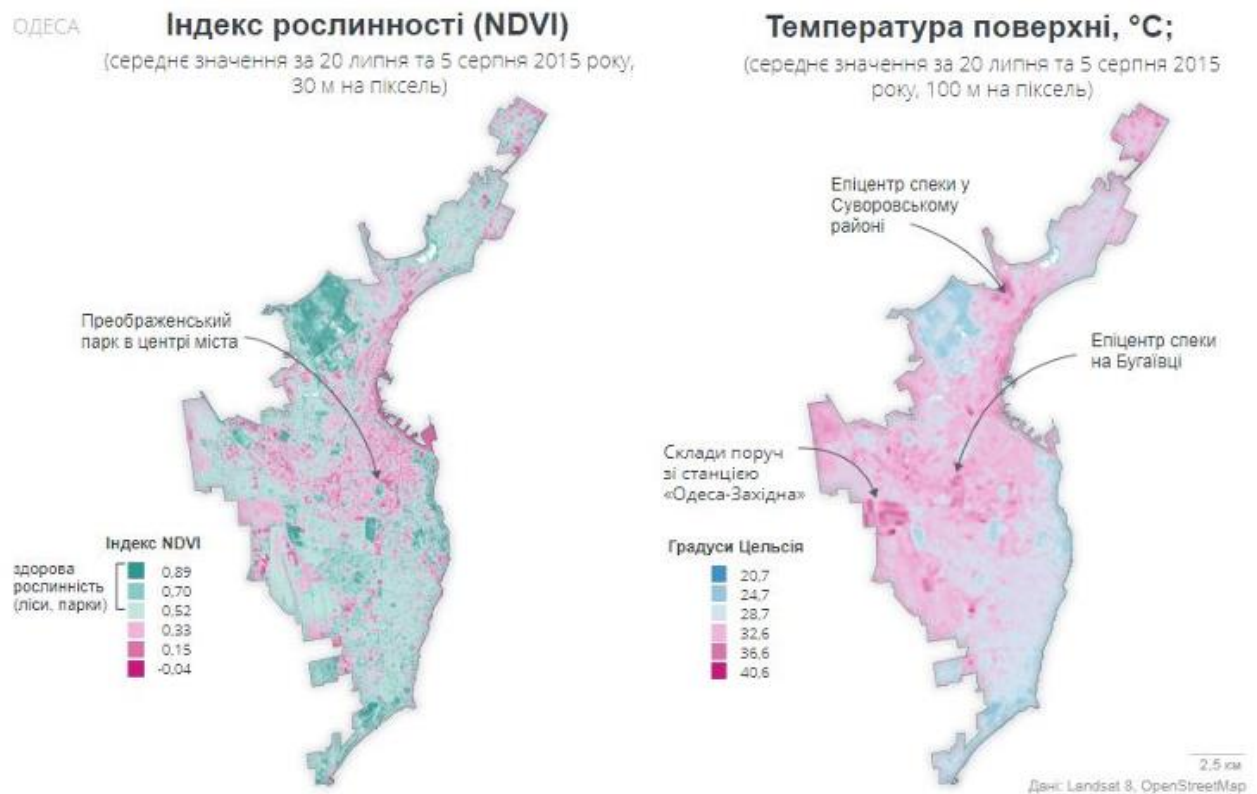


Рис. 3.1. Карта формування острова тепла у м. Одеса [31]

Це, в першу чергу, пов'язано із порівняно жарким кліматом Одеси, що ускладнюється особливим типом периметральної замкнутої забудови, при якій будинки розташовуються один перед одним у формі замкнутого квадрата (рис. 3.2); наявністю значної кількості складів, промислових підприємств; повною відсутністю зелених зон у більшості кварталів.



Рис. 3.2. Вигляд типової забудови у центрі Одеси [на основі даних [18]]

Відповідно, епіцентри спеки були зафіксовані у Бугаївці ( $36,6^{\circ}\text{C}$ ), поруч зі станцією «Одеса-Західна», де значення температури поверхні було найбільшим ( $40,6^{\circ}\text{C}$ ) та у Суворовському районі ( $36,6-40,6^{\circ}\text{C}$ ). Інтенсивний прояв ОТ в цих районах пояснюється нестачею зелених зон, перекриттям природних матеріалів (ґрунтів) штучним покриттям (асфальтом, бетоном) та зосередженням безлічі торгових, промислових, будівельних фірм, залізничних колій та складів на невеликій площі.

Таким чином, температура поверхні в серпні доходить до  $36-46^{\circ}\text{C}$  не тільки в центрі Одеси, а й на її околицях. Індекс NDVI в цих місцях становить менше ніж 0,15. Різниця між парком у центрі міста та сусіднім забудованим районом може досягати  $10^{\circ}\text{C}$ . На північному заході міста формується мезокліматична зона з температурами поверхні  $24-28^{\circ}\text{C}$ , метеорологічний режим якої знаходиться в сильній залежності від прилеглої акваторії Чорного моря [33]. Різниця між поверхневими температурами даної зони і центральної частини міста може становити близько  $20^{\circ}\text{C}$ , що створює сильне теплове навантаження на всю екосистему міста.

Дещо інша ситуація спостерігається у Дніпрі (рис. 3.3). Там сформувався один потужний епіцентр спеки в Індустріальному районі, де температура поверхні в серпні може досягати  $42^{\circ}\text{C}$ , в той час, як у сусідньому

Амур Нижньодніпровському районі з житловою забудовою вона становить 25-29°C.

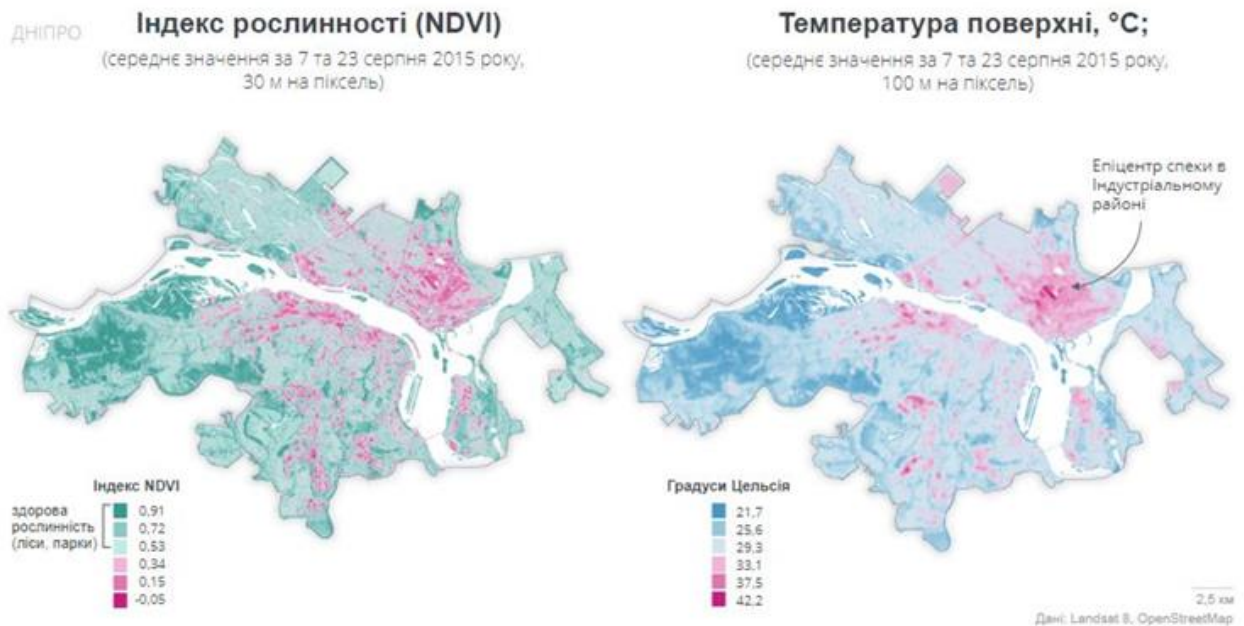


Рис. 3.3. Карта формування острова тепла у м. Дніпро [31]

Потужний острів тепла, що сформувався в Індустріальному районі спричинений виключно великою концентрацією промислових підприємств. В цьому районі діє трикотажна, обойна фабрики, трубопрокатний та силікатний заводи, Дніпротяжбудмаш тощо. Відповідно індекс NDVI досягає мінусових значень (-0,05). На відміну від Одеси, житлові масиви Дніпра мають «хаотичний» спосіб забудови та високий показник озелененості – в більшості ЖК знаходяться парки і поруч з кожним будинком насаджені дерева, тому там спостерігаються відносно незначні перепади температур, що ще раз підкреслює роль зелених насаджень у зменшенні ефекту острова тепла. Також на зниження поверхневих температур впливає близькість р. Дніпро. На периферії індекс NDVI досягає 0,91, що є найбільшим показником серед інших досліджених міст. Температура в цих зонах в серпні становила лише 21-22°C.

У Харкові (рис. 3.4) ситуація є подібною до ситуації в Дніпрі та Одесі – тут також різниця температур між центром міста та периферією становить близько 20°C. Епіцентр ОТ на Гончарівці та Москалівці (37°C) пов'язаний з

розташуванням в цій області двох заводів – заводу самохідних шасі та ХМЗ «Світ Шахтаря». Центр спеки на Балашівці (40,4°C) формується в наслідок діяльності промислового заводу ім. О. Малишева.

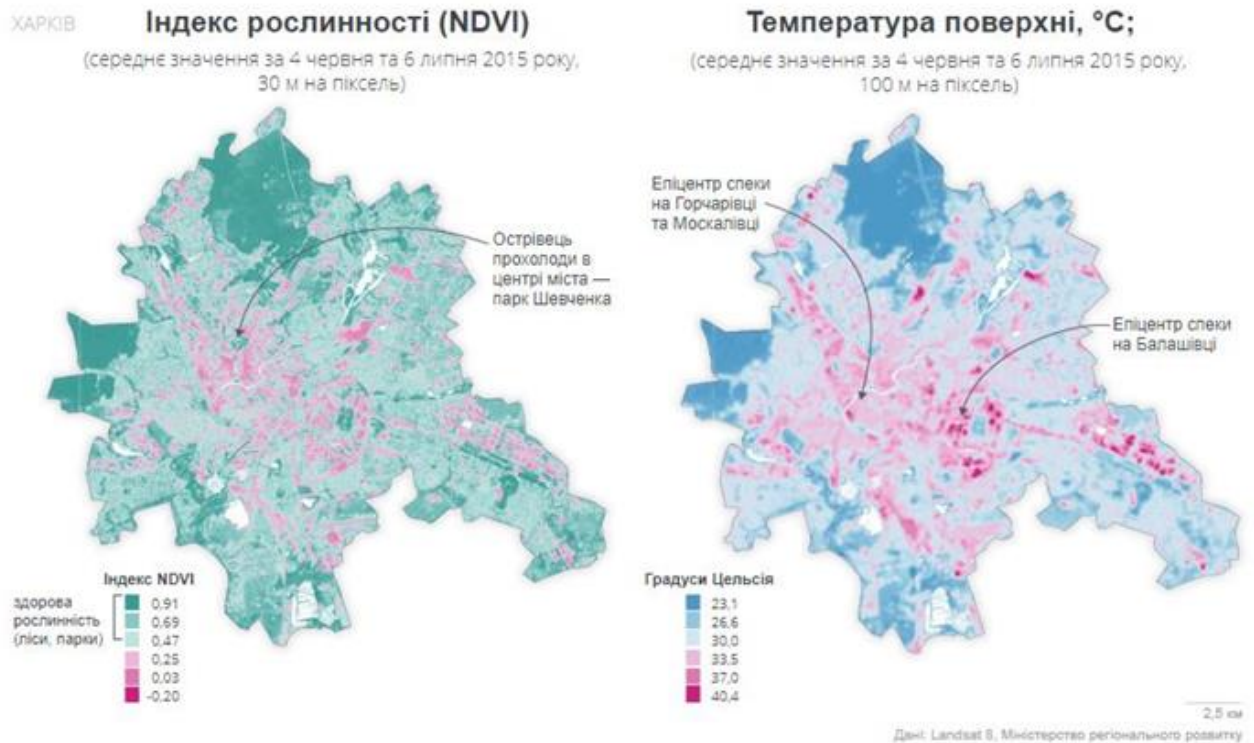


Рис. 3.4. Карта формування острова тепла у м. Харків [31]

У Львові (рис. 3.5) острів тепла має порівняно менший прояв, оскільки різниця між центром міста та його околицями становить приблизно 15°C, а в межах міста різниця досягає 4-6°C. Найбільш інтенсивний прояв зафіксований в Індустріальному районі, поруч з Рясним (34,2°C), що пояснюється високою концентрацією підприємств у цьому районі. Інші епіцентри, зі значенням температури поверхні 30-34°C, зафіксовані також над Львівською залізницею в районі Левандівки, Львівським аеропортом на заході, а також в центрі міста, де все покрито штучними матеріалами, і, відповідно, спостерігається низький показник NDVI (- 0,01).

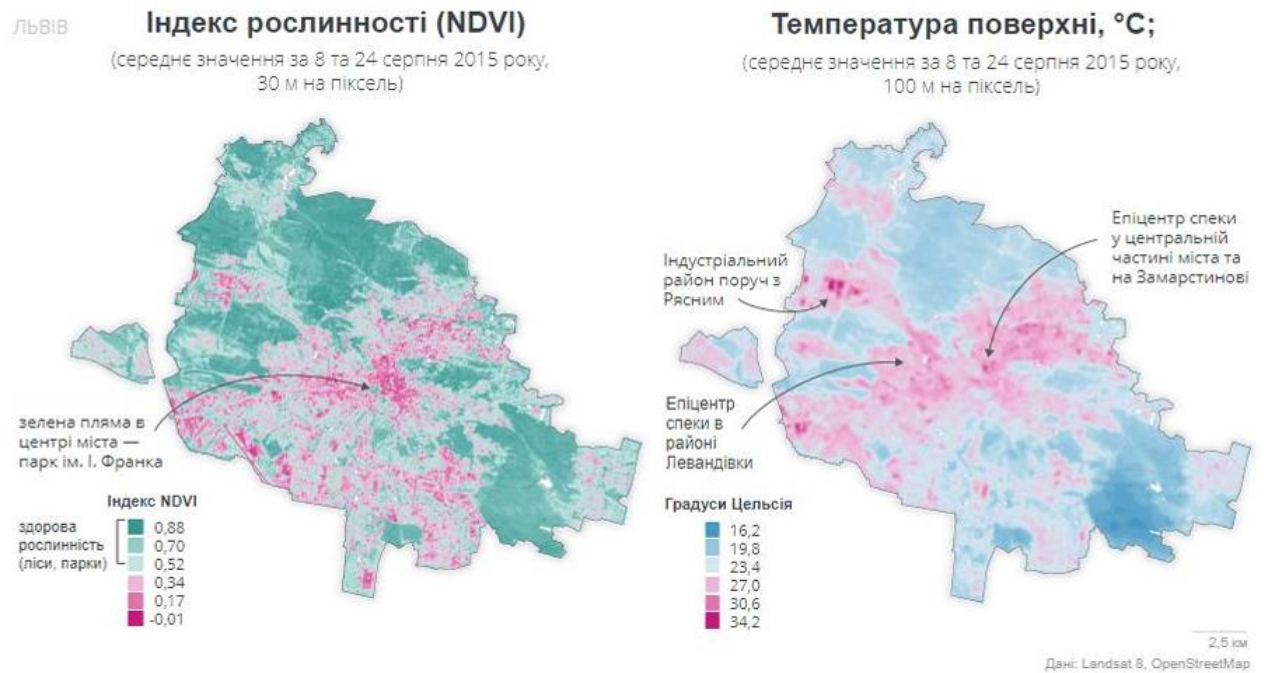


Рис. 3.5. Карта формування острова тепла у м. Львів [31]

Варто відзначити, що епіцентр спеки, що знаходяться в Індустріальному районі поблизу Рясного, утворився на межі Львову, тобто за межами житлових зон та центру міста, тому це свідчить про те, що ефект острова тепла може формуватись не тільки в центрі, а й на периферії. Отже, при аналізі теплових островів, що сформувались у найбільших містах України, виявляється чітка закономірність між показником індексу рослинності та показником температури поверхні: там, де індекс NDVI становить менше 0,15, формуються острови спеки, де температура поверхні в серпні може доходити до 35-40°C, створюючи температурні перепади на 10-20°C порівняно зі спальними районами або зеленими зонами. Це не може не викликати дискомфорт для людей та проблеми для навколишнього середовища. Для чіткого розуміння феномену острова тепла та чинників, що його спричинили, необхідно здійснювати аналіз на локальному рівні. Саме тому причину формування потужного острова тепла у столиці України – місті Києві – буде детальніше досліджено у подальших розділах даної роботи.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В МІСТАХ

#### 4.1. Найпоширеніші методи визначення LST та LSE

Температура земної поверхні (LST) є одним з ключових параметрів, що впливають на енергетичний баланс з ключових параметрів, що впливають на баланс поверхневої енергії, регіональні кліматичні умови, теплові потоки та енергообмін. [35]. Багато дослідників вивчали важливість та вплив довготривалого сонячного випромінювання на різні включаючи міський клімат і дослідження поверхневих теплових островів (Surface Heat Island (SHI), евапотранспірацію, моніторинг лісових пожеж, геологічні та геотермальні дослідження [34]. Крім того, LST було затверджено як один з пріоритетних параметрів Міжнародної програми з геосфери та біосфери (IGBP) [36]. Дані дистанційного термального інфрачервоного зондування (Thermal Infrared (TIR)) дозволяють проводити часовий і просторовий аналіз LST у великому масштабі, навіть на глобальному рівні. Точне визначення LST з даних TIR залежить від атмосферних ефектів, параметрів датчика, тобто спектрального діапазону і кута огляду, та параметрів поверхні, таких як випромінювальна здатність і геометрія. Оскільки випромінювальна здатність і атмосферні ефекти є двома фундаментальними факторами для отримання LST з термальних даних, багато дослідників запропонували різні підходи для отримання LST з урахуванням цих факторів [36]. Ці алгоритми називаються залежно від кількості використовуваних смуг сенсорів. Наприклад, одноканальні алгоритми використовують одну смугу TIR. Однак, методи з розділеним вікном або багатоканальні включають більше однієї смуги TIR.

Розглянемо найпоширеніші методи визначення LST та LSE, що застосовуються до даних дистанційного зондування з КА серії Landsat.

Супутники серії Landsat безперервно надають дані дистанційного зондування Землі з середньою роздільною здатністю вже понад чотири десятиліття. Починаючи з 23 липня 1972 року, загалом було запуснено вісім серій супутників Landsat для цілей дистанційного зондування Землі. Landsat 6 був єдиним супутником, який не зміг досягти орбіти. Решта супутників забезпечили унікальний ресурс для дослідження глобальних змін і застосування в сільському господарстві, картографії, геології, лісовому господарстві, регіональному плануванні, моніторингу протягом останніх чотирьох десятиліть.

Landsat 5 TM і Landsat 7 ETM+ мають *шість діапазонів відображення (видимий, ближній інфрачервоний, і короткохвильовий інфрачервоний, просторова роздільна здатність 30 м) і один діапазон в області TIR (смуга 6)*. Тепловий діапазон має власну просторову роздільну здатність 120 м та 60 м для сенсорів TM та ETM+, відповідно, але він надається кінцевим споживачам з роздільною здатністю 30 м після передискретизації кубічною згорткою. Датчик OLI Landsat 8 має дев'ять смуг відбиття з просторовою роздільною здатністю 30 м, а датчик Landsat 8 TIRS має дві смуги в TIR (смуга 10 і смуга 11). Ці теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 100 м, але передискретизуються і публікуються з роздільною здатністю 30 м Геологічною службою США.

Алгоритм одного вікна, Одноканальний алгоритм, Метод рівняння переносу випромінювання та алгоритм розділеного вікна є одними із найшороковживаніших алгоритмів визначення температури поверхні землі (LST) із вищезгаданих даних дистанційного зондування Землі [34]. У той час як перші три методи можуть бути застосовані до даних Landsat 5 TM, 7 ETM+ та 8 OLI/TIRS, алгоритм розділеного вікна може бути застосований лише до даних Landsat 8 OLI/TIRS, оскільки для цього потрібно щонайменше два діапазони TIR. Істотні відмінності між цими методами полягають у математичному формулюванні та вхідних параметрах [37]. На додаток до випромінювальної здатності та пропускання атмосфери, які є спільними для

всіх методів, алгоритм одного вікна потребує приземної температури повітря для розрахунку ефективної середньої температури атмосфери, на відміну від інших методів. І навпаки, метод рівняння переносу випромінювання та одноканальний алгоритм потребують висхідного та низхідного атмосферного випромінювання для знаходження LST.

### Алгоритм одного вікна

Алгоритм одного вікна (Mono Window Algorithm, MWA) був розроблений Цинь та ін. [38] для даних Landsat TM. Метод потребує трьох основних параметрів, а саме: випромінювальної здатності, коефіцієнта пропускання атмосфери та ефективної середньої температури атмосфери. Значення LST за алгоритмом одного вікна можна визначити як:

$$T_s = \frac{\{a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T - DT_a\}}{C} \quad (4.1)$$

$$a = -67.355351 \quad b = 0.458606$$

$$C = \varepsilon \times \tau \quad D = (1-\tau)[1 + (1-\varepsilon)\tau]$$

де  $T_s$  - температура земної поверхні в Кельвінах;

$T$  - температура яскравості на датчику в Кельвінах;

$T_a$  – ефективна середня температура атмосфери в Кельвінах;

$\tau$  - коефіцієнт пропускання атмосфери;

$\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (Land Surface Emissivity (LSE));

$a$  і  $b$  - константи алгоритму;

$C$  і  $D$  - параметри алгоритму, обчислені з використанням LSE і коефіцієнт пропускання.

### Одноканальний алгоритм

У роботі [36] було представлено перегляд алгоритму одного вікна для отримання LST з даних Landsat TIR. Враховуючи алгоритм одного вікна, LST ( $T_s$ ) можна обчислити, використовуючи наступне загальне рівняння:

$$T_S = \gamma \left[ \frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (4.2)$$

де  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність земної поверхні (LSE),

$L_{sen}$  - випромінювання на сенсорі в тепловому діапазоні;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3$  - атмосферні функції;

$\gamma, \delta$  - два параметри, що задаються:

$$\gamma \approx \frac{T^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad (4.3)$$

$$\delta \approx T - \frac{T^2}{b_\gamma} \quad (4.4)$$

де  $b_\gamma \approx \frac{c_2}{\lambda}$ ,

$c_2 = 14387,7 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ ;

$\lambda_i$  - ефективна довжина хвилі для смуги  $i$ , яка визначається як:

$$\lambda_i = \frac{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} \lambda f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1,i}}^{\lambda_{2,i}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (4.5)$$

де  $f_i(\lambda)$  - функція спектрального відгуку для відповідної смуги.

$\lambda_{1,i}$  та  $\lambda_{2,i}$  - нижня та верхня границя  $f_i(\lambda)$ , відповідно.

Значення  $b_\gamma$  дорівнює 1256 К і 1277 К для смуги 6 знімків Landsat 5 і Landsat 7, відповідно; для смуги 10 і смуги 11 Landsat 8 воно дорівнює 1320 К і 1199 К відповідно.

Атмосферні функції  $\psi_1, \psi_2$  та  $\psi_3$  визначаються як:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \quad \psi_2 = -L_\lambda^\downarrow - \frac{L_\lambda^\uparrow}{\tau}; \quad \psi_3 = L_\lambda^\downarrow; \quad (4.6)$$

де  $L_\lambda^\uparrow (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - висхідне випромінювання або випромінювання атмосферного шляху,

$L_{\lambda}^{\downarrow} (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  - низхідне випромінювання або випромінювання неба.

### Метод рівняння переносу випромінювання

Простим методом отримання LST з однієї смуги TIR є інверсія рівняння радіаційного переносу випромінювання (RTE) відповідно до наступних виразів:

$$L_{\lambda}^{sen} = [\varepsilon B_{\lambda}(T_S) + (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}] \tau + L_{\lambda}^{\uparrow} \quad (4.7)$$

де  $L_{\lambda}^{sen} (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$  зареєстроване на сенсори випромінювання відповідного теплового діапазону;

$$B_{\lambda}(T_S) = (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}) - \text{випромінювання чорного тіла.}$$

Випромінювання чорного тіла ( $B_{\lambda}$ ) при температурі  $T_S$  можна отримати, з рівняння (4.7):

$$B_{\lambda}(T_S) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon} \quad (4.8)$$

Звідси вже можна отримати  $T_S$ , використовуючи закон Планка як:

$$T_S = \frac{K_2}{\ln \left( \frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{\uparrow}}{\tau\varepsilon}} \right)} L_{\lambda}^{\downarrow} \quad (4.9)$$

де  $K_1$  та  $K_2$  - калібрувальні константи для даних Landsat.

### Алгоритм розділеного вікна

У попередніх дослідженнях було представлено різні алгоритми розділеного вікна (Split Window Algorithms (SWA)) для різних датчиків [39], а детальна інформація про SWA наведена в [40]. В цій роботі ми розглядаємо

алгоритми розділеного вікна з коефіцієнтами перепараметризованими у [39], що відповідають кривій спектрального відбиття Landsat 8 TIRS.

Геологічна служба США рекомендувала не використовувати смугу 11 Landsat 8 для отримання LST через велику калібрувальну невизначеність. Однак деякі дослідники стверджують, що вони отримали задовільні результати за допомогою алгоритми розділеного вікна [39]. Тому в цьому дослідженні ми також аналізуємо алгоритм розділеного вікна. Згідно з алгоритмом розділеного вікна, LST ( $T_S$ ) можна обчислити за допомогою наступного рівняння:

$$T_S = T_{10} + B_1(T_{10} - T_{11}) + B_0 \quad (4.10)$$

де

$$B_0 = \frac{C_{11}(1 - A_{10} - C_{10})L_{10} - C_{10}(1 - A_{11} - C_{11})L_{11}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}} \quad (4.11)$$

$$B_1 = \frac{C_{10}}{C_{11}A_{10} - C_{10}A_{11}} \quad (4.12)$$

$$A_{10} = \varepsilon_{10}\tau_{10} \quad A_{11} = \varepsilon_{11}\tau_{11} \quad (4.13)$$

$$C_{10} = (1 - \tau_{10})(1 + (1 - \varepsilon_{10})\tau_{10}), \quad C_{11} = (1 - \tau_{11})(1 + (1 - \varepsilon_{11})\tau_{11}) \quad (4.14)$$

Тут  $\varepsilon_{10}$  та  $\varepsilon_{11}$  - LSE для смуг 10 і 11 відповідно;

$\tau_{10}$  і  $\tau_{11}$  - атмосферне пропускання атмосфери для смуг 10 і 11, відповідно.

## Моделі випромінювальної здатності земної поверхні (LSE)

Випромінювальна здатність земної поверхні LSE ( $\epsilon$ ) – це здатність поверхні перетворювати теплову енергію в енергію випромінювання [41]. Випромінювальна здатність земної поверхні є одним з ключових параметрів для отримання точних даних температури земної поверхні з за допомогою даних дистанційного зондування. Напівемпіричні методи, фізично обґрунтовані методи та багатоканальні методи розділення температури/випромінювальної здатності є трьома різними категоріями для отримання LSE з космосу. Фізично обґрунтовані методи і багатоканальні методи не можуть бути застосовані до даних Landsat для отримання LSE через обмеження, наведені в багатьох дослідженнях, такі як вимога більш ніж двох TIR-діапазонів або нічних знімків. Напівемпіричні методи визначення випромінювальної здатності земної поверхні містять метод *випромінювальної здатності на основі класифікації* [34] та метод *оцінки випромінювання на основі нормалізованого диференційного індексу рослинності NDVI* [41], які підходять для оцінки LSE за даними Landsat. Метод випромінювальної здатності на основі класифікації генерує зображення LSE з класифікованого зображення шляхом застосування значення випромінювальної здатності для кожного класу. Однак, метод випромінювальної здатності на основі класифікації не є практичним, оскільки вимагає хорошого знання досліджуваної території та вимірювань випромінювальної здатності на поверхнях, репрезентативних для різних класів. Методи на основі NDVI є оперативними і найбільш часто використовуваними методами пошуку LSE, оскільки вони прості у застосуванні і дають задовільні результати [41].

### Модель Ван де Грінд та Ове

Ця модель була застосована до методів пошуку LST всіх серій Landsat (Landsat 5 TM, 7 ETM+, та 8 OLI/TIRS). В роботі [36] було запропоновано логарифмічний підхід для пошуку LSE на основі NDVI в діапазоні від 0,157

до 0,727. NDVI отримують з використанням ближнього інфрачервоного (NIR) та червоного (R) діапазонів. Запропонована модель має вигляд:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.0471 \ln(NDVI) \quad (4.15)$$

### Модель Валор та Каселлес

Валор і Каселлес в роботі [42] запропонували теоретичну модель, що може бути застосована до усіх серій Landsat, яка пов'язує випромінювальну здатність з NDVI певної поверхні за допомогою коефіцієнта:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 P_1 + \varepsilon_s (1 - P_v) + 4 \langle d\varepsilon \rangle P_v (1 - P_v) \quad (4.16)$$

$\varepsilon_s$  і  $\varepsilon_v$  представляють випромінювальну здатність рослинності і ґрунту відповідно;

$\langle d\varepsilon \rangle$  - член, що враховує ефект порожнин, який залежить від геометрії поверхні.  $P_v$  (також відомий як фракційний рослинний покрив) – це частка рослинності, яка розраховується за формулою:

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad (4.17)$$

де  $NDVI_{\max} = 0,5$  і  $NDVI_{\min} = 0,2$  у глобальній ситуації [42]. Як запропонували Валор та Каселлес,  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  приймаються 0,985 і 0,960, відповідно. Крім того, було розраховано середнє значення для члена  $\langle d\varepsilon \rangle$  як 0,015.

### Модель LSE на основі порогового значення NDVI ( $NDVI^{THM}$ )

У роботі [36] пропонується оцінювати LSE на основі NDVI порогових значень ( $NDVI^{THM}$ ), розглядаючи три різні випадки, як представлено в рівнянні (4.18). У першому випадку ( $NDVI < 0,2$ ) піксель розглядається як голий ґрунт, а випромінювальна здатність отримується зі значень відбиття в червоній області. У другому випадку ( $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$ ) піксель складається з

сумішшю голого ґрунту та рослинності, а в третьому випадку ( $NDVI > 0.5$ ) пікселі зі значеннями  $NDVI > 0.5$  вважаються повністю вкритими рослинністю.

$$\varepsilon = \begin{cases} a_i \rho_R + b_i \\ \varepsilon_1 + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon, \end{cases} \quad d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v)F_{\varepsilon_v}$$

(4.18)

$$NDVI < 0.2$$

$$0.2 \leq NDVI \leq 0.5$$

$$NDVI > 0.5$$

У рівнянні (4.18)  $\rho_R$  - це значення коефіцієнта відбиття червоної смуги,  $a_i$  та  $b_i$  оцінюються з емпіричного співвідношення між коефіцієнтом відбиття червоної смуги та зображенням спектрорадіометра з середньою роздільною здатністю та бібліотекою випромінювальної здатності.  $\varepsilon_v$  та  $\varepsilon_s$  - випромінювальна здатність ґрунту і рослинності, відповідно.  $d''$  - ефект порожнини ефект порожнин, зумовлений шорсткістю поверхні, як і в попередній моделі ( $d\varepsilon = 0$  для плоских поверхонь).  $F$  - геометричний коефіцієнт форми, прийнятий за середнє значення 0,55.

Отже, було розглянуто три алгоритми визначення *температури земної поверхні* (LST) – алгоритм одного вікна, одноканальний алгоритм та метод рівняння переносу випромінювання. Оскільки випромінювальна *здатність земної поверхні* (LSE) є одним з найважливіших факторів, що впливають на точність методів пошуку LST, було також розглянуто різні моделі на основі NDVI. Три моделі на основі NDVI, а саме: Модель Ван де Грінд та Ове, Модель Валор та Каселлес, а також модель на основі порогового значення NDVI (NDVITHM) були розглянуті для даних Landsat 5 TM і 7 ETM+.

Теплові смуги мають власну просторову роздільну здатність 120м, 60м і 100 м для Landsat 5 TM, 7 ETM+ і 8 TIRS, відповідно, але вони надаються кінцевим користувачам з роздільною здатністю 30 м після

передискретизації кубічною згорткою. Різні методи зменшення масштабу для даних TIR або LST можуть бути використані в подальшій роботі для дослідження точності LST.

Використання даних про температуру земної поверхні (Land Surface Temperature, LST) та випромінювання земної поверхні (Land Surface Emissivity, LSE) з дистанційного зондування в дослідженні урбанізованих територій має широкий спектр застосувань. Вимірювання LST дозволяє визначити тепловий режим різних районів міста, що може бути корисним при розробці генеральних планів та дизайну міського середовища. Дані LST допомагають виявляти та вивчати міські теплові інверсії в залежності від типів забудови та наявності зелених зон, що важливо для аналізу мікроклімату та якості повітря в містах.

Дослідження LST може служити основою для визначення теплового комфорту та ідентифікації територій, де необхідно впроваджувати заходи для поліпшення міського середовища. Слідкування за змінами LST дозволяє вивчати розвиток урбанізованих територій та їх вплив на оточуюче середовище.

***В цілому, дані про температуру земної поверхні та випромінювання земної поверхні з дистанційного зондування є потужним інструментом для вивчення міських областей та урбанізованих територій, дозволяючи отримувати інформацію про тепловий режим та взаємодію міста з навколишнім середовищем.***

## **4.2. Розробка методів і засобів для визначення стабільних островів теплової енергії**

Методики моніторингу теплових островів міста мають ширшу ніж для тепличних господарств номенклатуру засобів. Для масштабу окремої вулиці доцільними є наземні дослідження з тепловізійною камерою, методика розроблена Esraa Elmarakby (2022) в [49] вимірів передбачає зустрічні виміри з різних кінців вулиці, що забезпечить високу точність та вибірковість проте це важко реалізувати для масштабу міста. Для окремого району ефективною є використання БПЛА з спеціалізованими тепловізійними камерами, проте за чинним законодавством польоти БПЛА над містом дещо обмежені на законодавчому рівні. При дослідженні міських теплових полів з використанням БПЛА передусім їх розглядали в критичні сезони року щодо максимальних температур, в аспекті міського сільського господарства більш важливими є періоди мінімальних температур, при яких експлуатація найбільш розповсюджених малогабаритних акумуляторних БПЛА дещо обмежена.

Альтернативою БПЛА щодо отримання масштабних даних є супутникові технології, при цьому для оцінки островів тепла використовують як опосередковані так і прямі методики вимірювання. Впровадження опосередкованих методів пояснювалось порівняно незначною кількістю супутників оснащених спеціалізованим обладнанням а також неможливістю їх роботи у хмарну погоду. Умовно опосередковані методики можна поділити на 2 групи а саме оцінки динаміки змін вегетаційних індексів та фіксації освітлення, яке має відповідати локації промислових об'єктів та місць компактного проживання населення міст. Підходи щодо супутникового моніторингу динаміки змін стресових станів насаджень для міст та оцінки площі дерев та газонів на прикладі Києва (України) представлено в роботі N.Pasichnyk (2021) в [50]. Недоліком таких методів є складність ідентифікації рослин що перебувають в тіні від висотної забудови притаманної особливо

новим районам сучасних мегаполісів. Незалежно від пори року використання нічних супутникових знімків дозволяє оцінити не тільки ідентифікувати локації стабільних викидів тепла показані в роботі [38] а і за даними [39] потенціал викидів CO<sub>2</sub>, що є особливо важливим для живлення рослин. Нічна супутникова зйомка потребує супутників із високою роздільною здатністю спектрального сенсорного обладнання на геостаціонарних орбітах, які станом на 2021 рік недоступні на більшості території України. Слід відзначити, що цілодобова зйомка для моніторингу теплових островів міст має високий потенціал для наукового та практичного використання оскільки в роботі [27] по дослідженням Бостону (США) було встановлено що частина теплових островів міста має принципову добову специфіку. Методики непрямих вимірів можуть використовуватись одночасно і доповнювати одна-одну для підвищення точності та вибіркової як показано на прикладі Гонконгу [40] проте враховуючи регіональну специфіку взимку на території України вони обмежено придатні.

Прямі виміри теплових параметрів поверхні можливо здійснювати з використанням таких супутників як EOS(TERRA, AQUA), METOP, Suomi-NPP, Landsat досвід використання яких щодо моніторингу теплових полів представлено в [36,37,38]. У порівнянні з БПЛА супутникові платформи мають нижчу роздільну здатність знімків та не можуть працювати при наявності хмар, проте саме з їх використанням легко забезпечити серії дослідів і за рахунок великої площі охоплення здійснити калібрування даних базуючись на наземні вимірювання.

### **Методика експерименту**

**Об'єкт досліджень.** Дослідження проводились в м. Києві, найбільшому мегаполісі України. Перелік загальнодоступних для цієї території супутників із наявним тепловим каналом вимірювань в складі сенсорного обладнання приведено в таблиці 1.1 (Розділ 1).

Для наукових та практичних досліджень регіонального масштабу найбільшу цінність становлять дані температури земної поверхні середнього

масштабу. Для проведення дослідження актуальними є дані КА Landsat 8 та 9, оскільки, мають допустиме просторове розрізнення та актуальні на теперішній час. Загалом дані про температуру земної поверхні можна отримати з 1982 (від початку роботи КА Landsat-4). Крім того, при кількісному аналізі даних теплового інфрачервоного датчика для оцінки температури Геологічна служба США рекомендує використовувати дані Landsat 8 Band 10, доступ до таких даних можливий з використанням спеціалізованого EO браузеру інтерфейс якого представлено на рис. 4.1.

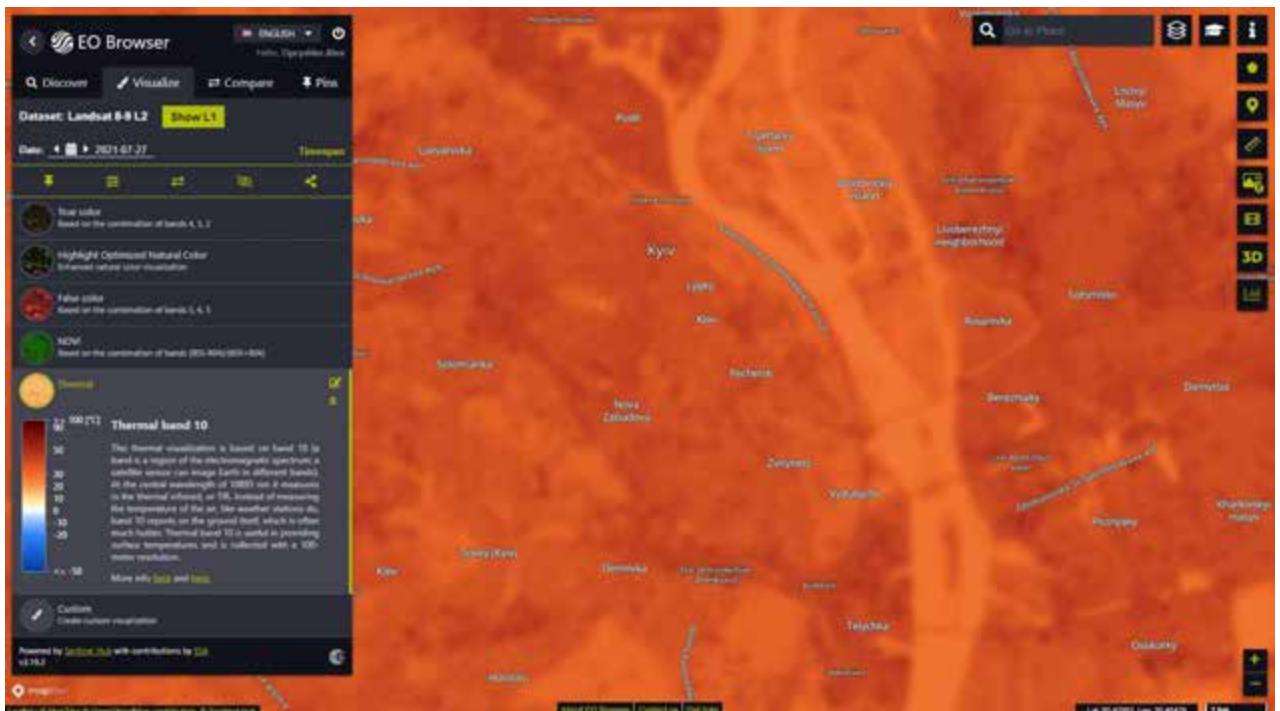


Рис. 4.1. Інтерфейс EO Browser для карти розподілу теплових полів м. Київ на 2021.07.27

Означений інтерфейс передбачає єдину шкалу для індикації температури поверхні від  $-50$  до  $+100$  °C, завдяки чому візуально у умовах міста вкрай важко виділити теплові аномалії, оскільки діапазон розподілу температур в місті навіть в літні місяці не перевищує  $25^{\circ}\text{C}$ . На сайті передбачено можливість завантаження даних супутникової зйомки для їх подальшої обробки в спеціалізованих GIS системах, таких як QGIS, для якої створені спеціальні plugin такі як Q-LIP, для обробки даних від Landsat, запропоновані в [39]. З використанням QGIS для карти розподілу теплових

полів було запроваджено іншу палітру кольорів, яка налагоджувалась виходячи з максимальної та мінімальної температури.

Було обрано ділянки які належали до усього спектру температур зафіксованих на супутниковому теплового знімку приведеному на рис. 4.2.

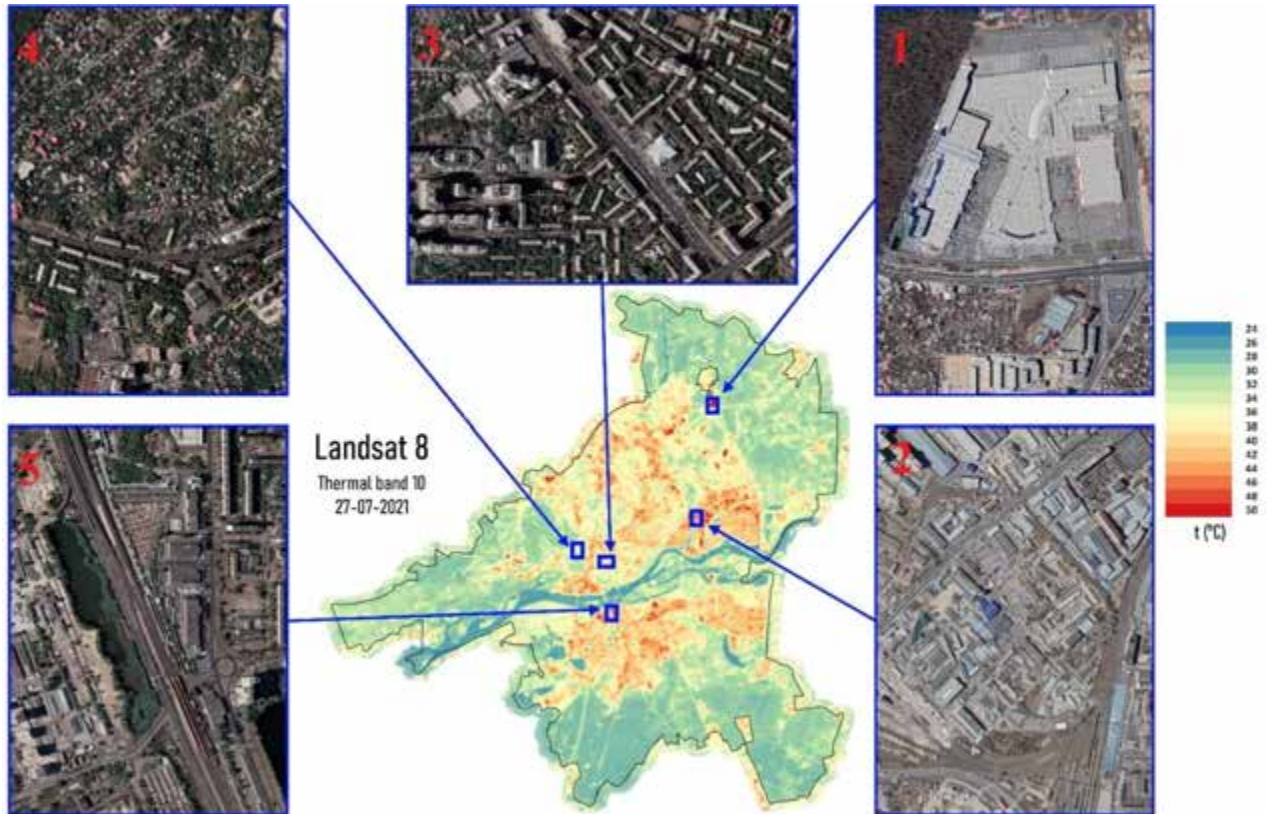


Рис. 4.2 Карта розподілу температури поверхні для м. Києва на 2021.07.27

Для проведення досліджень було вибрано 5 характерних ділянок міста стосовно теплових островів визначених в літку 2021 року у довоєнний період.

1. Розміри дослідних ділянок (50×70 пікселів) було вибрано виходячи з габаритів теплового острова обумовленого функціонуванням торгівельно-розважального центру «Lavina Mall», який є найбільшим в Україні. Центр збудовано в 2016 році на околиця м. Київ.

2. Ділянка в Подольському районі, що характеризується комплексом виробничих та складських приміщень.

3. Ділянка поблизу Торгового центру «Дім меблів» в Печерському районі, яка характеризується забудовою радянських часів із сучасними

торгівельними майданчиками на підземних ярусах та станцією метро «дружби народів».

4. Ділянка в Голосіївському районі здебільш приватного сектору з низькою концентрацією населення та великими зеленими зонами парків та присадибних господарств.

5. Ділянка в Дарницькому районі, частина якої займає масив металевих гаражів для легкових автомобілів а також озеро (Нижній Тельбін).

Під час попередніх досліджень було виявлено теплові острови, але цілком можливим є випадковий характер цих проявів тому разові дослідження є неприйнятними для побудови стратегії щодо міського сільського господарства. Якщо для разових досліджень використання спеціалізованого програмного забезпечення (QGIS чи його аналогів) доцільно для серійних дослідів доцільно розробити спеціалізоване програмне забезпечення. Оскільки міське сільське господарство потребує задіяння фахівців з різних галузей, а саме агрономів, агрохіміків, біологів тощо у яких цілком можливі обмежені знання щодо використання універсальних GIS систем тому, на думку авторів, перспективними є використання web-інтерфейсів аналогічних EO Browser.

***Розробка програмного забезпечення для дослідження температурних островів щодо потреб міського сільського господарства.***

Алгоритм для запропонованого web додатку представлено на рис. 4.3.

Додатково в описі призначення блоків програми приведено і основні програмні коди (виділено курсивом):

***1. Підготовка даних:***

***1.1 - Завантаження колекції LANDSAT 8 (load)***

Завантаження колекції LANDSAT 8 в яку входять дані після атмосферної корекції датчиків Landsat 8 OLI/TIRS. Тобто містять 3 видимих, 2 ближніх інфрачервоних (VNIR) та 2 короткохвильові інфрачервоні (SWIR) діапазони, оброблені до ортовипрямленого поверхневого відбиття, крім того і дві теплові інфрачервоні (TIR) діапазони, оброблені до ортовиправленої яскравості.



#### 1.4 - Маскування хмарності та тіні хмар на всіх екземплярах колекції (updateMask)

Застосування до колекції функції маскування на основі каналу pixel\_qa даних Landsat 8, в якому біти 3 та 5 - це тінь хмари та хмара відповідно. 8-бітний канал pixel\_qa описує якість пікселів у сцені та дозволяє визначити їх придатність для використання.

- *function maskL8sr(col) {*
- *var cloudShadowBitMask = (1 << 3)*
- *var cloudsBitMask = (1 << 5)*
- *var qa = col.select('pixel\_qa')*
- *var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)*
- *.and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0))*
- *return col.updateMask(mask) }*

#### 1.5 - Вибір необхідних каналів (select)

Вибір необхідних для подальших розрахунків каналів, а саме B2 (синій, 0,452-0,512 мкм), B3 (зелений, 0,533-0,590 мкм), B4 (червоний, 0,636-0,673 мкм), B5 (ближній інфрачервоний 0,851-0,879 мкм) та B10 (тепловий інфрачервоний, 10,60-11,19 мкм).

- *var col = dataset.map(function(image) {*
- *return image.select('B10', 'B5', 'B4', 'B3', 'B2')})*

#### 1.6 - Отримання списку дати та часу зйомки доступних знімків (dataset.aggregate\_array)

Створення масиву з елементами дата та час зйомки всіх доступних знімків по території інтересу для подальшої його передачі в селектор вибору дати.

- *var allDates = ee.List(dataset.aggregate\_array('SENSING\_TIME')).sort().reverse()*

2. **Зміна дати в селекторі** Для ідентифікації стабільних теплових островів міста доцільно вивчати зміни показників щонайменше впродовж року, проте для вимірів придатні лише ділянки знімків позбавлені хмар,

система автоматично відфільтрує знімки хмарність яких перевищує 30%. Оскільки на цей час є певний дефіцит спектральних даних, передбачено можливість експертної оцінки придатності теплової зйомки коли додатковим шаром висвітлюється знімок у видимому діапазоні для ідентифікації накладання хмар.

### 2.1 - Вибір екземпляру з колекції (filter().first)

Застосування фільтру до колекції по даті та часу зйомки для отримання конкретного екземпляру.

- `.filterMetadata('SENSING_TIME', 'equals', date).first()`

### 2.2 - Розрахунок LST (calculate LST)

Підхід для аналізу теплових інфрачервоних спостережень базується на використанні одного каналу B10 Landsat 8, що перераховується в LST. Випромінювальна здатність Landsat 8 по району інтересу оцінюється на основі діапазонів видимого та ближнього інфрачервоного діапазону Landsat. Враховуючи рослинний покрив, випромінювальна здатність Landsat з поправкою на рослинність оцінюється за коефіцієнтом випромінювання голого ґрунту та коефіцієнтом випромінювання рослинності.

- `var ndvi = image.normalizedDifference(['B5', 'B4']).rename('NDVI');`
- `var thermal = image.select('B10').multiply(0.1)`
- `var minndvi = ee.Number(ndvi.reduceRegion({reducer: ee.Reducer.min(), geometry: geometry, scale: 30, maxPixels: 1e9}).values().get(0));`
- `var maxndvi = ee.Number(ndvi.reduceRegion({reducer: ee.Reducer.max(), geometry: geometry, scale: 30, maxPixels: 1e9}).values().get(0));`
- `var fv = (ndvi.subtract(minndvi).divide(maxndvi.subtract(minndvi))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');`
- `var EM = fv.multiply(ee.Number(0.004)).add(ee.Number(0.986)).rename('EMM');`
- `var LST = thermal.expression('(Tb/(1 + (0.00115 * (Tb / 1.438)) * log(Ep)))', {Tb: thermal.select('B10'), 'Ep': EM.select('EMM')}).rename('B10');`

### 2.3 - Візуалізація шарів (addLayer)

Land\_Surface\_Temperature\_Landsat\_8\_band\_10 – відображає розраховане по обраному екземпляру колекції теплове випромінювання поверхні, до якого застосовується палітра за замовчуванням (мінімальне значення – 10 °С, максимальне значення 30 °С);

True\_Color\_Landsat\_8\_bands\_4\_3\_2 - композит видимих ділянок електромагнітного спектру у відповідних каналах червоного, зеленого та синього кольорів, в результаті чого виходить відображення природного кольору.

### *3. Вибір контрольної точки на дослідній ділянці. (onClick)*

При попередньому тестуванні програми було виявлено методичні складнощі щодо визначення оптимального діапазону температур для його подальшого кодування у вигляді палітри кольорів. Для літніх місяців мінімальну температуру визначали виходячи з архівних даних мете спостережень температури води в річці Дніпро в м.Київ, а максимальну визначали в експертному режимі. Для зимових місяців такий підхід щодо визначення нижньої межі температурного діапазону виявився неприйнятним. Для полегшення роботи оператора до програми було додано додатковий модуль вибору контрольної точки (коло радіусом 30 м) яка встановлювалась безпосередньо на карті з допомогою миші (рис. 4). При виборі контрольної точки оператор отримував значення її температури. Зміна контрольної точки відбувалась при наступному подвійному натисканні лівої клавіші миші в полі карти.

### 3.1 - Отримання координат точки (add point)

Оператор подвійним натисканням лівої клавіші миші вказує дослідну ділянку, яка виділяється колом червоного кольору.

- Map.onClick(function(coords){ ... }
- var click\_point = ee.Geometry.Point(coords.lon, coords.lat);

### 3.2 - Отримання та виведення характеристик (.buffer)

По ділянці території інтересу заданою точкою розраховується середнє значення температури в °K та °C.

```
var value = (LST).reduceRegion(ee.Reducer.mean(), click_point, 30).get('B10')
```

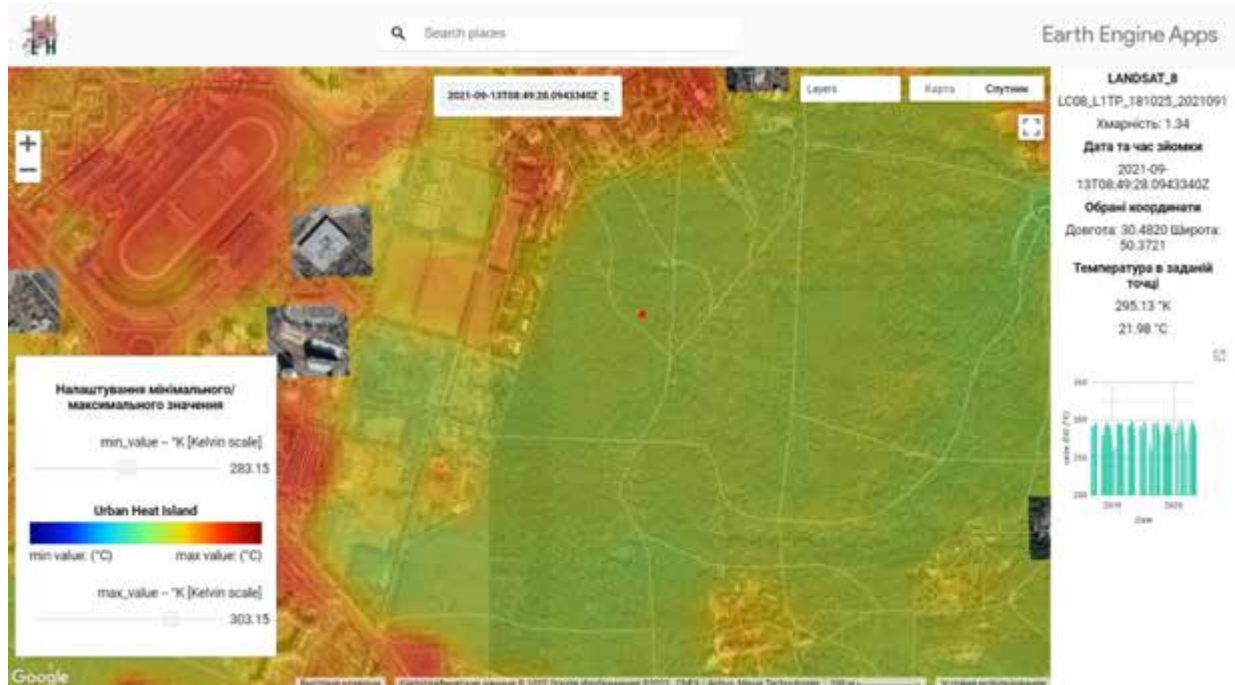


Рис. 4.4. Інтерфейс програми щодо дослідження теплових полів із встановленням контрольної точки (червоне коло) та її характеристик щодо координат, величини температури та графіку зміни температури з наявних в архіві даних попередніх спостережень (права частина інтерфейсу)

### 3.3 – Побудова графіку ( `.get() properties` )

По ділянці території інтересу заданою точкою приводиться графік зміни показника за весь обраний період. Для обчислення даної статистики колекцій зображень застосовується оператор згортки `reduce()`.

- ```
var chart = ui.Chart.image.seriesByRegion({imageCollection: dataset2, regions: click_point.buffer(30), reducer: ee.Reducer.mean(), band: 'B10', scale: 30, xProperty: 'system:time_start' }) .setOptions({ titlePosition: 'none', legend: {position: 'none'}, hAxis: {title: 'Date'}, vAxis: {title: 'value B10 (°K)}, series: {0: {color: '23cba7'}} }) .setChartType('ColumnChart');
```

### 3.4 Формування серії зображень по регіону (*Chart.image.seriesByRegion*)

Кодування інформації щодо розподілу температури поверхні у вигляді палітри кольорів

### 3.5 Формування вихідної графічної інформації (**Visualization Chart and Properties**).

Готові данні, які за потреби можуть бути експортовані до інших програмних продуктів.

**Статистична обробка результатів для дослідних ділянок.** Оскільки в межах ділянки, яка складається з кількох сотень точок температура поверхні може істотно відрізнятись тому карту розподілу, закодовану у вигляді кольорової палітри, обробляли в математичному пакету MathCad за методикою описаною в D.Комарчук (2020) в [40] та N.A.Pasichnyk (2021) в [41]. Методику декодування даних було модифікована і замість кольорової моделі RGB використовували альтернативну модель кольороутворення HSL. Оскільки розглядали систему кодування інформації у вигляді палітри тому для кольорової моделі HSL розглядали один параметр **Hue (is a degree on the color wheel from 0 to 360)**, замість 3 притаманних для кольорової моделі RGB, що полегшало обробку даних.

#### **Аналіз отриманих результатів**

Температурна карта міста Київ від 23.01.2021 свідчить, що в межах міста зафіксована з допомогою супутнику Landsat 8, різниця становить біля 5 °C (рис. 4.5). При цьому для частини об'єктів Pechersk, Podol, Tsimbal описується нормальним розподілом (по аналогії з роботою D.Комарчук (2020) в [50] було обрано модель Gauss рівняння (4.19)) із коефіцієнтом детермінації  $R^2$  більшим ніж 0,96.

$$N = Ae^{-\frac{(t-t_c)^2}{2w^2}} \quad (4.19)$$

Де: N – кількість пікселів (мінімальних ділянок зображення);

A – амплітуда;

t – температура (°C),  $t_c$  – середнє значення температури (°C);

w – стандартне відхилення (відповідає значенню A/2).

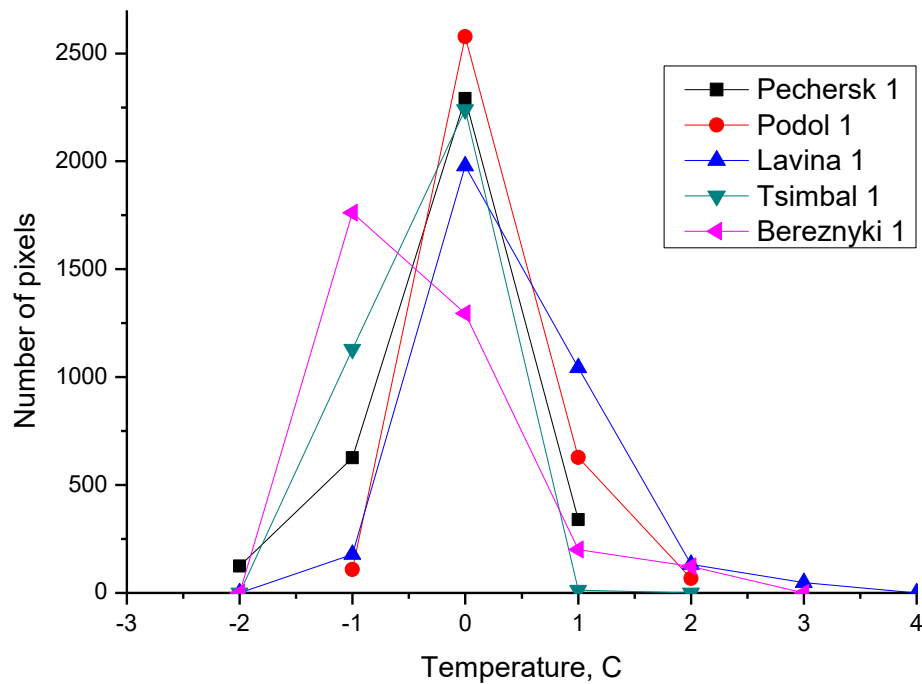


Рис. 4.5. Розподіл температури для дослідних об'єктів  
в м. Києві від 23.01.2021

Для ділянок Lavina та Bereznyki ситуація інша, що ймовірно можна пояснити наявністю на ділянці об'єктів і принципово різним тепловим випромінюванням. Якщо на ділянці Lavina кількість ділянок з мінімальною та максимальною температурою приблизно однакова, то для локації Bereznyki ситуація інша – кількість ділянок з мінімальною температурою в кілька разів вища. Причиною цього, на думку авторів, є наявність значної кількості водойм (низька температура) на локації Bereznyki а максимальні температури є наслідком функціонування торгівельно-офісних споруд із значними викидами тепла. З огляду на перспективи урбанізованого сільського господарства стабільна різниця в 3-5 °C взимку є важливим чинником стосовно можливості культивування не морозостійких рослин в означених локаціях.

Окрім зимових місяців для рослинництва визначальними є весняно-осінній періоди стосовно розвитку процесів вегетації а також літній період стосовно посухи. Виходячи з результатів січневого моніторингу дослідні ділянки були поділено на дві групи а саме Pechersk, Podol, Tsimbal та Lavina, Bereznyki (рис.7). Оскільки для моніторингу у весняно-осінній період діапазон

температури становив 5-25 °С, а в літній 30-50 °С для оцінки островів тепла розглядали не абсолютне значення температур а саме різницю між мінімальною та максимальною температурою по карті. Отримані результати для першої групи ділянок приведено на рис. 4.6.

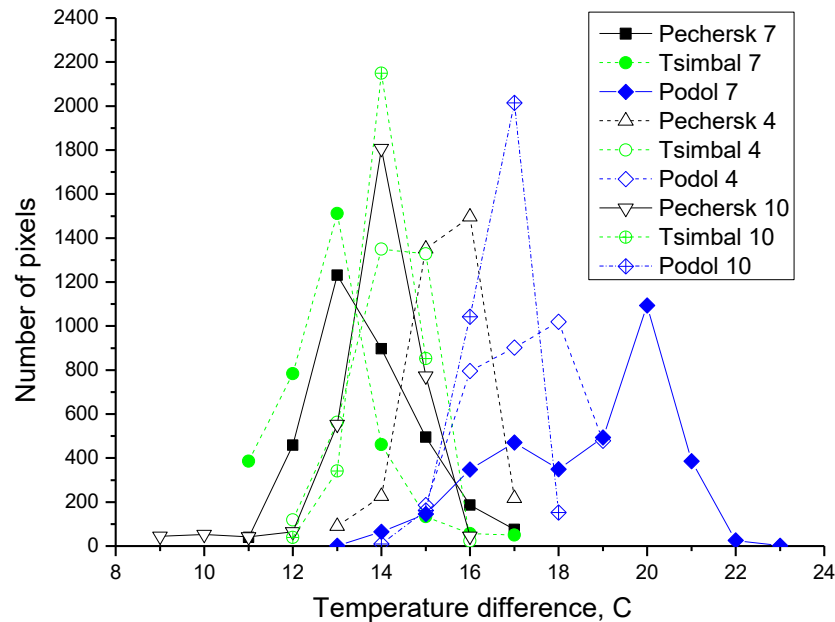


Рис. 4.6. Розподіл різниці температур для дослідних об'єктів в м. Києві для 06.04.2021, 15.10.2021 та 01.07.2021

При статистичному аналізі було встановлено що характер розподілу не змінився і коефіцієнт детермінації  $R^2$  для ділянок Pechersk та Tsimbal, незалежно від пори року, перевищує 0,98. Для обох ділянок мінімальне значення стандартного відхилення було зафіксовано в січні і становило біля 0,5°C а максимум в липні біля 1°C. На відміну від попередніх ділянок в групі для ділянки Podol величина  $R^2$  в липні було зафіксовано в 0.51, а в квітні 0,8 в той час як в січні і жовтні вона по аналогії з попередніми ділянками становила 0,98. Для цієї ділянки мінімум стандартного відхилення було зафіксовано в січні та жовтні 0,46°C та 0,59 °C відповідно, проте в квітні та липні він зріс до 1,4 °C та 1,9 °C відповідно. Тобто якщо для ділянок житлового масиву з парковими зонами зростання стандартного відхилення в літку у порівнянні із зимовим спостереженням відбулось в 2 рази то для

промислової зони Podol зростання відбулось в 4 рази, а в квітні відбулось трикратне зростання.

Ймовірним поясненням цього є недостатній рівень озеленення промислових майданчиків та плоскі бетонні та металеві дахи будівель притаманні саме промисловим та складським будівлям.

Більша концентрація нежитлових приміщень притаманна другій групі а саме ділянкам Bereznyki та Lavina, результати досліджень яких представлено на рис. 4.7.

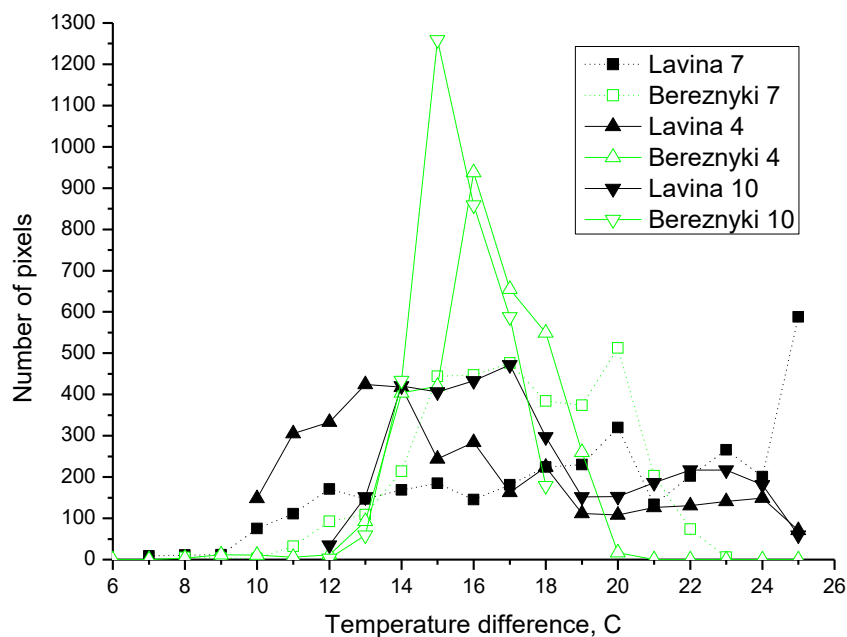


Рис. 4.7. Розподіл різниці температур для дослідних об'єктів в м. Києві для 06.04.2021, 15.10.2021 та 01.07.2021

Для ділянки Bereznyki величина  $R^2$  для січня, квітня, жовтня та липні становила 0.97, 0.94, 0.88 та 0.88 відповідно. Стандартне відхилення мінімальне в січні 0,5 °C та максимальне в липні 2,8 °C, в квітні та жовтні 1.7 °C та 1.2 °C відповідно. Таке зростання стандартного відхилення має сезонний характер і в літку воно пов'язане з появою аномально теплих ділянок які і призвели до зростання цього показнику. При аналізі фотознімку було виявлено велику кількість закритих металевих гаражів для легкового транспорту які завдяки поганій вентиляції сильно нагрівались вдень. Такий

тепловий острів в місті може бути нейтралізований за рахунок конструкційних рішень таких як нанесення відбиваючого покриття (фарби) на дах цих споруд з листового заліза.

Для ділянки Lavina результати були принципово інші. Величина  $R^2$  для січня, квітня, жовтня та липні становила 0.99, 0.54, 0.38 та 0.57 відповідно, тобто нормальний розподіл спостерігався лише в січні. Така ситуація може пояснюватись лише наявністю кількох стабільних джерел викидів тепла техногенного характеру. Для споруди сучасного торгівельно-розважального центру притаманно розміщення систем вентиляції та кондиціонування на даху, вплив якого і було зафіксовано при супутниковому моніторингу. Навіть в січні різниця температури на цій ділянці становила 4 °C, що цілком може бути використано для потреб міського сільського господарства. Тобто на прикладі комплексу Lavina було виявлено ділянку яка має стабільні викиди тепла техногенного характеру впродовж року. Розвиток на її базі рослинницьких практик може бути цілком виправданим як з енергетичних та логістичних питань так і покращити екологію навколишнього середовища. Оскільки площа теплових викидів взимку відносно мала і дах має горизонтальну проекцію тому використання традиційних ліан, спрямованих на вертикальні поверхні обмежено. Альтернативним озелененням можуть стати однорічні сланкі культури такі як тикви, дині тощо, які не потребують розгалуженої кореневої системи і мають велику площу листя тобто здатні затемнити будову при критичних перегрівках.

Висновки по розділу 4:

- Встановлено, що теплові острови міста цілком придатні для впровадження практики урбанізованого аграрного виробництва стосовно збільшення вегетативного періоду.
- На базі програмних продуктів від постачальників безкоштовних даних супутникового моніторингу було створено спеціалізоване програмне рішення для урбанізованого аграрного призначення.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ОСТРОВА ТЕПЛА ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЇВ

#### **5.1. Аналіз просторово-часових рядів даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні в період з 1992 року по 2018 рік для міста Києва**

Для побудови та аналізу просторово-часових рядів даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні для міста Києва у період з 1992 року по 2018 рік були використані багатоспектральні зображення в далекому інфрачервоному (тепловому) діапазоні, отримані за допомогою супутників Landsat 4-5 TM та Landsat 8 OLI/TIRS. Для отримання бази вихідних даних, придатних для подальшої обробки та отримання готових продуктів було проведено радіометричне калібрування зображень шляхом перерахунку даних, отриманих сенсором (калібрувальні коефіцієнти беруться з файлу метаданих для кожного зображення) у фізичну величину (спектральна щільність енергетичної яскравості випромінювання) за допомогою радіометричних формул [43]. Найбільші значення нагріву поверхні міста припадають на літні місяці, тому в якості базового місяця для досліджень був обраний серпень. Загалом було відібрано 9 знімків: 1992 р., 1995 р., 1997 р., 2001 р., 2004 р., 2008 р., 2015 р., 2018 р. Під час аналізу знімків було виділено 10 зон аномальної спеки, що сформувались за 26 років (рис. 5.1).

Аналіз рис. 5.1. показав, що багаторічний тренд середньої по місту температури поверхні відрізняється в різних районах Києва, а розвиток островів тепла має загальну тенденцію до збільшення як просторових характеристик, так і сили прояву явища. Зокрема, площа ОТ у м. Києві збільшилась більш ніж на 25% - з 154,6 км<sup>2</sup> у 1992 р. до 198,8 км<sup>2</sup> у 2018 р. Це пов'язано зі збільшенням площі вже сформованих островів тепла та появою нових. Зокрема, площа ОТ №8 з 1992 року зросла на 6,32 км<sup>2</sup>, тобто більш ніж

у 3 рази. Також, відбулось помітне збільшення площі ОТ № 1, 3, 5 та 7. З 2001 року почалося формування нового ОТ № 2 в Оболонському районі, де температура поверхні в серпні 2018 року перевищувала поверхневі температури прилеглих зон на 7-9°C. Водночас, острови тепла № 4 та 6 майже не зазнали змін конфігурації, однак змінилися їх температурні показники (температура поверхні в цих зонах зросла від 30°C у 1992 році до 35-38°C у 2018 році) [44].

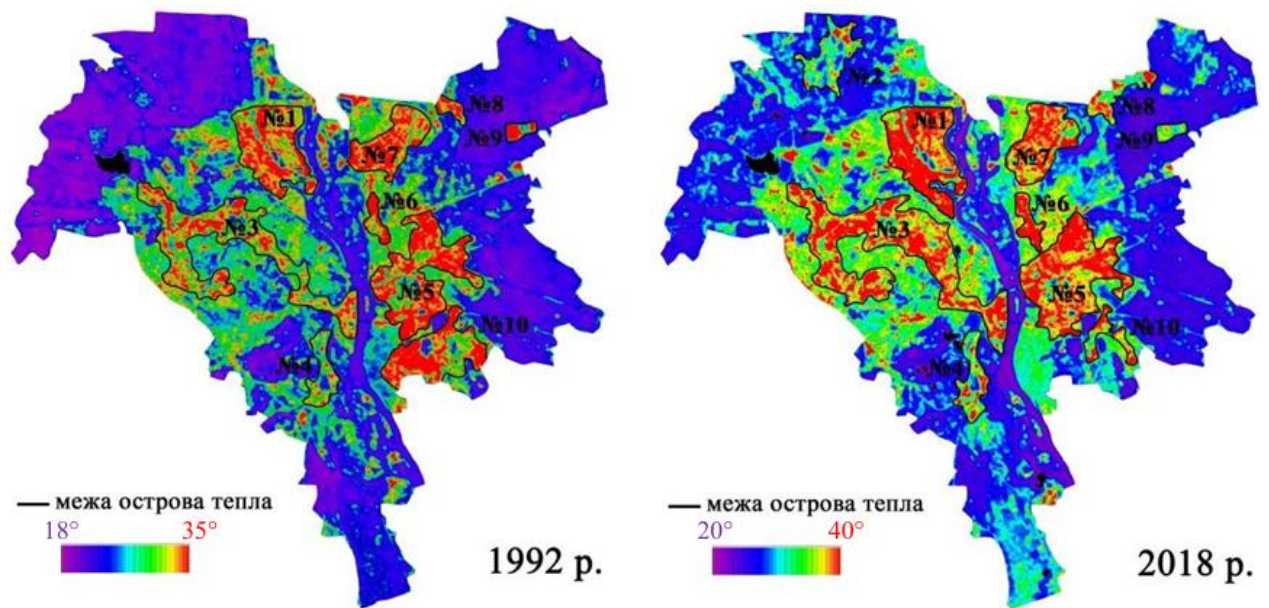


Рис. 5.1. Динаміка зміни островів тепла у м. Київ за 26 років [45,46]

На противагу загальній тенденції до збільшення просторових параметрів та температурних показників ОТ були помічені й позитивні тенденції до зменшення ОТ № 9 та 10. Для з'ясування загальних причин виникнення і розвитку ефекту острова тепла у Києві розглянемо кожен випадок окремо.

Найінтенсивніший прояв характерний для ОТ №1, що сформувався в районі ст. метро «Оболонь», Мінського масиву, ст. метро «Почайна» та Подолу. Температура поверхні тут може доходити до 40-42°C. Причинами формування є наявні у цій зоні щільна забудова, великі торговельні комплекси, заводи та потужна транспортна розв'язка. Ситуацію ще більше

погіршує зменшення лісопаркових зон в наслідок розбудови житлових масивів (детальне дослідження ОТ № 1 див. р. 4.3.).

Визначено, що температура земної поверхні є надійним індикатором вирубок зелених насаджень і може бути використана, як додатковий елемент в рамках регулярного космічного моніторингу екологічного стану лісопаркових зон Києва. Прикладом цього є зміна стану лісової зони на північному-заході Оболонського району (рис. 5.2.). У 1992 році ця частина лісових масивів мала найнижчі температурні показники нагріву поверхні в порівнянні з іншими частинами міста [44]. Так, температура поверхні тут коливалась від 18 до 22°C в залежності від погодних умов. Починаючи з 1995 року в лісовій зоні на півночі району почали проводитись неконтрольовані вирубки, що заклало передумови для формування ОТ №2 – відкриті знеліснені землі з оголеним ґрунтом або трав'янистим покривом, в порівнянні з температурою крон дерев, досить швидко нагріваються, що стає помітним при побудові теплових карт.

Ця тенденція зберігалася продовж наступних років і призвела до того, що у 2018 році в межах вже сформованого ОТ №2 температура поверхні в серпні доходила до 31°C і відрізнялась від прилеглих зон на 5-6°C. Як наслідок, ця буферна зона послабила свої «охолоджувальні» властивості, що стимулювало збільшення температури в області ОТ №1 [44].

Найбільшу конфігурацію має ОТ №3, що сформувався на межі Святошинського, Шевченківського, Солом'янського, Печерського та Голосіївського районів. Його площа становить 65,5 км<sup>2</sup>, а загальна протяжність – 18 км. Для того, щоб краще дослідити природу ОТ №3 його було поділено на 8 частин (рис. 5.3.) [44].

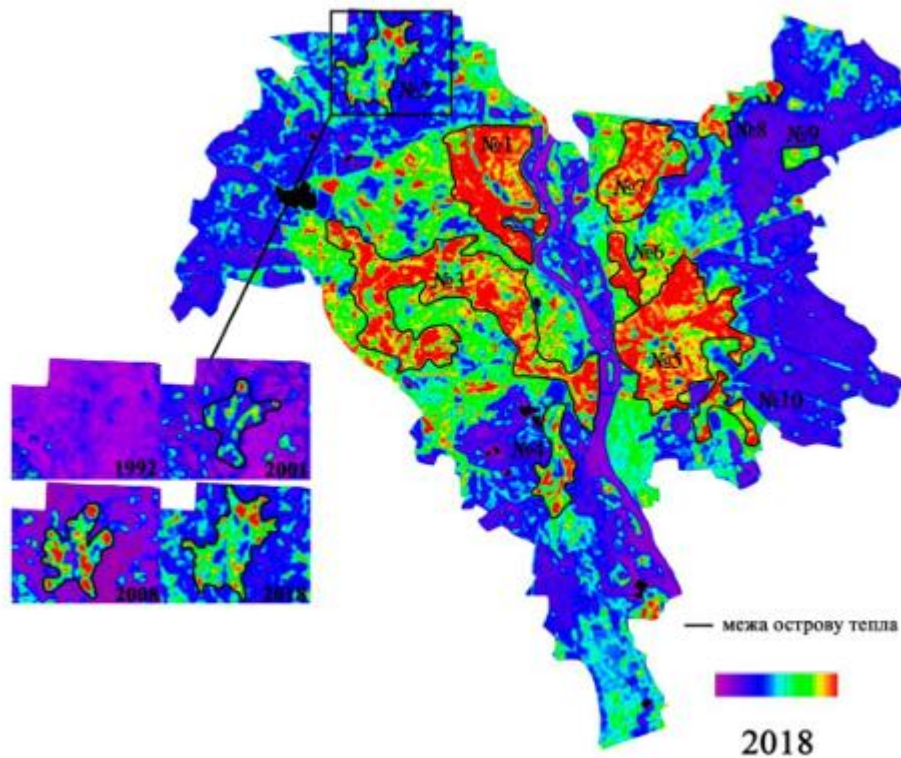


Рис. 5.2. Динаміка зміни острову тепла №2 у 1992, 2001, 2008 та 2018 роках [45, 46]

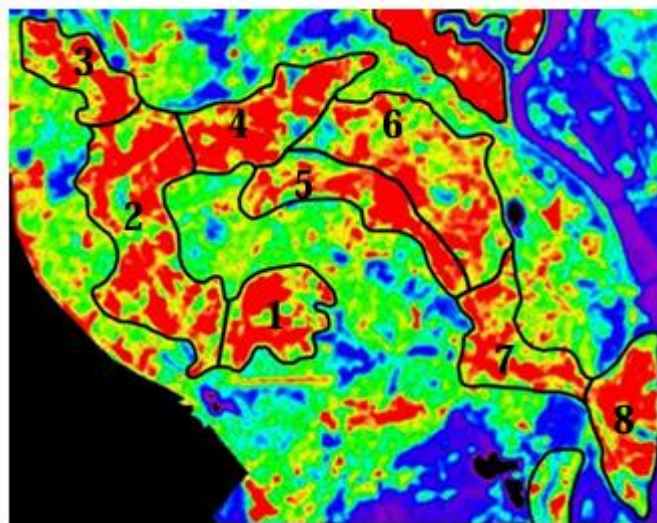


Рис. 5.3. Зональний поділ острову тепла №3 [45]

*1 частина:* аеропорт «Жуляни», що являє собою величезну забетоновану площу з відсутньою рослинністю. Таке покриття ґрунтів бетонним і асфальтовим покриттям порушує природну циркуляцію ґрунтових і поверхневих вод, випаровування і вологообмін, збільшує нагрівання

поверхні, що в кінцевому випадку призводить до формування ОТ з сильно підвищеними температурами.

*2 частина:* залізничні колії станції Київ-Волинський та прилегла до них промзона в районі Борщагівки, що простягаються від Проспекту Перемоги до вул. Нової. Тут розташовані залізнична станція «Алмаз», Борщагівський хіміко-фармацевтичний завод, Електротехнічний завод, Авторемонтний завод, поблизу станції «Святошин» знаходиться відкритий будівельний майданчик. За рахунок цих об'єктів згадана частина прогрівається більше за інші, тому температура поверхні тут сягає 40°C, в той час, як у всіх інших частинах даного ОТ вона коливається від 37 до 39°C.

*3 частина:* Академмістечко з щільною забудовою та завод «Антонов».

*4 частина:* район Шулявки, де знаходяться навчальні корпуси та гуртожитки КПІ, а також наявна широка транспортна розв'язка (Шулявський шляхопровід).

*5 частина:* Залізничний вокзал, Вагонна дільниця «Київ-Пасажирський» та залізничні колії з «забетонованими» ґрунтами та повною відсутністю рослинності. З півдня до залізничної станції також примикає Київський електровагоноремонтний завод. Тут температура поверхні сягає 39°C та відрізняється від прилеглих до цієї частини Солом'янському парку та Протосовому Яру на 10°C.

*6 частина:* центральна частина Києва, що починається від Хрещатика з Бессарабським ринком, включає Старий Київ і простягається до Лук'янівки. Причина значного розширення ОТ у цій зоні криється у збільшенні кількості нових будівель та реконструкції площ в центрі міста, коли значно була скорочена площа зелених насаджень, а газони перекриті штучними матеріалами (керамічна плитка, асфальт, бетон). Особливо це стосується площі Незалежності та вулиць, що підіймаються від вул. Хрещатик до Софії Київської. Ущільнення міської забудови та скорочення зелених зон в історичній частині міста Києва є особливо небезпечним, оскільки веде до

зростання поверхневої температури історичних будівель, що сприяє їх фізичному вивітрюванню і поступовому руйнуванню.

*7 частина:* район Деміївки та Видубичів з потужною транспортною інфраструктурою, де перетинаються магістралі підземного та наземного транспорту.

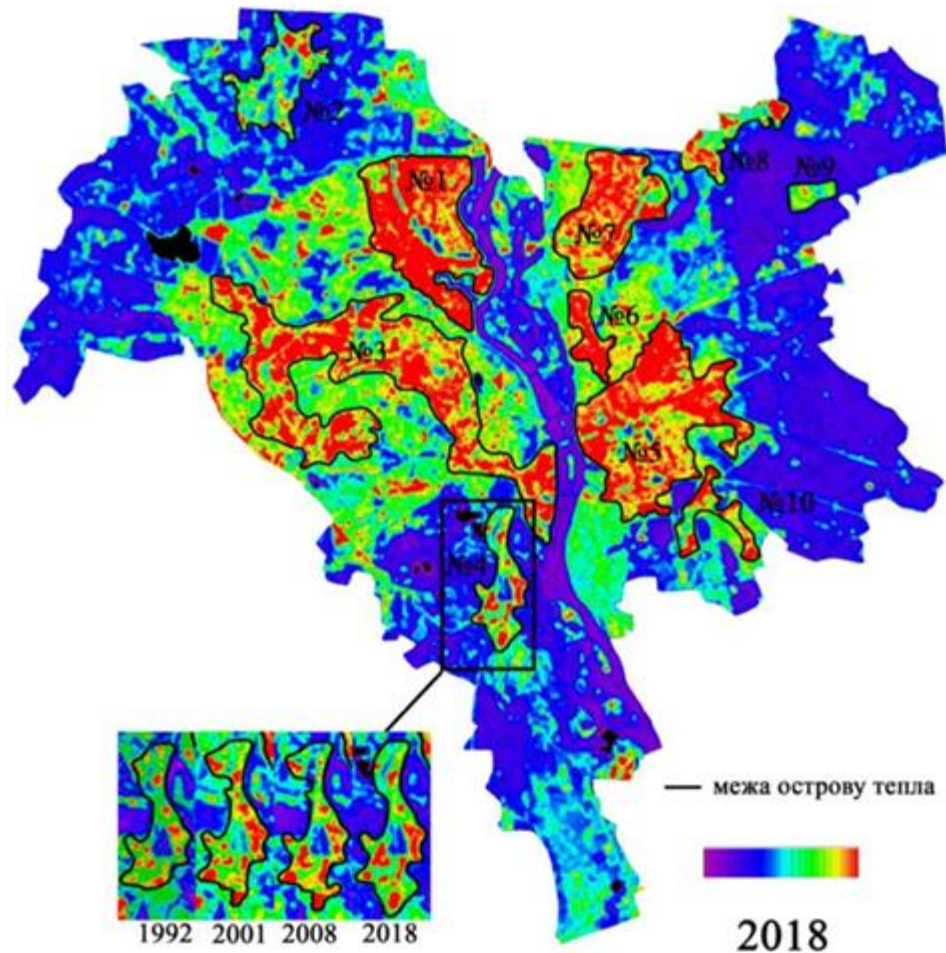


Рис. 5.4. Динаміка зміни острову тепла №4 у 1992, 2001, 2008 та 2018 роках [45, 46]

*8 частина:* промзона поблизу Видубичів, де знаходяться Металоцентр, Укрстальхолдинг, Видубичі ПАТ, Київпрофметал, Комбінат будіндустрії та інші промислові об'єкти. Отже, виникнення ОТ №3 є наслідком щільної забудови, незначної кількості деревних насаджень, та перекриття ґрунтів бетоном промислових зон і потужних транспортних розв'язок. В наслідок цього можемо бачити, що ця теплова зона значно збільшилась в розмірах з

1992 року і має тенденцію до подальшого розширення [44]. Острів тепла №4, що сформувався в центрі Голосіївського району поблизу місцевостей Конче-Заспа та Пирогово, є наслідком розташування в цій зоні авторинку, ТРЦ «Атмосфера», Київського та Дніпровського шосе, а також промислової зони (рис. 5.4.).

В порівнянні з іншими проявами ефекту ОТ, ця зона має помітно меншу тенденцію до сильного нагрівання поверхні. Навіть не зважаючи на те, що тут розташована промислова зона з майже відсутньою рослинністю, температура поверхні в межах ОТ у серпні не перевищує 35°C. Це, значною мірою, залежить від того, що дана місцевість оточена лісами, які здійснюють охолоджувальний ефект. Також тут не було помічено слідів вирубки або активної забудови, тому цей ОТ порівняно майже не збільшився у своїх розмірах за 26 років, не зважаючи на те, що показники температури поверхні зросли з 30°C у 1992 році до 35°C у 2018 році. Таким чином, приклад ОТ № 4 підтверджує факт того, що наявність великих лісопаркових площ з природним ґрунтово-рослинним покривом знижує загальну температуру і формує внутрішній мікроклімат району, створюючи більш комфортні умови проживання в довколишніх міських кварталах [44].

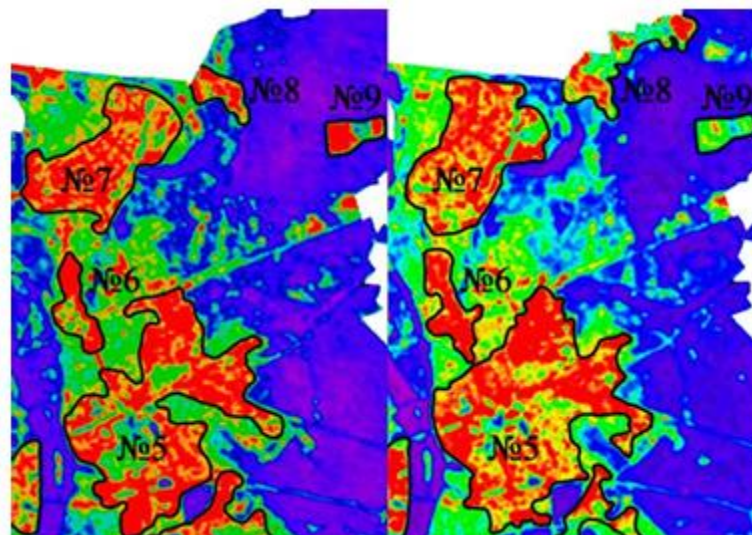


Рис. 5.5. Динаміка зміни островів тепла на лівому березі Києва з 1992 по 2018 роки [45, 46]

На лівому березі Києва найбільш прогрітими зонами є житловий масив Троєщина, ст. метро «Лісова», Воскресеньський масив, Березняки та Позняки, в межах яких сформувались чотири острови тепла (рис. 5.5.).

Межа ОТ №5 проходить від Лісового проспекту, вздовж проспекту Соборності на півночі Березняків до проспекту Миколи Бажана поблизу станції метро Осокорки та Позняки на півдні [44]. В межах ст. м. «Лісова» причинами сильного нагріву поверхні є ТРЦ «Проспект», Маркет-молл «Даринок» та ряди складських приміщень. Березняки, Позняки та Осокорки характеризуються щільною багатоповерховою забудовою та мінімальною кількістю зелених зон. На схід від Березняків розташований Дарницький вагоноремонтний завод (ДВРЗ). Також по вулиці Олекси Довбуша розміщується Український державний центр транспортного сервісу «Ліски» та станція Київ-Ліски, де відбувається відвантаження контейнерів, а залізничні колії простягаються на значну відстань. Розширення меж даного острову тепла, більшою мірою, пов'язано з розбудовою районів. Температура поверхні в межах ОТ становить 37-38°C, що на 15 градусів вище за температуру прилеглих лісопаркових територій. Житлові масиви Троєщина та Воскресенка (ОТ №6 та №7) є густозаселеними та мають щільну забудову, що і виступає причиною сильного нагріву поверхні до 33°C та 38°C відповідно (рис. 5.5.). Ці два острови тепла мають однакові передумови для формування і однакову тенденцію розвитку - з 1992 року масиви зазнали будівництва багатьох нових житлових кварталів: на Троєщині були забудовані вулиці Радунська, Градинська, Теодора Драйзера, Милославська, Оноре де Бальзака; на Воскресенці нові житлові комплекси з'явилися на вулицях Петра Запорожця, Івана Микитенка, Райдужній та ін. [44]. Це призвело до розширення меж островів тепла, однак температура нагріву поверхні в житловому масиві Троєщина на 5 градусів залишається нижчою, ніж на Воскресенці. Така різниця в температурах є яскравим прикладом впливу рослинності на розвиток ефекту ОТ. Масив Троєщина характеризується наявністю великої кількості лісопаркових зон та водних об'єктів, що здійснюють

охладжувальний ефект на ці території – з двох сторін масив оточений водою (річками Дніпро, Десенка та озером Алмазне) та лісовими насадженнями. Водночас, Воскресенка хоч і розташована поруч з р. Дніпро, однак має порівняно небагато паркових зон, через що піддається впливу розташованого поруч ОТ № 5, в межах якого відбувається сильний нагрів об'єктів інфраструктури, що вільно віддають тепло сусіднім об'єктам в зв'язку з відсутністю деревної рослинності, яка зазвичай поглинає та розсіює це тепло. Протилежна ситуація склалась в межах острова тепла №8, причиною формування якого стала розташована там Теплоелектроцентраль (ТЕЦ-6). З 1992 року цей острів тепла втричі збільшився у розмірах (рис. 5.5.) в наслідок будівництва промислової зони на сході виділеної області. Однак, попри все, дана промислова зона не здійснює негативного впливу на Троєщинський масив, оскільки відділена від житлових кварталів широкою лісосмугою та озером, що не дає пром. зоні віддавати своє тепло поруч розташованим будинкам, та відповідно, нагрівати їх ще більше. До виникнення ще одного ОТ №9 (рис. 5.6.) в межах Деснянського району, що розташований на перетині вулиць Ялинкової та Броварської, призвело те, що у 90-х роках, тут планувалось будівництво промислового об'єкта, тому полігон був засипаний піском, що зумовлювало посилення нагріву території на 9-10°C, в порівнянні з прилеглими полями. Однак будівництво не було реалізовано, тому полігон заріс, внаслідок чого даний ОТ став поступово зникати. Ця тенденція підтверджує факт того, що не дивлячись на загальне зростання температури повітря, рослинний покрив може впливати на зниження проявів даного ефекту аж до повного його зникнення [44].

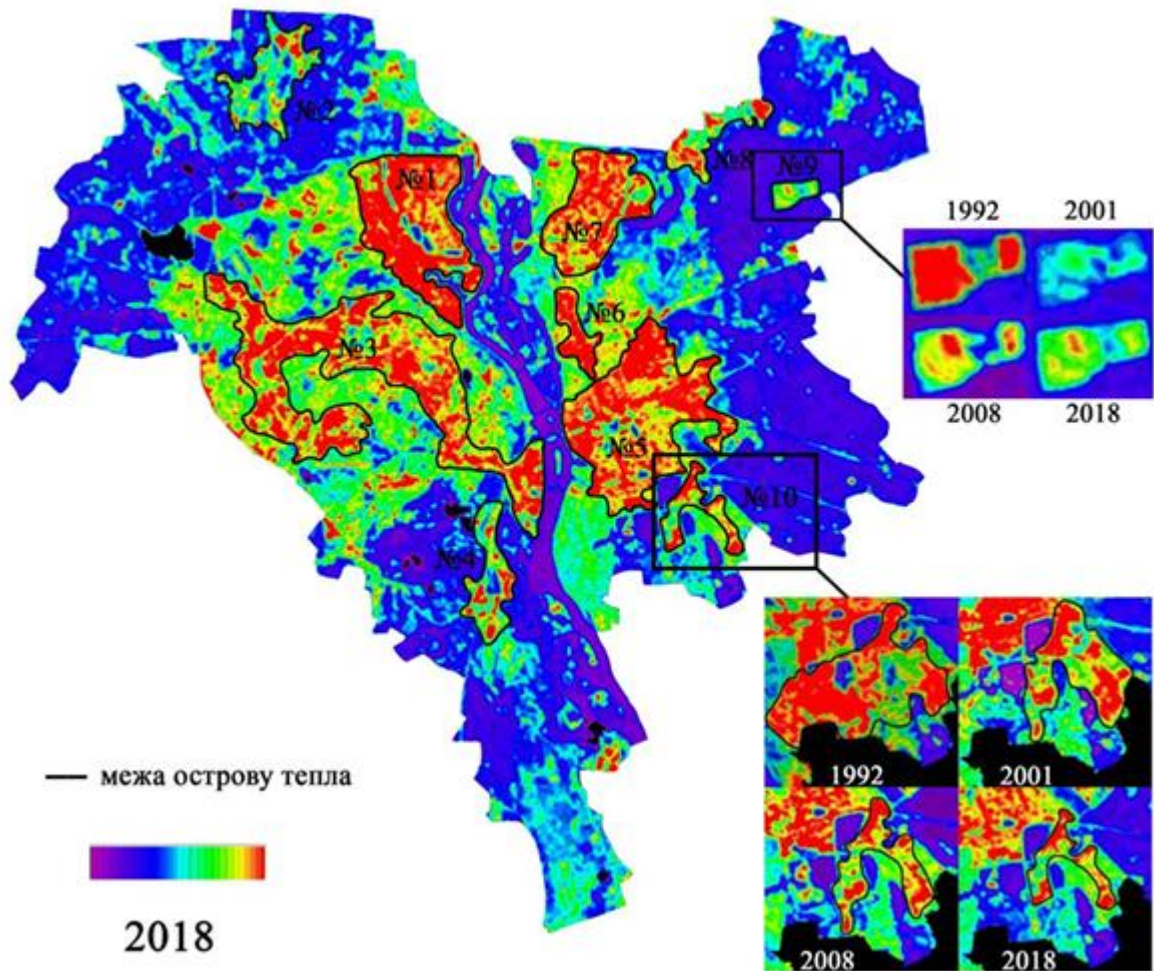


Рис. 5.6. Тенденція зменшення островів тепла №9 та №10 з 1992 по 2018 роки [45, 46]

Це підтверджує і ситуація, що склалась в межах ОТ № 10, який розташований на південь від житлового масиву Осокорки, між садово-дачними ділянками «Нижні Сади» та Бортничами (рис. 3.7.). Даний ОТ протягом 26 років також мав тенденцію до зменшення – з 20,2 км<sup>2</sup> у 1992 р. до 7,3 км<sup>2</sup> у 2018 р. Зі зменшенням меж ОТ, відповідно зменшився і нагрів поверхні – у 1992 році температура поверхні доходила до 33°C, а у 2018 знизилась до 22-24°C. До зменшення проявів даного ОТ призвели зміни місцевих ландшафтів, які почалися у 1993 році через заплановане будівництво житлових масивів Північні та Південні Осокорки. До 1990-х років навколо Осокорків територія являла собою заболочені масиви та ділянки заплавної луки. Також там були розташовані невеликі озера – Заплавне та Тягле. Для

будівництва метро, проспекту Бажана та нових житлових масивів почалося осушення заболочених земель та намівання ґрунту з прилеглих озер. Це призвело до різючих змін місцевих ландшафтів. Осокорки були розділені насипом, по якому прокладений проспект Бажана, на дві частини. Змінилися обриси берегової лінії навколишніх заток Дніпра та озер, що існували між Осокорками та Бортничами – Вирлиці, Небреж, Мартишева, Тяглого.

До 2000-х років житловий масив Північні Осокорки був забудований першими кварталами. Його розширення триває й донині, в той час як проект забудови Південних Осокорків так і не був відданий на реалізацію. В наслідок цього, за останні 26 років осушена під будівництво територія вкрилася природною рослинністю. Зараз в межах цієї території відносно сильним нагрівом відзначається лише Бортницька станція аерації та селище Бортичі, що ще раз підтверджує позитивний вплив рослинності на зменшення теплового навантаження [44].

Отже, моніторинг теплового поля за 26 років в межах Києва показує, що формування ефекту острова тепла на пряму залежить від покриття поверхні, а не тільки від збільшення температури повітря, адже поверхневий прогрів територій сильно зростає зі зменшенням площ природного ґрунтового-рослинного покриву і ущільненням міської забудови. Це викликає, як локальне порушення мікрокліматичних умов у межах зон, так і може сприяти зміні кліматичних умов на регіональному рівні. Відсутність дієвих адміністративних рішень з розширення та збереження зелених зон Києва, а також незадовільне регулювання забудови в центральних частинах міста лише посилює несприятливу екологічну ситуацію в місті.

## 5.2. Характеристика території міста Києва за ступенем теплового навантаження

На підставі аналізу просторово-часових рядів даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні в період з 1992 року по 2018 рік для міста Києва було проведене зонування території за ступенем теплового навантаження на основі табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

### Градація ступеня теплового навантаження на територію

| Ступінь теплового навантаження території | Критерії                                                                                      | Фактори виникнення                                                                                                                                                          | Прояви                                                                                |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Вкрай незадовільний                      | Відбувається перевищення температури поверхні на [10-15°C] в порівнянні лісопарковими зонами. | Висока концентрація житлових будинків, великих промислових об'єктів, потужних транспортних розв'язок та відсутність зелених насаджень в межах відносно невеликої території. | Об'єкти, що знаходяться у цій зоні мають найбільші значення теплового випромінювання. |
| Незадовільний                            | Різниця в нагріванні поверхні становить [8-9°C]                                               | Вирубка лісів або зменшення лісопаркових зон поблизу промислових об'єктів чи житлових масивів, що призводить до збільшення нагріву споруд.                                  | Об'єкти мають високі значення теплового випромінювання.                               |
| Нормальний                               | Різниця в температурах поверхні становить [5-7°C]                                             | Оптимальне співвідношення об'єктів інфраструктури та паркових зон                                                                                                           | Об'єкти мають помірне значення теплового випромінювання.                              |
| Задовільний                              | Різниця в температурах поверхні становить менше 5°C.                                          | Висока концентрація зелених насаджень при незначній кількості об'єктів інфраструктури або нещільній забудові.                                                               | Об'єкти з незначним значенням теплового випромінювання.                               |
| Дуже добрий                              | Різниця в температурах поверхні відсутня.                                                     | Сюди відносяться ліси та лісопаркові зони, де об'єкти інфраструктури трапляються рідко.                                                                                     | Об'єкти з найнижчим значенням теплового поля.                                         |

На основі даних таблиці 5.1. була розроблена карта ступеня теплового навантаження для міста Києва (рис. 5.8.).

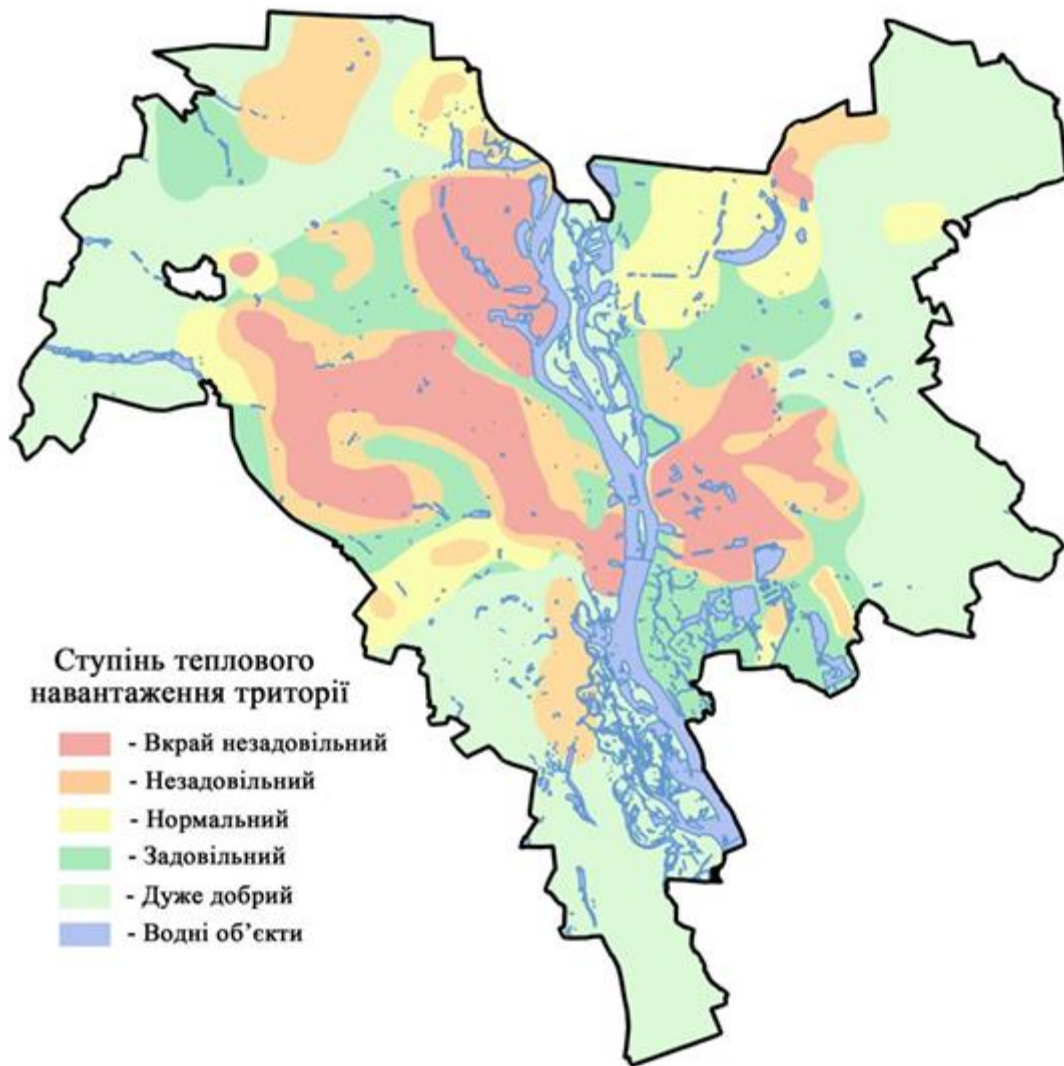


Рис. 5.8. Карта теплового навантаження території для міста Києва

Отже, *вкрай незадовільний стан* за ступенем теплового навантаження мають Оболонський район, де сформувався острів тепла №1, Святошинський, Шевченківський, Солом'янський, Печерський та Голосіївський райони в тій частині, де сформувався острів тепла №3, а також станція метро «Лісова» та житлові масиви Березняки, Осокорки і Позняки. В межах цих територій знаходяться великі промислові об'єкти та райони з щільною міською забудовою, а зелені насадження майже відсутні через суцільне поширення асфальтового покриття. Через відсутність зелених зон, що надають охолоджувальний ефект, ці території мають максимальне значення теплового

випромінювання, що сильно нагріває повітря в цій зоні. Таке значне підвищення температури міського середовища негативно впливає на здоров'я населення – знижує термічний комфорт, створює потенційний ризик для розвитку серйозних серцево-судинних захворювань, знижує працездатність. Крім того, воно призводить до необхідності додаткового витрачання енергії системами клімат-контролю, прискорює корозію металів і швидкість хімічних реакцій, що супроводжуються виділенням екотоксикантів [47].

Для того, щоб покращити ситуацію, в цій зоні в першу чергу необхідно припинити будівництво нових житлових, великих торгових та промислових споруд, що ущільнюють інфраструктуру. По-друге, потрібно оптимізувати тепловий режим території шляхом збільшення зелених насаджень – газонів, клумб, дерев, адже будь-яка не заасфальтована територія є додатковим джерелом випаровування, що допомагає охолодити повітря. Також дуже ефективним є «озеленення» дахів, тому що найбільше нагріваються саме дахи будинків, відповідно вони віддають найбільше тепла. Озеленення даху будівлі звичайним газоном може сильно зменшити її прогрівання, а також допоможе покращити екологічну обстановку міста. Найбільш придатними для озеленення є дахи комерційних приміщень, заводів та складів, що є найчастішою причиною формування вище зазначених островів тепла у місті Києві. Ці будівлі найвигідніше озеленювати, оскільки їх дахи переважно пласкі та займають велику площу. Озеленення складів та заводів широко популярне в Європі, а уряди Франції та Німеччини на законодавчому рівні ввели вимогу повністю або частково озеленювати дахи усіх комерційних новобудов [36].

До категорії територій, що мають *незадовільне теплове навантаження* потрапили зона вирубки в Оболонському районі, промзони в Голосіївському та Деснянському районах, а також Бортницька станція аерації, житловий масив Воскресенький та, відповідно, території, що розташовані навколо потужних островів спеки № 3 (на правому березі) і № 5 (на лівому березі), які віддають своє тепло сусіднім об'єктам, збільшуючи їх нагрівання. Всі ці

об'єкти мають помірно високе значення теплового випромінювання, але лісові насадження, які розташовані поруч, грають роль буферних зон, що захищають спальні райони від теплового випромінювання промислових об'єктів. Таким чином, великої шкоди населенню це не завдає, однак тенденція до розширення промислових зон шляхом вирубки лісових насаджень може призвести до негативних наслідків у майбутньому, тому рекомендаціями для цих територій є повне припинення вирубки лісів та будівництва нових промислових об'єктів, а також насадження клумб та газонів в межах промислових зон для зменшення теплового навантаження на територію.

*Нормальну ситуацію з тепловим навантаженням* мають житловий масив Троєщина, Новобіличі, Оболонь-2, житлові квартали на ВДНХ, Теремки, Іподром, Васильківська, що мають середній рівень озеленення території в середині кварталів, тому вони мають помірно значення теплового випромінювання. Однак, через високу заселеність цих районів та щільну забудову, наявних паркових зон недостатньо для того, щоб влітку люди почували себе комфортно. Тому важливим залишається збільшення паркових зон для того, щоб охолодити територію та надати населенню можливість відпочивати від спеки під кронами дерев. Також, зважаючи на те, що ці спальні райони продовжують розширюватись, для покращення екологічної ситуації ефективним може бути введення норм на будівництво нових будинків з білими дахами. Науково доведено, що білі дахи та світлий бетон можуть зменшити ефект нагрівання міського повітря на 50% [48]. Білі поверхні менше нагріваються, тому що краще відбивають сонячну радіацію, ніж темні. До того ж білі дахи могли б знизити температуру і всередині будівель.

*Задовільний ступінь теплового навантаження* характерний для садово дачних ділянок «Нижні Сади», Русанівки, Лісового масиву, селищ Троєщина та Биківня, Гідропарку, смт Пущі-Водиці, Мостицького масиву та масиву Виноградар, а також Чоколівки. В цих місцевостях переважає нещільна або одноповерхова забудова серед великої кількості лісових насаджень, паркових

зон та озер, що виступають стабілізаційним елементом теплового поля, тому його значення є незначним і не призводить до формування островів тепла. Ці території є найкомфортнішими для життя населення з точки зору температурних умов, оскільки місцеве населення не відчуває на собі таких негативних наслідків влітку, як, наприклад, жителі центру Києва. Для подальшого підтримання задовільного теплового навантаження в цій зоні головним завданням є збереження екологічного стану та зелених зон.

*Дуже добрий стан за ступенем теплового навантаження у Києві* мають переважно ліси та лісопаркові зони з мінімальним тепловим випромінюванням, такі як Голосіївський ліс, Пуща-Водицький ліс, Обухівський ліс, Чернечий ліс, Ботанічний сад ім. Гришка, Лісовий масив, Парк Партизанської Слави тощо. Тут спостерігається мінімальна поверхнева температура, оскільки тут практично немає штучних покриттів і ніякі чинники не заважають природному випаровуванню і вологообміну ґрунтів. Ці території вважаються «легенями» Києва, які очищують та охолоджують атмосферне повітря, створюючи комфортні умови для проживання населення, тому їх необхідно зберігати від найменшого антропогенного втручання та розвивати, як рекреаційні.

Окремо до цієї категорії можна внести основні водні об'єкти, такі як ріка Дніпро, Десенка, різні озера. Водні об'єкти є важливим «кондиціонером» для міста – завдяки своїм властивостям повільно нагріватися і так же повільно віддавати тепло, влітку вони можуть охолоджувати, а в холодну пору року, навпаки, підігрівати навколишні райони. Тому вкрай недопустима забудова водоохоронної зони р. Дніпро, що розпочалася за часи незалежності України.

Таким чином, у великих містах ситуація зі зниженням рівня екологічної безпеки в результаті зміни клімату має серйозний характер і вимагає ретельного дослідження просторово-часових змін температури поверхні міста за останні десятиліття та механізмів підвищення температури міського середовища. Так, у Києві найгірша ситуація спостерігається у центральних районах міста, де температура є вищою на 10-15°C. Таке перевищення температури завдає значної шкоди не тільки населенню, а і об'єктам інфраструктури та культури, тому потребує якнайшвидшої оптимізації.

## РОЗДІЛ 6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗЕЛЕНИХ ЗОН КИЄВА НА ЗМЕНШЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЯВУ ЕФЕКТУ ОСТРОВА ТЕПЛА

#### 6.1. Дослідження впливу зелених зон на зміну температури повітря в районах м. Києва

Визначено [9], що зелені зони впливають на температурний режим міста шляхом охолодження навколишнього середовища. Відбувається це внаслідок випаровування вологи і створення затінку, що сприяє меншому нагріванню поверхні, ніж на відкритих просторах з переважаючим штучним покриттям. Більше того, рослинність може знижувати температуру повітря навіть поза зоною затінення за рахунок того, що більш прогріте повітря над забудовою витісняється більш прохолодним із прилеглих зелених зон [51].

З метою виявлення ролі зелених насаджень у зменшенні теплового навантаження в мікрорайонах Києва, було проведено дослідження в межах декількох відібраних лісопаркових зон, а саме парку «Перемоги», парку «Молодіжний» та Голосіївського.

Задля отримання необхідних результатів методикою дослідження було обрано проведення польових вимірювань поверхневої температури повітря міста за допомогою мобільного термогігрографа KTI Thermo meter TA3 18 з виносним датчиком. Забір показників температури повітря в кожній точці відбувався через 5 хвилин після фіксації датчика термогігрографа в одному положенні на відстані 1 м від землі в затінку. Точність вимірів температури – 0,1°C. Картографічна візуалізація місць проведення спостережень здійснена на основі Open Street Map [52].

#### **Маршрут №1: ст. м. «Дарниця» та парк «Перемога».**

Дата: 16.08.2024. Середня температура повітря по Києву: +27 °C.

Час: 14:00-16:00.

Знято проб: 13.

## Опис маршруту №1

| №                            | Координати точки                                       | Температура повітря, °C |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                            | 50.454384,30.611346 (ст. м. «Дарниця»)                 | 29.2 (max)              |
| 2                            | 50.456286,30.610360 (сквер)                            | 27.5                    |
| 3                            | 50.457467,30.608952 (Готель «Братислава»)              | 28.9                    |
| 4                            | 50.458117,30.608085 (вхід до парку «Перемоги»)         | 27.0                    |
| 5                            | 50.458911,30.607586                                    | 26.9                    |
| 6                            | 50.459876,30.607053                                    | 26.8                    |
| 7                            | 50.461127,30.605963 (Курган Безсмертя)                 | 26.9                    |
| 8                            | 50.461436,30.603106 (переважаюча рослинність: дуби)    | 25.6 (min)              |
| 9                            | 50.462101,30.604403 (переважаюча рослинність: сосни)   | 26.5                    |
| 10                           | 50.463985,30.602799 (берег каналу зі сторони парку)    | 25.9                    |
| 11                           | 50.464331,30.602555 (берег каналу зі сторони забудови) | 26.6                    |
| 12                           | 50.464473,30.600400 (забудова)                         | 27.3                    |
| 13                           | 50.465380,30.600019 (автостоянка)                      | 28.8                    |
| Значення перепаду температур |                                                        | 3,6                     |

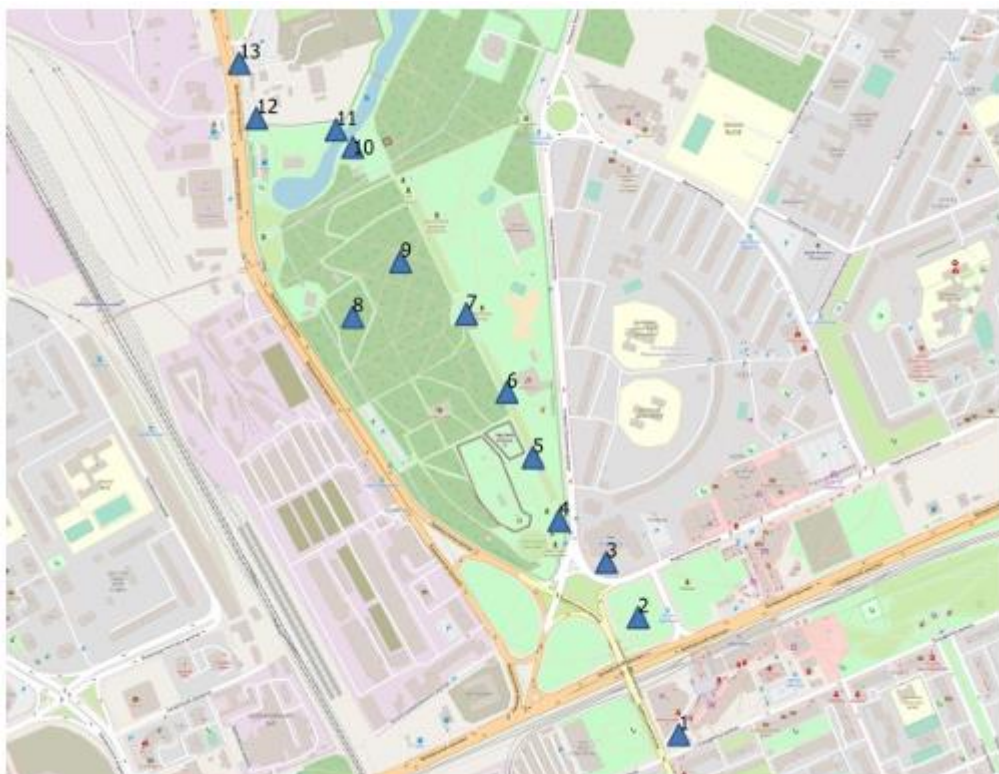


Рис. 6.1. Картохема проведення вимірів в межах маршруту №1

**Маршрут №2: територія ВДНХ та Голосіївський ліс.**

Дата: 17.08.2024. Середня T повітря по Києву: +30 °C.

Час: 14:00-15:40.

Знято проб: 12.

Таблиця 6.2.

## Опис маршруту №2

| <i>№</i>                            | <i>Координати точки</i>                                     | <i>Температура повітря, °C</i> |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1                                   | 50.372045,30.479514 (ліс)                                   | 27.7 (min)                     |
| 2                                   | 50.375603,30.479408 (при вході до лісу)                     | 28.5                           |
| 3                                   | 50.378083,30.479338                                         | 28.8                           |
| 4                                   | 50.380979,30.480182 (поруч з озером)                        | 27.9                           |
| 5                                   | 50.379915,30.476865 (біля входу до НК «Експоцентр України») | 29.3                           |
| 6                                   | 50.381174,30.476658 (вхід до ст.м. «Виставковий центр»)     | 30.3                           |
| 7                                   | 50.381905,30.478271 (поруч з дорогою та бізнес-центром)     | 31.4 (max)                     |
| 8                                   | 50.382346,30.475393 (вхід до Географічного ф-ту)            | 29.3                           |
| 9                                   | 50.383880,30.475507 (Спорткомплекс КНУ)                     | 28.3                           |
| 10                                  | 50.381497,30.474491 (сквер поруч з Географічним ф-м)        | 28.2                           |
| 11                                  | 50.380082,30.473796 (поруч з дорогою)                       | 29.9                           |
| 12                                  | 50.378354,30.471847 (автостанція «Південна»)                | 30.6                           |
| <i>Значення перепаду температур</i> |                                                             | <i>3,7</i>                     |



Рис. 6.2. Картохема проведення вимірів в межах маршруту №2

**Маршрут №3: парк «Молодіжний» та озеро Верхнє Вигурівське**

Дата: 18.08.2024

Середня температура повітря по Києву: +32 °С.

Час: 14:00-15:50

Знято проб: 13

Таблиця 6.3.

## Опис маршруту №3

| №                            | Координати точки                                      | Температура повітря, °С |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                            | 50.522407, 30.618486 (супермаркет)                    | 32,0                    |
| 2                            | 50.521975,30.621789 (парк «Молодіжний»)               | 29,9                    |
| 3                            | 50.521242,30.623818 (поліклініка)                     | 30,0                    |
| 4                            | 50.521151,30.627334 (на виході з парку)               | 31,1                    |
| 5                            | 50.522450,30.627674 (на дорожньому перехресті)        | 32,1                    |
| 6                            | 50.522714,30.632749 (промзона)                        | 32,5 (max)              |
| 7                            | 50.524745,30.629099 (берег озера зі сторони забудови) | 30,9                    |
| 8                            | 50.525963,30.631379 (берег озера зі сторони лісу)     | 29,3 (min)              |
| 9                            | 50.526987,30.629610 (зелена зона поруч з озером)      | 29,8                    |
| 10                           | 50.528730,30.629037 (дорога)                          | 30,9                    |
| 11                           | 50.529620,30.628059 (житлова забудова)                | 31,4                    |
| 12                           | 50.525345,30.627980 (дорога)                          | 31,5                    |
| 13                           | 50.525086, 30.623785 (житлова забудова)               | 32,3                    |
| Значення перепаду температур |                                                       | 3,2                     |



Рис. 6.3. Картоschema проведення вимірів в межах маршруту №3

**Маршрут № 4: ст. м. «Деміївська» та Оріхуватські ставки**

Дата: 21.08.2024. Середня температура повітря по Києву: +30 °С.

Час: 14:00-15:30.

Знято проб: 9.

Таблиця 6.4.

## Опис маршруту №4

| №                            | Координати точки                                      | Температура повітря, °С |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1                            | 50.392830,30.512297 (лісопаркова зона)                | 27.2 (min)              |
| 2                            | 50.393645,30.511793 (пд. берег Оріхуватських ставків) | 27.8                    |
| 3                            | 50.395195,30.511282 (сх. берег Оріхуватських ставків) | 28.2                    |
| 4                            | 50.396438,30.511887 (пн.-сх. берег Оріхуват.ставків)  | 28.5                    |
| 5                            | 50.397582,30.510839 (зупинка гром. транспорту)        | 29.5                    |
| 6                            | 50.398062,30.511888 (травмпункт)                      | 29.9                    |
| 7                            | 50.398576,30.512856 (лікарня №10)                     | 30.3                    |
| 8                            | 50.400993,30.515140 (житлові будинки)                 | 30.5                    |
| 9                            | 50.403895,30.517424 (Бібліотека ім. Вернадського)     | 30.9 (max)              |
| Значення перепаду температур |                                                       | 3,7                     |

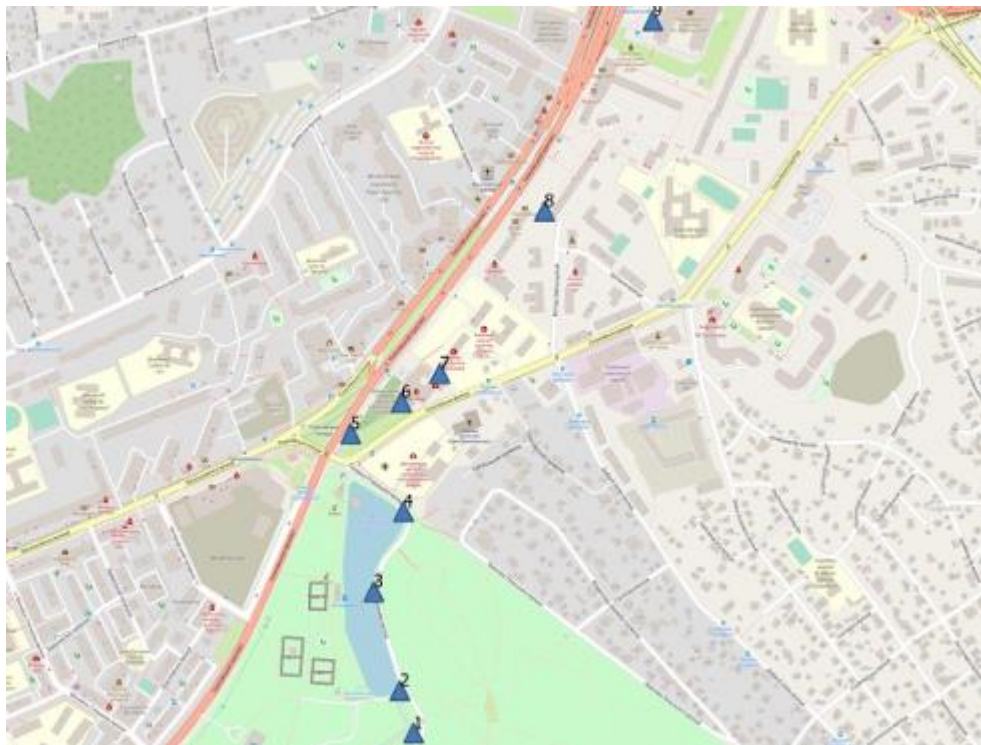


Рис. 6.4. Картохема проведення вимірів в межах маршруту №4

Отже, з метою дослідження охолоджуючого ефекту зелених насаджень в межах Києва були проведені спостереження у чотирьох різних районах міста. Польові вимірювання відбувались протягом 4 днів за ясної погоди при температурі повітря від  $+27^{\circ}\text{C}$  за допомогою мобільного термогігрографа. Загалом було зроблено 47 вимірів. Зібрана статистика показала, що зелені зони створюють затінення, достатнє для істотного охолодження повітря в середньому на  $3,5^{\circ}\text{C}$ .

## **6.2. Аналіз впливу зелених зон на зміну температури повітря**

Для детального дослідження впливу зелених зон на температурний режим прилеглих територій було побудовано графіки змін температурних показників середовища по мірі віддаленості від точки з найнижчими показниками температури, що була зафіксована в межах зеленої зони.

В рамках Маршруту №1 досліджувались охолоджувальні властивості Парку Перемоги. Його площа становить 66,09 га. Деревна рослинність представлена соснами та дубами. В якості точки відліку була обрана т.8, оскільки там була зафіксована найнижча температура в межах парку в день дослідження –  $25,6^{\circ}\text{C}$ . Для детального аналізу маршрут був розділений на 2 частини: в межах першої частини проаналізовано швидкість втрати парком охолоджувальних властивостей у напрямку на пд.-сх. до ст.м. «Дарниця» та ТЦ «ДОМА Center» (рис. 6.5); в межах другої частини – у напрямку на пн.-зх. до житлової забудови з автостоянкою (рис. 6.6).

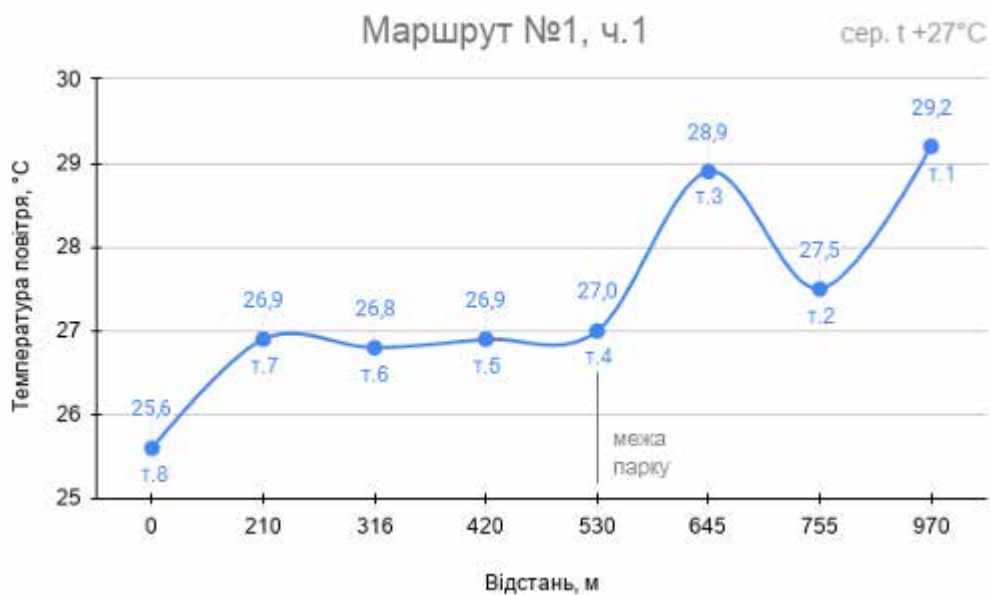


Рис. 6.5. Графік перепаду температур в межах маршруту №1, ч.1

В межах першої частини маршруту (рис. 6.5) зниження температури спостерігається лише у точці 8, показники якої були зафіксовані серед дубових насаджень. Через 210 м температура зросла до середньої по Києву і не змінювалась протягом ще 320 м до кінцевої межі парку. Дані показники говорять про те, що у своїй південній частині Парк Перемоги практично не впливає на температурні параметри середовища та не створює охолоджувального ефекту для прилеглих зон. Це пояснюється тим, що в даній частині парку основною рослинністю є сосни, які не створюють достатньо затінку для зменшення температури, а також тут знаходиться багато інфраструктурних об'єктів та заасфальтованих пішохідних доріг.

Звернувши увагу на т.2, бачимо помітне зниження температури до 27,5°C в межах невеликого скверу. Сквер з усіх боків оточений щільною забудовою, дорогою, лініями метрополітену. Його площа становить не більше 1 га, однак рослинність є щільною з переважанням клену, тополі та верби, що знижує температуру в межах скверу на 1,7°C в порівнянні з прилеглими зонами і досягає практично таких же показників, як і у пд. частині Парку Перемоги, де переважають сосни. Це дає підстави говорити про те, що склад

деревних порід зеленої зони відіграє важливішу роль у формуванні потужності охолоджувального ефекту, ніж її площа.

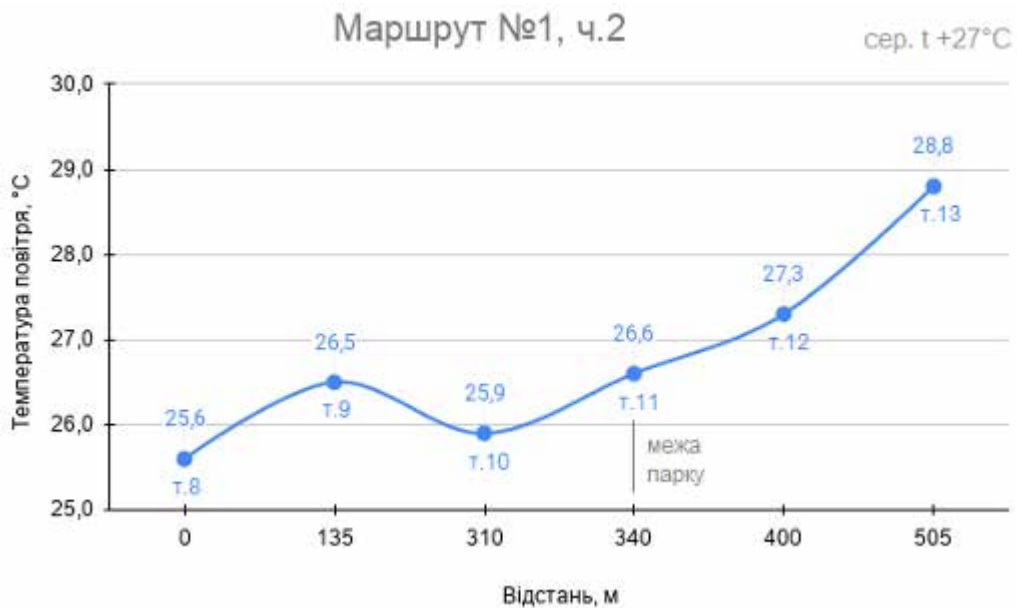


Рис. 6.6. Графік перепаду температур в межах маршруту №1, ч.2

З рис. 6.6. бачимо, що в напрямку на пд.-сх. ситуація зовсім інша, адже в даній частині маршруту розташоване озеро, а переважаючою деревною рослинністю були дуби з домішками сосен. Саме тому, охолоджуючий ефект парку поширювався ще 140 м за його межами, після чого температура почала підвищувати на  $0,7^{\circ}\text{C}$  кожні 50 м.

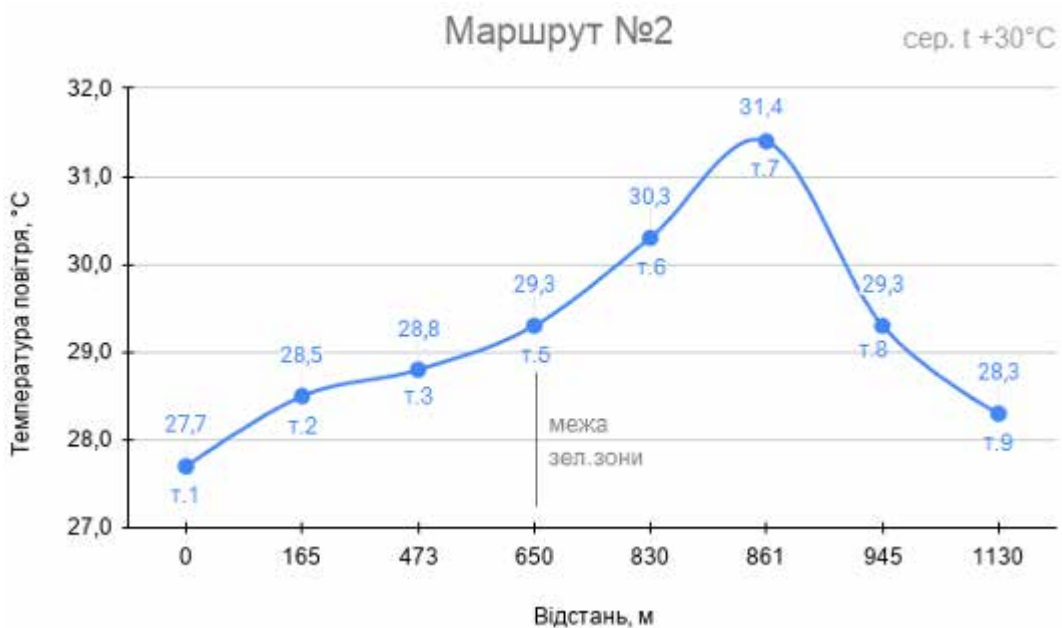


Рис. 6.7. Графік перепаду температур в межах маршруту №2

В межах маршруту №2 було досліджено вплив Голосіївського лісу на територію ВДНГ. Голосіївський ліс має площу 4521 га, рослинність представлена широколистяними лісами – найбільшу площу займають грабові та грабово-дубові ліси.

З рис. 6.7. бачимо, що охолоджувальний ефект лісу триває ще 180 м за його межами до т.6. Далі відбувається стрімке підвищення температури на  $1,1^{\circ}\text{C}$  у т.7, що територіально відповідає бізнес-центру розташованому в центрі транспортної розв'язки. Після цього починається зниження температури в бік навчальних корпусів Географічного факультету КНУ ім. Шевченка. Це пояснюється тим, що ця територія є добре озелененою, а близьке розташування Голосіївського лісу підсилює охолоджувальні властивості невеликих скверів. Дана ситуація дозволяє висунути припущення, що озеленення території поруч з бізнес-центром та дорогою допомогло б продовжити охолоджувальну здатність Голосіївського лісу до 1 км і далі, а перепад температур становив би не більше  $1,5^{\circ}\text{C}$ , замість наявних  $3,7^{\circ}\text{C}$  при середній температурі повітря  $+30^{\circ}\text{C}$ .

Для детального аналізу Маршруту №3 його було розділено на 2 частини: частина 1 – парк «Молодіжний» (рис. 6.8), частина 2 – озеро Верхнє Вигурівське (рис. 6.9).

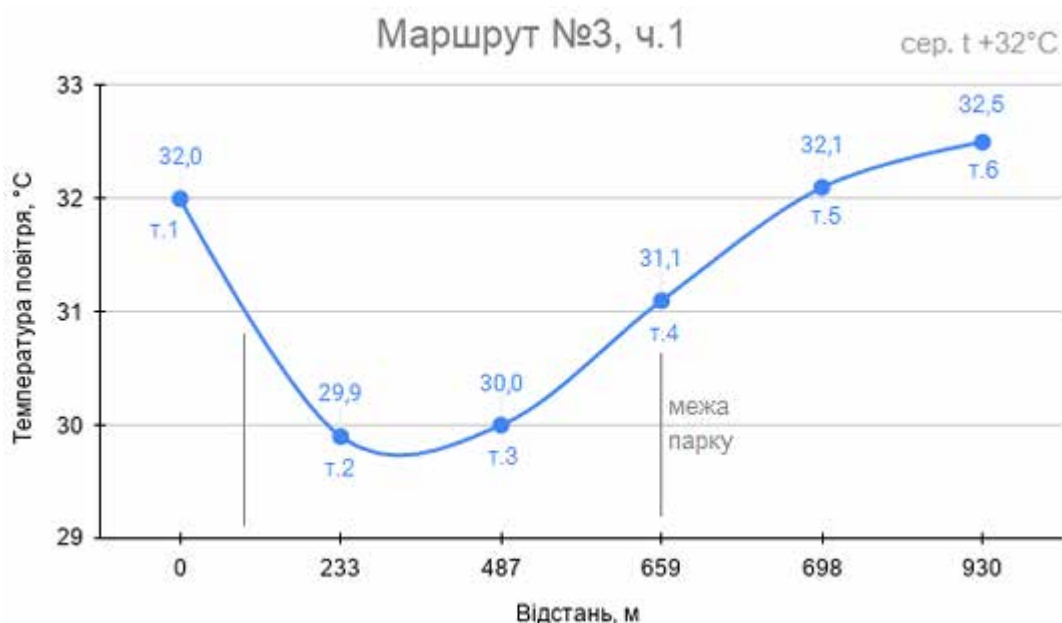


Рис. 6.8. Графік перепаду температур в межах маршруту №3, ч.1

Площа парку «Молодіжний» становить 9,7 га, переважаюча рослинність – широколистяні дерева. В середньому в парку температура повітря менша на 2,3°C. Стрімке зниження температури від т.1 до т.2 на 2,1°C за 230 метрів пояснюється різкою зміною заасфальтованої поверхні вулиць зеленими газонами та деревними насадженнями парку. Подальше плавне підвищення температури в бік промзони (т.6) викликане поступовим вклинюванням у межі зеленої зони різних споруд, таких як лікарня, школа мистецтв тощо і відповідним зменшенням кількості дерев та газонів. Ця ситуація сильно впливає на «потужність» охолоджувальних можливостей парку. Зокрема, з рис. 4.8. бачимо, що на межі парку (т.4) температура повітря становить 31°C, а уже через 40 м досягає 32°C.

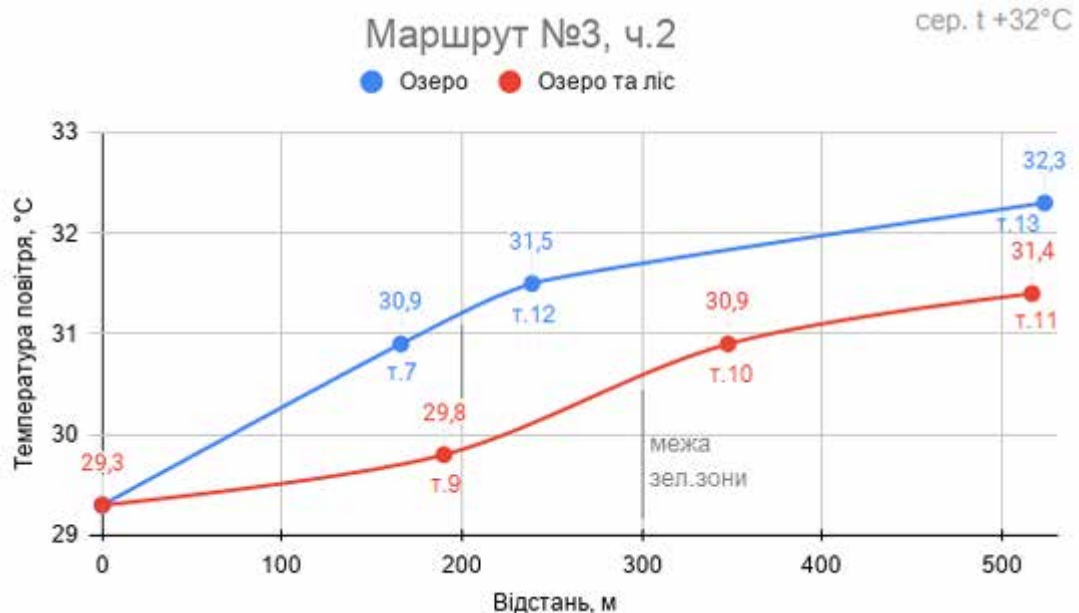


Рис. 6.9. Графік перепаду температур в межах маршруту №3, ч.2

Графік на рис. 6.9. ілюструє вплив на перепад температур частини озера, що обрамлена заасфальтованою поверхнею (синій графік), та частини озера, що оточена лісом (червоний графік). Площа озера - 4,8 га, загальна площа зеленої зони – 30 га; порідний склад деревної рослинності – верби, тополі, ясени. Бачимо, що в сукупності з лісом озеро дає більший та триваліший охолоджувальний ефект, ніж без нього. Зокрема, з синього графіка видно, що температура повітря доходить до 31,5°C (т.12) уже через

240 м, в свою чергу зі сторони лісу такі показники фіксуються лише через 520 м (т.11). Загалом, озеро охолоджує навколишній простір на 3°C при T повітря +32°C, а його охолоджувальний ефект триває ще близько 300 м, що є найвищим показником серед досліджених місць.

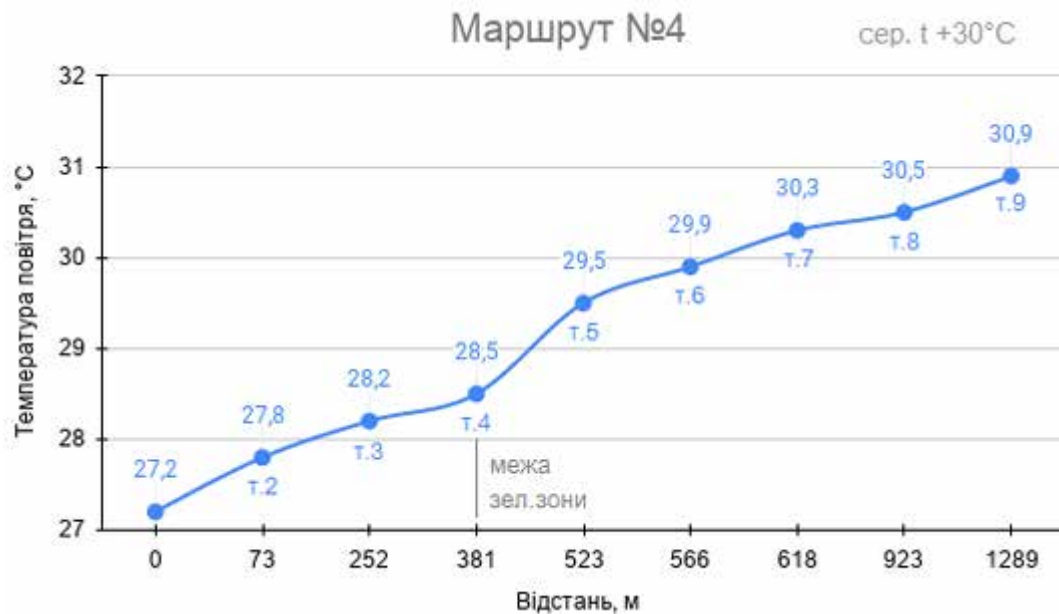


Рис. 6.10. Графік перепаду температур в межах маршруту №4

Маршрут №4 пролягав вздовж верхнього озера Оріхуватських ставків до Бібліотеки ім. Вернадського. Площа озера – 2,3 га, площа прилягаючого до нього Голосіївського парку – 126,32 га, породний склад – тополя, бук, береза, клен, граб, дуб тощо.

З рис. 6.10. бачимо, що парк охолоджує температуру середовища в середньому на 2,8°C при T повітря 30°C. Максимальний перепад температур: 3,7°C. Охолоджувальні властивості починають зменшуватись у т.6, тобто приблизно на відстані 185 м від парку, з інтенсивністю 0,15°C кожні 100 м, що є порівняно доволі низьким показником і підтверджує те, що при взаємодії з водними об'єктами зелена зона може мати потужніший та триваліший охолоджуючий ефект. Отже, аналіз впливу зелених зон на температурний режим прилеглих територій в межах Києва показав, що найбільш тривалий охолоджувальний ефект серед досліджених об'єктів (понад 300 м) був зафіксований в межах зеленої зони з оз. Верхнє Вигурівське, розташованих в

ж/м Троєщина; найменш тривалий – в межах парку «Молодіжний» та пд. частини парку «Перемога» - 40 і 0 метрів відповідно (рис. 6.11).

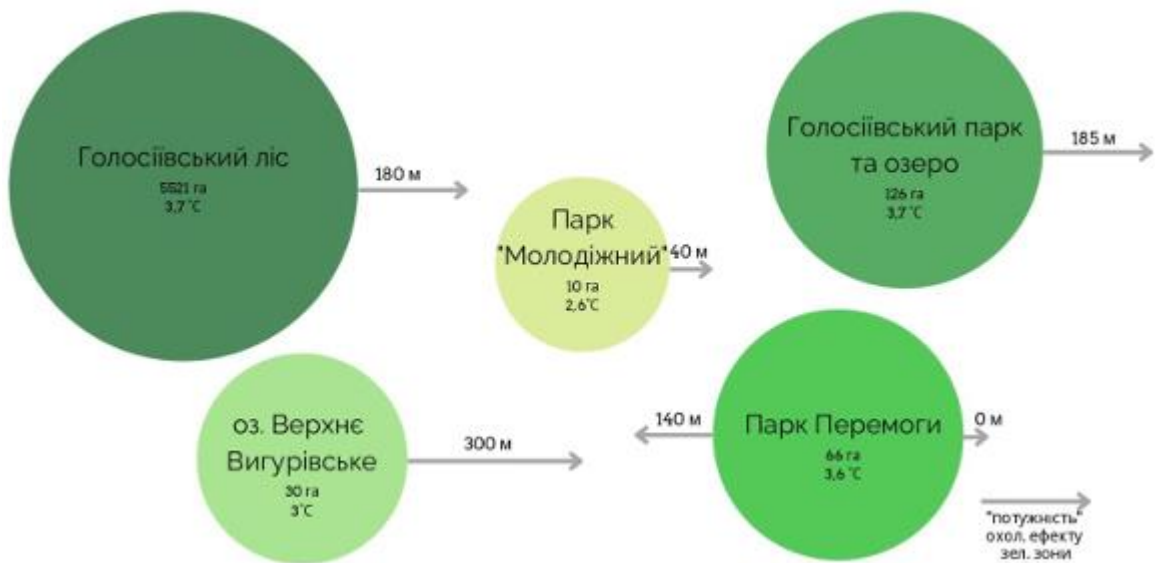


Рис. 6.11. Інфографік потужності охолоджувальних властивостей досліджених зелених зон

З інфографіку на рис. 6.11. бачимо, що площа зеленої зони не відіграє ключової ролі у формуванні «потужності» охолоджувального ефекту. Визначальними при цьому є наступні фактори:

1) Порідний склад зеленої зони: широколистяні насадження, в яких переважають дуби, клени, граби, тополі, верби тощо, формують більший затінок та не дають сонячному промінню досягти поверхні, на відміну від соснових та ялинових насаджень.

2) Щільність насаджень: чим щільніше розташовані дерева, тим більшим буде охолоджувальний ефект. Парки та сквери, де дерева розташовані на значній відстані один від одного, практично не охолоджують навколишній простір.

3) Наявність в межах зеленої зони інфраструктурних об'єктів, таких як магазини, кав'ярні, гральні майданчики, заасфальтовані пішохідні доріжки – все це сильно впливає на охолоджувальну здатність парку не тільки за його межами, а й в самому парку.

4) Розташування поруч або в межах зеленої зони водних об'єктів. Завдяки своїм властивостям повільно нагріватися і так же повільно віддавати тепло, влітку водні об'єкти добре охолоджують навколишній простір, чим підсилюють і охолоджувальні властивості самих зелених зон.

5) Наявність поруч з зеленою зоною інших природних об'єктів – парків, скверів, газонів тощо. Проведені дослідження показали, що навіть невеликий сквер з щільною широколистяною рослинністю може помітно зменшувати температуру навколишнього середовища. А при формуванні «буферної зони» з декількох невеликих скверів чи парків, охолоджувальну здатність великої зеленої зони, що містить в собі перераховані вище фактори, можна продовжити до 1 км і більше, звівши при цьому перепад температур до мінімуму, таким чином нівелювавши прояв ефекту ОТ.

Формування даних умов не потребує значних витрат, розробки чи прийняття нових законодавчих актів, однак може не тільки зменшити прояви ефекту ОТ, а й підвищити загальний рівень життя мешканців міста, їх працездатність, покращити стан здоров'я, зменшити витрати на кондиціонування повітря, створити більше місць для прогулянок та відпочинку, покращити загальний пейзаж міста.

### **6.3. Аналіз перепаду температури повітря в межах острова тепла**

Важливими для розуміння природи ефекту острова тепла є дослідження перепаду температури повітря в середині самої температурної аномалії. Ці дані надалі доречно використовувати при розробці планів ефективного озеленення районів для покращення термічного комфорту жителів міста. Задля виявлення тенденцій у змінах температур в межах островів тепла в якості об'єкта дослідження був обраний ОТ №1. Острів тепла №1 сформувався в районі ст. метро «Оболонь», Мінського масиву, ст. метро «Почайна» та Подолу. Основними причинами його формування є наявні у цій

зоні щільна забудова, великі торговельні комплекси, заводи та потужна транспортна розв'язка, що з'єднана з Північним мостом. Ця зона була і залишається однією із найспекотніших зон міста, оскільки температура поверхні в серпні тут може доходити до 40-42°C.

**Маршрут №5. День 1: ст. м. «Героїв Дніпра» - ст. м. «Почайна».**

Дата: 13.09.2024. Середня T повітря по Києву: +28°C.

Час: 14:00-16:00.

Знято проб: 13.

Таблиця 6.5.

Опис маршруту №5 (День 1)

| <i>№</i>                            | <i>Координати точки</i>                           | <i>Температура повітря, С</i> |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1                                   | 50.527600,30.499705                               | 27.8                          |
| 2                                   | 50.521794,30.500211 (ст. м. Героїв Дніпра)        | 28.7                          |
| 3                                   | 50.521794,30.500211 (ст. м. Мінська)              | 29.0                          |
| 4                                   | 50.505672, 30.499718 (ТРЦ «Дрім Таун»)            | 29.2                          |
| 5                                   | 50.501962,30.499549 (ст. м. Оболонь)              | 29.0                          |
| 6                                   | 50.500841,30.504179                               | 28.5                          |
| 7                                   | 50.495728,30.509028                               | 28.2                          |
| 8                                   | 50.493915,30.512645 (житлова забудова)            | 27.7                          |
| 9                                   | 50.490763,30.515260 (оз. Вербне)                  | 26.5 (min)                    |
| 10                                  | 50.489338,30.503902 (АЗС «КЛЮ»)                   | 29.0                          |
| 11                                  | 50.488470,30.501696 (біля транспортної розв'язки) | 29.3 (max)                    |
| 12                                  | 50.486726,30.498348 (ст. м. Почайна)              | 28.9                          |
| <i>Значення перепаду температур</i> |                                                   | <i>2,8</i>                    |

З графіку на рис. 6.13. бачимо, що навіть в межах ОТ водні об'єкти та зелені зони помітно впливають на зниження температури оточуючого середовища. Так, від т.2 до т.5 протягом декількох кілометрів температура повітря залишається підвищеною і починає знижуватись тільки від т.6 до т.9, в зв'язку з потраплянням у зону впливу озер. При цьому спостерігається зниження температури в середньому на 2,5°C, що є нижчим показником, ніж у зелених зон, які розташовані за межами ОТ, однак охолоджувальний ефект є тривалішим – близько 350 м.



Рис. 6.12. Картохема проведення вимірів в межах маршруту №5 (день 1)



Рис. 6.13. Графік перепаду температур в межах маршруту №5, день 1

**Маршрут №5. День 2: Поділ.**

Дата: 16.09.2024. Середня температура повітря по Києву: +27°C.

Час: 14:00-15:20.

Знято проб: 6.

Таблиця 6.6.

## Опис маршруту №5 (День 2)

| №                                   | Координати точки                                     | Температура повітря, °C |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|
| 13                                  | 50.472560,30.522310 (біля берега Дніпра)             | 26,7                    |
| 14                                  | 50.471523,30.520980 (дорога)                         | 27,0                    |
| 15                                  | 50.469728,30.518849 (житлова та комерційна забудова) | 28,2 (max)              |
| 16                                  | 50.467633, 30.515233                                 | 27,9                    |
| 17                                  | 50.466170,30.513084 (центр Подолу)                   | 27,8                    |
| 18                                  | 50.462552, 30.508806 (підніжжя Замкової гори)        | 26,5 (min)              |
| <i>Значення перепаду температур</i> |                                                      | <i>1,7</i>              |



Рис. 6.14. Картохема проведення вимірів в межах маршруту №5 (день 2)

Аналіз графіку на рис. 6.15 показав, що в межах Подолу найбільший вплив на зниження температури також здійснюють водний об'єкт (р. Дніпро з пн.-сх. сторони) та зелена зона (Замкова гора з пд.-зх. сторони). Загалом, вони однаково знижують температуру в середньому на 1.5°C, а їх охолоджувальний

ефект триває 150-200 м. Значних же температурних перепадів в середині виділеної частини ОТ не спостерігається.

Отже, дослідження перепаду температур в межах острова тепла №1 показали, що зелені зони в межах ОТ дещо втрачають силу своїх охолоджуючих властивостей, однак на загальному фоні все ще впливають на зниження температури оточуючого середовища. Зокрема, з отриманих даних можна зробити висновок, що в межах ОТ №1 наявні всі умови для вирішення проблеми сильного нагрівання даної місцевості – ліс на півночі, р. Дніпро на сході, зелені зони на пд. зх., а також озера в межах самого ОТ. Перешкоджаючим фактором нині є тільки відсутність достатньої кількості зелених насаджень в середині острова тепла, які б могли пролонгувати дію природних об'єктів, що знаходяться за межами ОТ, а також озер, які без наявності зелених зон не можуть створити потужний охолоджуючий ефект. Отже, вирішення даної проблеми вбачається у збільшенні газонів, скверів, парків в межах ОТ №1.

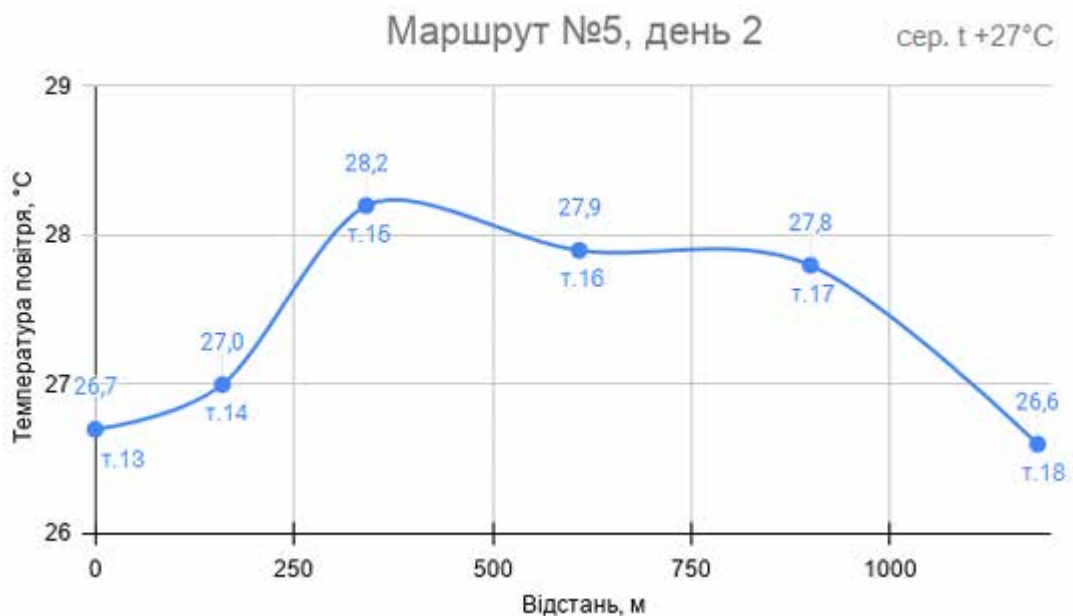


Рис. 6.15. Графік перепаду температур в межах маршруту №5, день 2

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання даної кваліфікаційної магістерської роботи було досліджено феномен "острову тепла" (ОТ), причини його виникнення, вплив на здоров'я населення, розглянуто методи сучасних досліджень міських островів тепла, проаналізовано особливості поширення ефекту острова тепла у світі та у містах України, причини формування ОТ у місті Києві, проведено зонування території міста Києва за ступенем теплового навантаження, а також визначено вплив зелених зон на зміну температури повітря та закономірності перепаду температур в межах ОТ.

Найпоширенішими чинниками, які спричинюють виникнення ОТ є щільна забудова, переважання штучних матеріалів у містобудуванні, відсутність зелених насаджень та забруднення повітряного басейну над містом.

Цей феномен викликає зниження термічного комфорту та тепловий стрес, негативно впливає на здоров'я людей, зниження працездатності, викликає погіршення якості води та інфраструктури міста, призводить до збільшення рівня витрат енергії системами клімат-контролю та викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Сучасна методологічна база досліджень ОТ є широкою і дозволяє оперувати різними інструментами та техніками, однак наразі найефективнішим способом виявлення та дослідження ОТ стали зображення Землі в *тепловому інфрачервоному діапазоні (теплові знімки)*.

На основі аналізу просторово-часових рядів даних супутникової зйомки у тепловому діапазоні в період з 1992 року по 2018 рік в межах Києва було виділено 10 стійких проявів феномена ОТ, які займають 23,5% території міста. Аналіз їхніх характеристик показав, що багаторічний тренд має загальну тенденцію до збільшення як просторових характеристик, так і сили прояву явища. Загалом площа ОТ у м. Києві збільшилась більш ніж на 25%, а

середні відмінності поверхневих температур цих зон від приміських складають від 10 до 15°C.

Одним із найефективніших і перспективних шляхів боротьби із негативними наслідками виникнення "островів тепла" у сучасних містах є розвиток урбанізованого фермерства. Наявність стабільних "островів тепла", які виникають у місцях розташування великих офісних, торгівельно-розважальних центрів та промислових об'єктів, дозволяє допомагати вирішенню продовольчих проблем великих міст (наприклад, розвиваючи так зване "вертикальне рослинництво"), зниженню кількості викидів CO<sub>2</sub> в навколишнє середовище і отримання охолоджуючого ефекту від поглинання тепла рослинами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Bhargava A., Bhargava S. (2018). Effects of Albedo in Urban Planning Special Reference to Building Roofs. Examines Mar Biol Oceanogr., 1(2), 6–7. DOI: <https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>
2. Urban population (% of total population). The Worldbank: веб-сайт. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS> (дата звернення: 09.10.2024).
3. 2014 revision of the World Urbanization Prospects. United Nations: веб-сайт. URL: <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html> (дата звернення: 09.10.2024)
4. Chandler T. J. The climate of London. London : Hutchinson, 1965. 150 p.
5. Грищенко М. Ю. Аерокосмічні дослідження міського острова тепла. Геоінформатика, картографія, дистанційне зондування Землі. 2014. Випуск 19. С. 22–28.
6. Sobstyl J., Emig T. and other. Role of city texture in Urban Heat Islands at nighttime. Physical Review Letters. 2018. Vol. 120. P. 12-18.
7. Salem E. Urban Heat Island Effect Is Caused By ‘Grid-Like’ Urban Layout. PROGRSS. 2018. URL: <https://progrss.com/design/20180302/urban-heat-island-effect-grid-like-layout/> (дата звернення: 11.10.2024).
8. Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Самчук Є.В. Температурні аномалії великого міста. Український гідрометеорологічний журнал. 2011. Вип. №8. С. 67-73.
9. Адаптація до змін клімату: зелені зони на варті прохолоди. Казанцев Т. та ін.; К: Зелена Хвиля. 2016. 40 с.
10. Lung N. Making Singapore cool again: A conversation with Professor Gerhard Schmitt. OpenGov. 2018. URL: <https://www.opengovasia.com/articles/exclusive-making-singapore-cool-again-a-conversation-with-professor-gerhard-schmitt> (дата звернення: 11.10.2024)
11. Hewston R. Heat stress threatens to cut labour productivity in SE Asia by up to 25% within 30 years. Verisk Maplecroft. 2015. URL: <https://maplecroft.com/portfolio/new-analysis/2015/10/28/heat-stress-threatens-cut-labour-productivity-se-asia-25-within-30-years-verisk-maplecroft/> (дата звернення: 11.10.2024).
12. Urban Heat Islands. NASA Earth Observatory: веб-сайт. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=47704&eocn=image&eci=related-image> (дата звернення: 17.10.2024).
13. Howard L. The climate of London. London, 1991. – 285 p.
14. Chandler T. J. The climate of London. London : Hutchinson, 1965. – 150 p.
15. Bristow R., Blackie R., Brown N. Parks and the urban heat island: A longitudinal study in Westfield, Massachusetts. Northeastern Recreation Research Symposium. 2010. №94. P. 224 – 230.

16. Філіпович В. Є., Крилова Г. Б. Дослідження теплового поля м. Києва за даними космічного зондування в ІЧ-діапазоні, як складової аналізу екологічного стану урбанізованої території. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». Київ, 2014. С. 16–28.
17. Грищенко М., Константинов П. Дешифрування поверхневого острову тепла міста по тепловим космічним знімкам із ресурсних супутників. Збірник наукових праць. Харків. 2016. №23. С. 27–34.
18. Land Viewer : веб-сайт.  
URL: <https://eos.com/landviewer/> (дата звернення: 17.10.2024).
19. Казанцев Т., Халаїм О., Василюк О. Дослідження теплового поля м. Києва за даними космічного зондування в ІЧ-діапазоні, як складової аналізу екологічного стану урбанізованої території. Київ: УЕК "Зелена Хвиля". 2014. 39 с.
20. Вертикальна ферма «Щастя Здоров'я», м. Київ. веб-сайт.  
URL: <https://hh.farm>
21. Компанія міського фармінгу City farm. веб-сайт.  
URL: <https://www.cityfarm.hk>
22. Bristow R., Blackie R., Brown N. Parks and the urban heat island: A longitudinal study in Westfield, Massachusetts. Northeastern Recreation Research Symposium. 2010. №94. P. 224 – 230.
23. Loomis B. In Dallas as in Phoenix, people look to trees for relief from Urban Heat Islands. Azcentral: веб-сайт. 2018. URL:  
<https://www.azcentral.com/story/news/local/arizona-environment/2017/12/29/>  
(дата звернення: 08.11.2024)
24. Hot and Getting Hotter: Heat Islands Cooking U.S. Cities. Climate Central: веб-сайт. URL:  
<https://www.climatecentral.org/news/urban-heat-islands-threaten-us-health-17919> (дата звернення: 08.02.2025).
25. Urban Land Institute report proposes ideas to Alleviate Urban Heat Island effect in Gowanus. Bklyner: веб-сайт. URL:  
<https://bklyner.com/urban-land-institute-report-proposes-ideas-alleviate-urban-heat-island-effect-gowanus/>  
(дата звернення: 08.11.2020)
26. Martin-Vide J., Moreno-Garcia M. Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). Elsevier. Atmospheric Research. 2020. Vol. 240. P. 1-9.
27. Kolokotroni M., Giridharan R. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. Solar Energy. 2008. Vol. 82 (11). P. 32-39.
28. Nastrana M., Kobala M., Eler K. Urban heat islands in relation to green land use in European cities. Elsevier. Urban Forestry & Urban Greening. 2019. Vol. 37. P. 33-41.

29. Analysis of Heat Waves and Urban Heat Island Effects in Central European Cities and Implications for Urban Planning / Simpson Z. and other. World Bank Group: веб-сайт. 2020. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/740251596528336330> (дата звернення: 08.02.2025).
30. Закордонний досвід: Розкопана річка у Сеулі. The Village: веб-сайт. URL: <https://www.the-village.ru/village/city/abroad/123305-inostrannyu-opyt-raskopannaya-reka-v-seule> (дата звернення: 08.02.2025)
31. Українська бетонна пустеля. Texty.org: веб-сайт. URL: <http://texty.org.ua/d/urban-heat-web/> (дата звернення: 14.02.2025)
32. Що це таке – індекс NDVI? IRLen: веб-сайт. URL: <https://www.irlen.com.ua/ndvi-index> (дата звернення: 14.02.2025)
33. Маринін І.Л., Драничер О.Р. Деякі оцінки характеристик островів тепла м. Одеса. Український гідрометеорологічний журнал. 2013. Вип. №12. С. 54-61.
34. Дистанційний моніторинг теплового режиму в містах: теоретичні основи. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2023, Випуск 20. веб-сайт. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/article/view/1266> (дата звернення: 11.03.2025)
35. Prihodko, L., Goward, S. N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. Remote Sensing of Environment. 1997. Vol. 60, No. 3. С.335–346.
36. Meng, X., Cheng, J., Sensing, S. L.-R., та ін. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme. Remote Sensing. 2017. Vol. 9. С. 1247.
37. Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., environment, L. P.-R. S. of, та ін. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Elsevier.
38. Li, S., Access, G. J.-I., 2018, U. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. IEEE Access. 2018.
39. Yu, X., Guo, X., Sensing, Z. W.-R., та ін. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm, and single channel. Remote Sensing. 2014. Vol. 6. С. 6.
40. Mao, K., Qin, Z., Shi, J., та ін. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26, No. 15. С. 3181–3204.
41. Sobrino, J., Raissouni, N., Environment, Z. L.-R. S. of, та ін. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Elsevier. 2001. Vol. 75. С. 256–266.
42. Valor, E., Environment, V. C.-R. sensing of, 1996, undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Elsevier. 1995. Vol. 57. С. 167–184.

43. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product [Електронний ресурс] // USGS – Режим доступу до ресурсу: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
44. Корогода, Н., Бричник, В. (2019). GIS analysis of the phenomenon of urban heat island on the example of Kyiv for 1992-2018. *Physical Geography and Geomorphology*, 96(4-6), 29–35.
45. NASA Landsat Program, Landsat TM сцена LT41810251992233AAA02, L1T, USGS, 1992.08.20 – Режим доступу: <https://earthexplorer.usgs.gov>
46. NASA Landsat Program, Landsat OLI/TIRS сцена LC81810252018216LGN00, L1T, USGS, 2018.08.04. Режим доступу: <https://earthexplorer.usgs.gov>
47. Крилова А. Б. Моніторинг формування і розвитку "теплового острова" міста Києва / А. Б. Крилова. // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 2014. – №2. – С. 35–37.
48. Cool Cities Network [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.c40.org/networks/cool\\_cities](http://www.c40.org/networks/cool_cities)
49. N. Pasichnyk, D. Komarchuk, O. Opryshko, S. Shvorov, V. Reshetiuk and B. Oksana, "Technologies for Environmental Monitoring of the City," 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 2021, pp. 40-43, doi:10.1109/CADSM52681.2021.9385213
50. D.Komarchuk, N.Pasichnyk, V.Lysenko, O.Opryshko, S.Shvorov, V.Reshetiuk, O.Udoenko, T.Knizhka, M.Kharinova (2020) Algorithms and Software for UAV Flight Planning for Monitoring the Stress Conditions of Plantations, 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), , pp. 146-149, doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255605
51. Дослідження показало, що зелені насадження зменшують температуру повітря у місті у спеку. Хмарочос: веб-сайт. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2016/10/26/doslidzhennya-pokazalo-shho-zeleni-nasadzhennya-zmenshuyut-temperaturu-povitrya-u-misti-u-speku/> (дата звернення: 20.03.2025)
52. OpenStreetMap: веб-сайт. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата звернення: 21.03.2025).