



Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ «Інститут геології»
Кафедра геоінформатики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА
спеціальність 103 – Науки про Землю
освітня програма «Геоінформатика»

ТЕМА: «ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ В МОНІТОРИНГУ
«МІСЬКИХ ОСТРОВІВ ТЕПЛА»

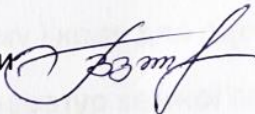
Виконала 
Кафедри геоінформатики

студентка 2-го курсу магістратури
Монастир'ова Ольга Андріївна

Науковий керівник 

д.т.н., професор Зацерковний В.І.

Робота рекомендується до захисту (протокол № 8)
засідання кафедри геоінформатики від 15 травня 2023р.

Завідувач кафедри 

д.т.н., професор Зацерковний В.І.

Київ – 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ МІСТ І МЕГАПОЛІСІВ	11
1.1. Феномен міських островів тепла	11
1.2. Негативний вплив міських островів тепла на екологію	24
1.3. Формування теплового балансу на поверхні урбанізованих територій	26
1.4. Вплив планування міст на формування ефекту міських островів тепла	28
1.4.1. Вплив планування міст на формування міських островів тепла	28
1.4.2. Роль системи озеленення в формуванні міського середовища	30
1.4.3. Шляхи озеленення міст України	32
1.5. Класифікація міських островів тепла	34
1.6. Аналіз температур поверхні найбільших міст України	36
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МІСЬКИХ ОСТРОВІВ ТЕПЛА	41
2.1. Методика проведення моніторингу температури поверхні землі	41
2.2. Матеріали і методи аналізу температури поверхні землі в Києві	44
2.3. Метод визначення ефективності охолодження повітряного середовища за допомогою зелених насаджень	50
2.4. Методи визначення температури дорожнього покриття.....	52
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ МІСЬКОГО ОСТРОВУ ТЕПЛА	56
3.1. Характеристика об'єкта дослідження	56
3.2. Отримання та попередня обробка знімків Landsat	60
3.3. Розрахунок температури земної поверхні	63
3.4. Класифікація зображень земного покриття	64
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	68
4.1. Створення алгоритму і коду для одержання значень інтенсивності MOT ...	68

4.2. Динаміка змін температур земної поверхні м. Києва	70
4.3. Динаміка змін вегетаційного індексу NDVI	73
4.4. Вплив земного покриву на температуру земної поверхні	75
4.5. Узагальнений статистичний аналіз отриманих даних	77
4.6. Моніторинг міських островів тепла за допомогою нормалізованого індексу рослинності	82
4.7. Пропозиції щодо пом'якшення ефектів островів тепла	87
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91
ДОДАТКИ	103

**Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання,
скорочень**

ГІС – геоінформаційні системи.

ГІТ – геоінформаційні технології.

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі.

НС - надзвичайні ситуації.

ЦМР – цифрові моделі рельєфу.

МОТ – Міський острів тепла

МОП – Міський острів прохолоди

СТПЗ – Середня температура поверхні землі

ТПЗ / LST – Температура поверхні землі / Land surface temperature

ПЗЕ – Порогове значення ефективності

ETM+ – Enhanced Thematic Mapper Plus Покращений тематичний картограф

LAD – Leaf area density Щільність площі листя

LAI – Leaf area index Індекс площі листя

NDBI – Normalized Difference Built-up Index Нормалізований диференційний індекс забудованих земельних ділянок

NDVI – Normalized Difference Vegetative Index Нормалізований диференціальний вегетаційний індекс

OLI – Operational Land Imager Оперативний наземний тепловізор

PET – Physiological equivalent temperature Фізіологічний еквівалент температури

TM – Thematic Mapper Тематичний картограф

UTFVI – Urban Thermal Field Variance Index Індекс дисперсії міського теплового поля

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему «Застосування технологій геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі в моніторингу теплових полів мегаполісу»: 52 сторінки тексту, 11 рисунків, 6 таблиць, 63 використаних джерел, 10 сторінок додатків.

Об'єкт дослідження: міські острови тепла.

Предмет дослідження – супутникова інфрачервона термографія як метод дослідження островів тепла м. Київ

Метою дипломної роботи є вивчення характеристик та чинників островів тепла за супутниковими даними та аналіз їхніх просторових закономірностей влітку за період 1986-2021 рр. на прикладі м. Київ.

Методи дослідження: аналіз та порівняння факторів, обробка літературних джерел, синтез характеристики міських островів тепла через взаємозалежності; алгоритмізація; обробка, класифікація та інтерпретація матеріалів дистанційного зондування; метод регресійного аналізу.

Результати роботи рекомендується використовувати при розробці ефективних та низьковартісних методів аналізу островів тепла, підвищення енергоефективності та зменшення впливу на здоров'я жителів при містоплануванні.

ОСТРОВИ ТЕПЛА, ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ, ТЕРМОГРАФІЯ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, LANDSAT, PYTHON.

ВСТУП

Умови сучасного життя та розвитку людства, свідчать про те, що роль міст та рівень урбанізації невпинно зростають. Будь-яке місто є центром зосередження науково-технічного прогресу, багатогалузевої промисловості, транспортної мережі, а отже, як наслідок, і розмаїтого забруднення навколишнього природного середовища (НПС), на який здійснюється істотний антропогенний вплив.

Сьогодні практично всі крупні міста світу перебувають у напруженій екологічній ситуації, що обумовлена надмірною щільністю населення та інфраструктурних навантажень (*Foley J.A. et al., 2005*).

Згідно з дослідженнями, в містах мешкає більше половини населення земної кулі (53,5%). І ця частка населення, згідно з прогнозами ООН, зросте приблизно на дві третини до 2050 р. При цьому в семи країнах вже зараз 100% населення живе переважно в міських районах (*Електронний ресурс: Режим доступу: <http://www.demoscope.ru/>*). Це викликає низку негативних факторів для НПС, такими як: зростання споживання енергії, збільшення викидів парникових газів в атмосферу, зниження якості води, забруднення земної поверхні важкими металами, нанесення шкоди здоров'ю населення тощо.

Актуальність теми. В процесі урбанізації міст формується ефект «міських островів тепла, (МОТ)», який викликаний значним підвищенням температури в містах порівняно з прилеглими територіями.

Причини виникнення МОТ пов'язані з більшим поглинанням темними поверхнями сонячної радіації. Як наслідок – міські дороги і будинки нагріваються більше, чим приміські і сільські протягом дня; матеріали, що зазвичай використовуються в міських районах для тротуарів і дахів (бетон і асфальт), мають істотно різні теплові об'ємні властивості (включаючи теплоємність і теплопровідність) і радіаційні властивості поверхні (альbedo і коефіцієнт випромінювання) на відміну від навколишніх сільських районів. Це

викликає зміну балансу енергії в міських районах. Іншою важливою причиною є недостатня евапотранспірація через недостатню або взагалі відсутність рослинності) в містах. Інші причини МОТ пов'язані з геометрією міст.

У більшості міст різниця в температурі між міською і прилеглою сільською місцевістю найбільш проявляється в нічний час. Хоча різниця температур є значною круглий рік, проте зимою вона більше. Типова різниця температур між центром міста і навколишніми полями складає кілька градусів.

Підтвердженням того що наше суспільство дуже чутливе до підвищеної температури може слугувати аномальна жара, що була в Європі, зокрема в Парижі. Лихо трапилось на початку серпня 2003 р., охопивши головним чином осіб похилого віку. Зазвичай в Парижі щодоби помирає від 30 до 50 осіб. Під час теплової хвилі у перші два тижні серпня 2003 р. ця кількість істотно зросла, досягнувши піку в понад чим 400 осіб. Пізніше підраховали, що в цей період у Франції через спеку померло 14 800 осіб (*Dhainaut, Claessens, Ginsburg, & Riou, 2004*).

Через збільшений викид парникових газів, проблема островів тепла стає ще більш серйозною на фоні зміну клімату.

Дослідження вищенаведених питань є актуальним у зв'язку з необхідністю моніторингу островів тепла, підвищення енергоефективності та зменшення впливу на здоров'я жителів міст.

Мета дипломної роботи – є вивчення МОТ за супутниковими даними та аналіз їх закономірностей. Планується охарактеризувати закономірності цього феномену в часі та просторі за допомогою супутникових знімків Landsat на прикладі м. Києва, дослідити зміни температури земної поверхні, класів земного покриття, рослинності та кореляцію між температурою та факторами островів тепла за період 1985-2022 рр.

В дипломній роботі розв'язані такі задачі:

– проведений аналіз літератури за темою дослідження;

- отримані репрезентативні супутникові знімки Landsat за тридцятирічний період;
- створені алгоритми обробки знімків за допомогою бібліотек ArcPy, GDAL, Sklearn мови програмування Python;
- виявлені взаємозалежності та закономірності в результатах.

Об'єкт та предмет дослідження – МОТ, предмет – супутникова інфрачервона термографія.

Методи дослідження – аналіз та порівняння факторів, синтез характеристик МОТ, алгоритмізація; обробка, класифікація та інтерпретація МДЗ; метод регресійного аналізу.

Предмет дослідження – особливості космічної зйомки в інфрачервоному діапазоні для виявлення МОТ м. Києва

Наукова новизна отриманих результатів полягає в подальшій розробці теоретичних і практичних принципів обробки теплових ІЧ-зображень з метою отримання інформації про характерні властивості об'єктів земної поверхні.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані в роботі підходи спектрального аналізу ландшафтних комплексів м. Києва на основі матеріалів ДЗЗ можуть бути рекомендовані для використання в екологічному моніторингу для одержання додаткової інформації про температурні характеристики об'єктів підстильної поверхні, що дозволяє автоматизовано класифікувати різні типи ландшафтів, виділяти температурні неоднорідності водної поверхні і створювати динамічні моделі електронного зображення підстильної поверхні по теплових ІЧ-знімках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ МІСТ І МЕГАПОЛІСІВ

1.1. Феномен міських островів тепла

Для більшості крупних міст і мегаполісів у світі клімат зазвичай відрізняється від клімату прилеглих територій, і, доволі часто, особливо в спекотні літні дні, він наближається до напівпустельного, а іноді і до пустельного. Так, літом у Києві температура поверхні асфальтового покриття досягає 45 – 55 °С, температура стін з червоної цегли – 41 °С, білих стін – 38 °С, трави – 25 °С. Відмінності в значеннях визначаються коефіцієнтом поглинання вологи (сумарного випаровування) цими поверхнями. До зелених насаджень волога надходить через корні і стеблі, потім вода конденсується на зворотній стороні листя. Саме тут вода з рідкого стану перетворюється у водяний пар і надходить у повітря, підтримуючи таким чином температуру рослин на необхідному рівні, не допускаючи перегріву. Даний природний процес називають транспірацією, це своєрідний «природний кондиціонер» (*Шукуров И.С., 2020*).

На висоті 100 – 150 м в безвітряні дні в крупних містах може утворюватися островний шар з високою температурою і інтенсивним нагрівом кам'яних, цегляних і бетонних конструкцій, що спричинює забруднення повітряної маси і перегріву центральних районів міста (*Мягков М.С., Алексеева Л.И., 2014*).

Через теплове забруднення крупних міст утворюються теплові зони, в яких формується специфічна локальна циркуляція повітря, що отримала назву міського вітру. Влітку вищі шари атмосфери повітря нагріваються, що спричинює потоки повітря з передмістя, як з лісопарків, так і з індустріальних парків, незалежно від їх місця розташування. Центр міста характеризується відносно чистим повітряним середовищем за умови руху повітряних мас з

передмістя. Однак, такі вітри з'являються не завжди. При наявності перепаду в атмосферному тиску міські вітри можуть не виникати (*Шукуров И.С., 2020*).

Важливою особливістю міської аерації в умовах слабого вітру є потужність теплової конвекції, яка виникає через позитивну аномалію теплової рівноваги міського середовища. В температурному полі ця аномалія спричинює появу мікрокліматичного ефекту – МОТ (*Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л., 2000*).

Перші наукові дослідження, в яких були представлені особливості міського клімату, з'явилися на початку XVIII ст. Даний феномен вперше був досліджений і описаний хіміком та метеорологом Люком Говардом (*Luke Howard, 1818-1820*), хоча і не він запровадив цей термін. У процесі досліджень міського клімату Лондона був виявлений «штучний надлишок тепла», де температура повітря перевищувала температуру передмістя (*Howard L., 1833*). Подібні відкриття були зроблені також Емілією Рено в Парижі наприкінці XIX ст. (*Renou E., 1855, Renou, E., 1862, Renou, E., 1868*), Вільгельмом Шмідтом у Відні в XX ст. (*Schmidt, W., 1917, Schmidt W., 1929*), в США (*Mitchell J. M., 1953, Mitchell J. M., 1961*). Ця область візуально має форму просторового купола, схожого на «острів», тому даному феномену в місті було пізніше присвоєно назву «міський острів тепла».

МОТ, (англ. urban heat island, UHI) – міська територія, температура повітря якої перевищує температуру передмістя на 4 і більше градусів. При цьому, температурна різниця зазвичай більша вночі при невеличкому вітру і становить (6-8°C) і більше, ніж у день. Це пов'язане з тим, що більшість різних споруд, які були нагріті протягом дня мають низький показник альбедо, який не дає будівлям швидко охолонути. Найсильніші прояви різниці температур у місті та за його межами можна побачити в літній та зимній періоди.

Часто, помилково стверджують, що основним фактором МОТ є викиди тепла від спожитої людьми енергії. В дійсності це вторинний фактор, а основною причиною є зміна поверхні землі (*Li, Y.; Zhao, X, 2012*).

Ще однією важливою причиною є відсутність випаровування через відсутність рослинності в міських районах. Зі зменшенням площі зелених насаджень міста втрачають тіньову та охолоджувальну дію дерев, також зменшується поглинання вуглекислого газу (Solecki, William D.; Rosenzweig, Cynthia; Parshall, Lily; Pope, Greg; Clark, Maria; Cox, Jennifer; Wiencke, Mary., 2005), що підтверджується інфрачервоними космічними знімками Нью-Йорка (рис. 1.1). там, де рослинність густіша, температури нижчі.

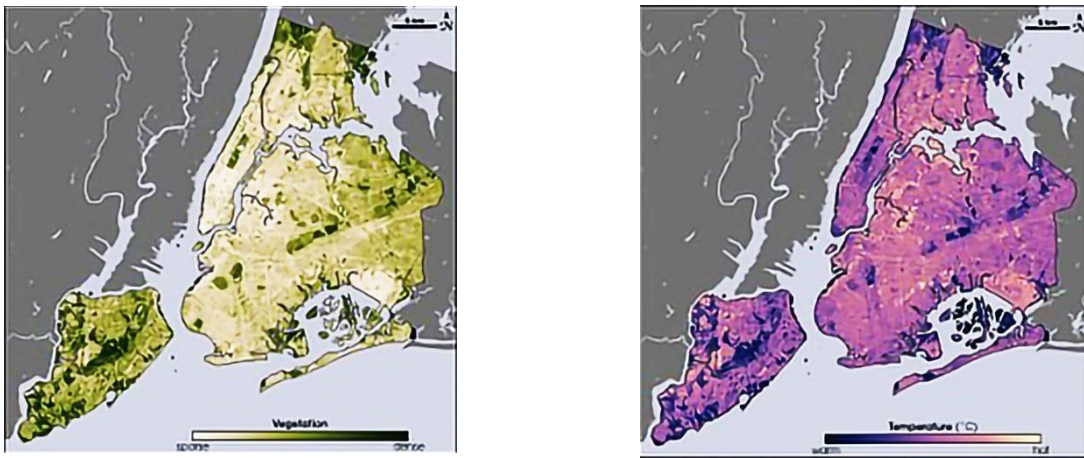


Рис. 1.1. Порівняння зображень рослинності та температури Нью-Йорка

Внаслідок високого рівня загазованості і задимленості міського повітря, зменшується надходження сонячної радіації. Так, втрати ультрафіолетової радіації в Балтиморі (США) досягають 50%, у Москві 25 – 30%, у Санкт-Петербурзі 17 – 24%, у Києві 17% (Денисов В. В., Гутенев В. В., Луганская И. А., 2002), що, спричинює підвищення вмісту хвороботворних бактерій міського повітря.

Під ефектом МОТ розуміють:

– область повітря з підвищеними значеннями температури над деякими районами міської забудови;

– «плато» теплого повітря з підвищеними значеннями температури в напрямку до центру міста. При цьому термічна однорідність «плато» порушується включеннями холодного і гарячого повітря, так званими

«розривами» поверхні або областями генерації прохолодного повітря (озеленені території – парки, сквери, бульвари тощо, водні об’єкти) і гарячого повітря (промислові підприємства, об’єкти енергетики, транспортні «артерії», щільна забудова). На межах міста і сільської місцевості або межі промислового і житлового районів може виникнути значний вертикальний перепад температури, що іноді досягає кількох градусів, який отримав назву «скелі острова тепла» (рис. 1.2).

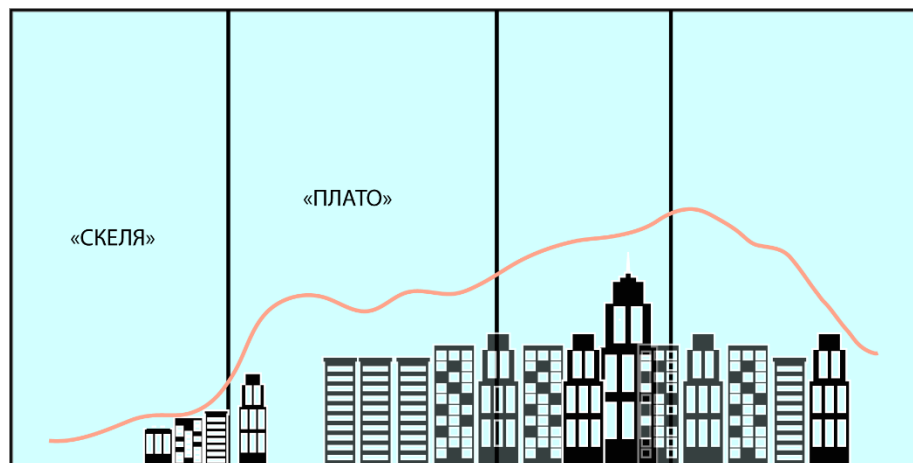


Рис. 1.2. Розріз зони теплого повітря з підвищеними температурами над містом (ефект МОТ)

Ілюстрація причин, що спричинюють виникнення МОТ, представлена на рис. 1.3 (Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т., 1999, Дудорова Н.В., Белан Б.Д., 2016).

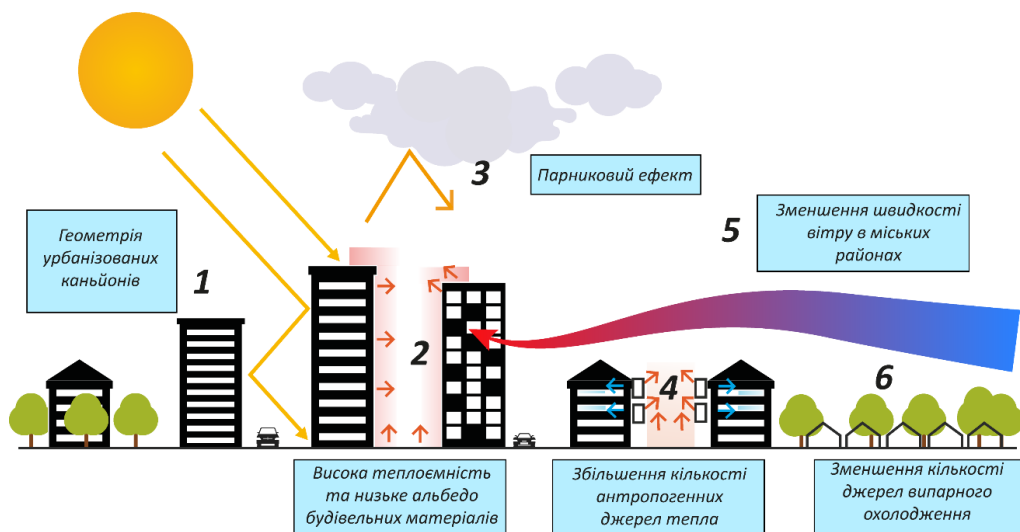


Рис. 1.3. Основні причини формування ефекту МОТ

Основними причинами виникнення МОТ є урбанізація та індустріалізація.

За оцінками ООН, до 2050 року частка населення, що мешкає в міських районах буде далі зростати, і досягне приблизно 70 % від усього населення світу (рис. 1.4), що викликане перед усім міграцією населення із сільської місцевості в міста через зростаючими можливості міських районів, зростанням кількості міст з покращеною інфраструктурою, в країнах, що розвиваються, розвитком ряду сільських районів до рівня міських районів (https://uk.wikipedia.org/wiki/Населення_Землі).

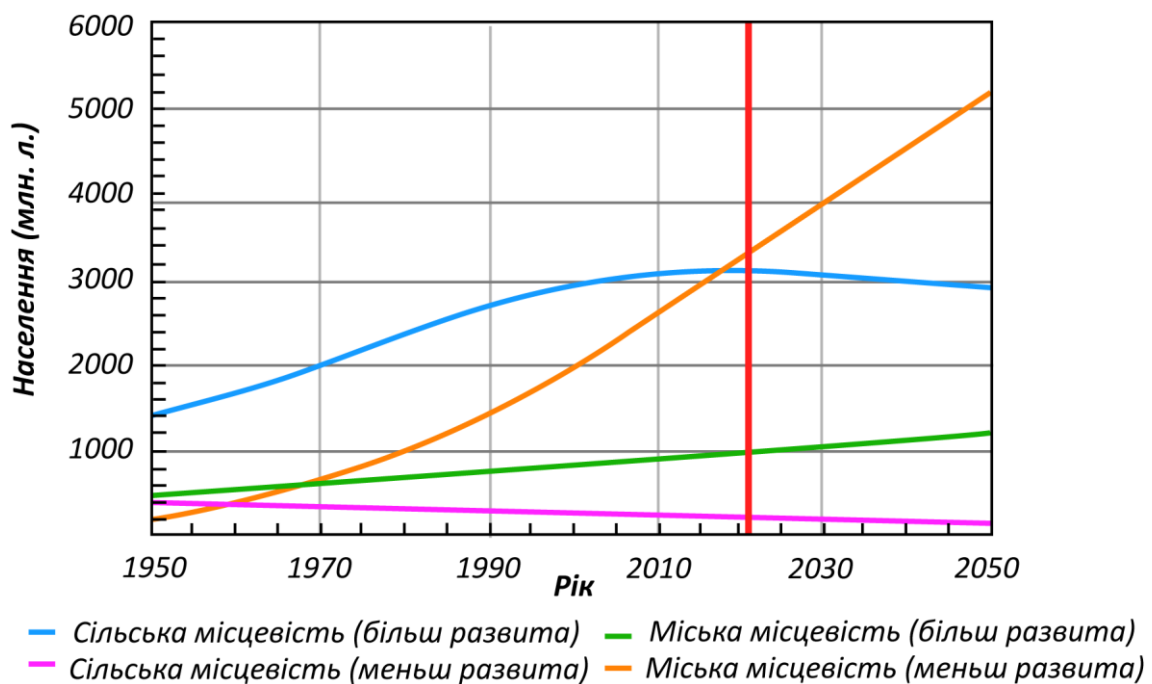


Рис. 1.4. Населення в міських і сільських районах

За останні десятиліття антропогенний вплив на НПС спричинив погіршення стану глобальних проблем в області екологічної безпеки, пов'язаних зі зміною клімату (потеплінням) на Землі, з забрудненням атмосфери тощо. Забруднення атмосфери техногенними викидами призводить до погіршення якості НПС. Техногенні викиди, потрапляючи до атмосфери, можуть поширюватись на великі відстані, упритул до переносу частинок на території сусідніх країн. Внаслідок викидів оксидів сірки й азоту промисловими і транспортними об'єктами виникають «кислотні дощі», які можуть

розповсюджуватись на значні за площею території (Бызова Н.Л., 1982, Ровинский Ф.Я., Егоров В.И., 1986).

На рис. 1.5 наведена схема утворення кислотних опадів та їх вплив на екосистеми (Исаев А.А., 2003).

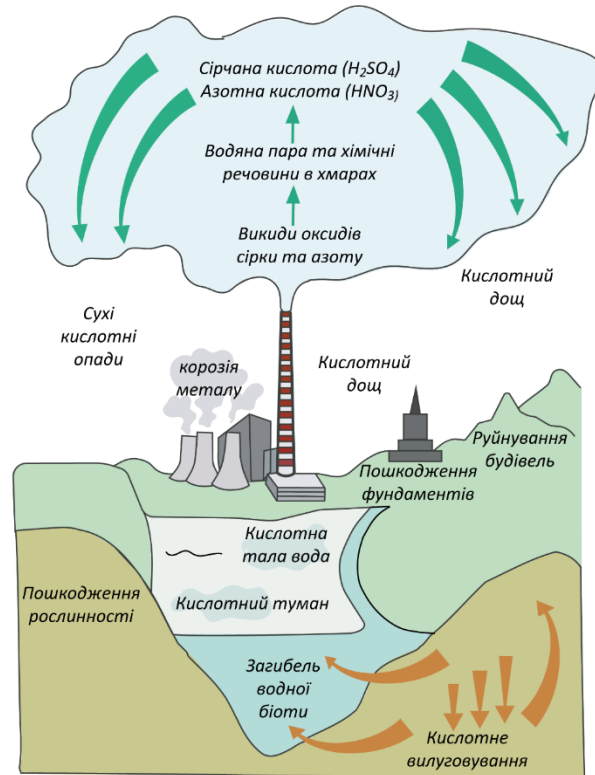


Рис. 1.5. Схема утворення кислотних опадів та їх вплив на екосистеми

Внаслідок забруднення атмосфери техногенними викидами на урбанізованих територіях змінюється тепловий режим, зростає концентрація шкідливих речовин у повітрі, а концентрація вуглекислого газу і водяної пари в на даний час вже досягла 90% від загальної кількості забруднювачів. Як наслідок, з'явилась ще одна проблема, «парниковий ефект».

До усього вищеперерахованого в найбільшому ступені схильні міста, що активно розвиваються. За даними (Безуглая Э.Ю., 1983, Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В., 1991) температура повітря в містах, в середньому, підвищується на 7-15°C порівняно з передмістями внаслідок

місцевого «парникового ефекту», теплових викидів транспортних засобів, промислових підприємств та інших видів господарської діяльності.

Основними джерелами забруднення атмосфери, в тому числі і теплового, є транспортні засоби (об'єм забруднення атмосфери складає 60%) і промислові установки і підприємства (близько 30%) (Игнатов В. Г., Кокин А. В. 2003, Матвеев Ю.Л., Меркурьева Н.А., 1997).

Кам'яні будівлі, асфальтобетонне покриття і темні штучні поверхні виступають акумуляторами тепла в місті. Так, літом температура таких поверхонь часом може досягати: 52°C (м. Москва), 65-70°C (м. Єреван), 73°C (м. Одеса), 80°C. (м. Ташкент) (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Характеристика міських островів тепла в мегаполісах

Місто	МОТ	Прибережні внутрішні	Річкова система	Клімат	Чисельність населення, чол	Щільність населення чол/км ²
Нью-Йорк	Макс.: 5.4°C Мін.: ≈3°C	Прибережний	р. Гудзон	Помірний океанічний	8.622.698 (у 2017 р.)	10.932 (у 2017 р.)
Париж	Макс.: 6°C Мін.: 2,6°C	Прибережний	р. Сена	Західно-європейський помірно-вологий	2206.488 (у 2018 р.)	21.000 (у 2018 р.)
Лондон	8-9 °C	Прибережний	р. Сена	Західно-європейський помірно-вологий	2206.488 (у 2018 р.)	21.000 (у 2018 р.)
Пекін	7.9°C	Внутрішній	р. Ёнгдінг, р. Чаобайхе	Вологий континентальний, мусонний клімат	21.710.000 (в 2017 р.)	1.291 (в 2017 р.)
Токіо	Макс.: 8.1°C Мін.: 5.3°C	Прибережний	р. Тама р. Суміда	Вологий субтропічний	13.515.271 (в 2015 р.)	6.169 (в 2015 р.)
Делі	Макс.: 8.3°C Мін.: 4.7°C	Внутрішній	р. Джамна	Вологий субтропічний	19.072.564 (в 2017 р.)	12.852 (в 2017 р.)
Ханой	Макс.: 2,25°C	Прибережний	Р. Красна	Вологий субтропічний	7.238.400 (в 2016 р.)	2.164 (в 2016 р.)

	Мін.: 0,5°C					
Москва	14°C	Внутрішній	Р. Москва	Континентальний	12.380.664 (в 2017 р.)	4.880 (в 2017 р.)

В крупних містах вплив МОТ може поширюватись на відстань до 30-50 км з підвітряного боку міста (Исаев А.А., Каллистратова М.А., Локощенко М.А., Пекур М.С., 1994). В Європі різниця температур повітря в центрі крупного міста і на його околицях у певних умовах досягає 15°C. Але, зазвичай, літом даний показник становить в середньому, 5-7°C, зимою – 2-8°C (Кадыгров Н.Е., Кручештцкий Г.М., Лыков А.Д., 2007).

На появу МОТ, багато в чому, здійснює вплив аерація міської забудови. Як правило, швидкість вітра в місті менше на 10-20%, чим за межами міста. Найчастіше, це зумовлено елементами захищеності, якими виступають підвищення рельєфу, лісові ділянки, будівлі та споруди (Егорычев О.О., Дуничкин И.В., 2013).

У крупних містах напрямок вітру міняється порівняно з його нормальним напрямком за межами міста. Причинами даної особливості є зімкнута міська забудова, де вітер дує в напрямку протяжних вуличних магістралей, на яких є термічні відмінності, що спричиняють утворення місцевих завихрень, наприклад, на дворових територіях (Антонович В.В и др., 2005, Клипов Ф.Я., 1968) (рис. 1.6).

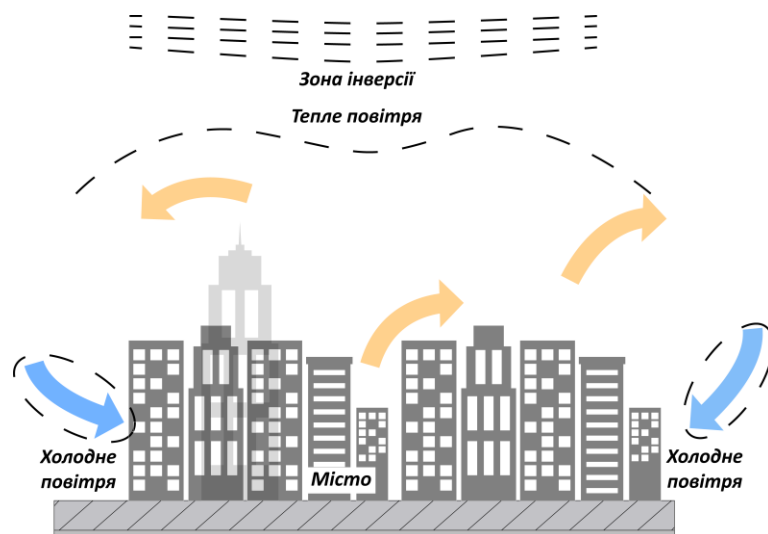


Рис. 1.6. Схема циркуляції повітря поблизу «острова тепла»

Важливою характеристикою клімату міста є роза вітрів, яку необхідно враховувати при визначенні місця розташування промислових підприємств (Белан Б.Д., 1996). Зазвичай, для ухвалення рішень про розташування промислових підприємств і при розрахунках норми шкідливих викидів від існуючих на даній території підприємств розраховують розу вітрів по даних найближчої метеостанції (Нахаев М.И., Кузнецова И.Н. , 2008, Гиясова И.В., Гиясов Т.Б, 2020). На рис. 1.9 продемонстрована циркуляція повітряних потоків, які включають різні забруднюючі речовини, що виникли від викидів промислових підприємств у місті, при різних варіантах погодних умов.

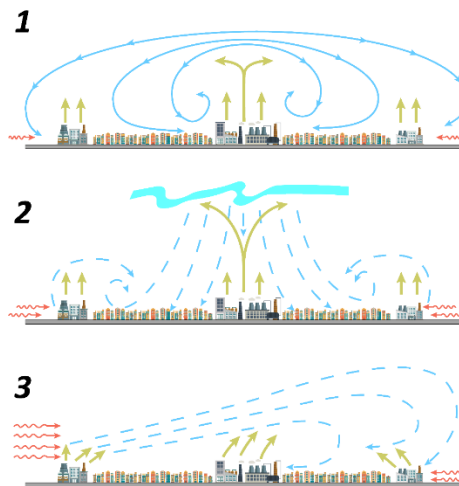


Рис. 1.9. Схема циркуляції повітряних потоків з забруднюючими речовинами від викидів промислових підприємств у місті при різних варіантах погодних умов: 1– антициклон; 2– температурна інверсія; 3– циклон

При розв'язанні питання з розміщення промислових підприємств дуже важливими є дані по кліматичних умовах у зв'язку з тим, що вони обумовлюють схему розсіювання небезпечних речовин, які утворюються в процесі роботи підприємства (Безуглая Э.Ю.,1980, Бретшнайдер Б., Курфюрст И.,1989, Ле минь Туан, Алексашина В. В. ,2018). Одночасно, не менш важливою є область впливу міста на НПС.

Область НПС, на яку впливає крупне місто або міська агломерація, висотою близько 5 км і радіусом, що перевищує радіус міста в 40-50 разів

називається «град сферою» (Григорьев В. А., Огородников И. А., 2001, Кратцер П.А., 1958, Гусев М.А., 1975). Дане явище може охоплювати цілі регіони. Як приклад, можна навести США і країни Західної Європи, коли локальні зміни клімату в близько розташованих населених пунктах (агломераціях) впливають на клімат на значних відстанях.

Таким чином, підсумовуючи наведене, під терміном «острів тепла» розуміють область міського простору з підвищеними порівняно з периферією температурами повітря. Як правило, центральна частина МОТ розташовується в стороні, куди спрямовані переважні вітри (Хромов С.П., Мамонтова Л.И., 1974).

1.2. Негативний вплив міських островів тепла на екологію

МОТ концентрують в собі небезпечні для людини і НПС газоподібні і пилові викиди від промисловості, енергетики та транспорту, які випадають з дощами на території міста, як правило, на певній відстані від МОТ у бік переважного вітру (Дудорова Н.В., Белан Б.Д., 2016, Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л., 2000, Абдуллаев С. М., 2008). Шкідливий вплив таких дощів на людину можна послабити при переносі дощів до областей над територіями парків або водних поверхонь, що сьогодні цілком можливо здійснити.

Вплив МОТ на збільшення енергоспоживання будівель. Области з більш високими температурами, що виникли в місті приводять до необхідності збільшення енергоспоживання будівель на їх охолодження. Потреба в зростанні електроенергії для охолодження будівель збільшується на 1,5-2,0% при підвищенні температури повітря на кожні 0,6°C, а при виникненні ефекту МОТ збільшення зростання в електроенергії досягає 5-10%, що спричинює зростання витрат (Малахов В.М., Сеніч В.Н., 1997).

Вплив МОТ на збільшення забруднення атмосферного повітря. Підвищена температура повітря може спричинити збільшення забруднення атмосферного повітря внаслідок:

- збільшення енергоспоживання будівель;
- появи хімічних реакцій у повітряному середовищі: під впливом високих температур відбувається перетворення первинних забруднювачів повітря у вторинні, більш токсичні і небезпечні для здоров'я людей;
- високого атмосферного тиску, слабого вітру і відсутності опадів або їх малої кількості, які спричинюють «застій» забруднюючих речовин над рівнем землі.

При згорянні викопного палива в атмосферу виділяється забруднюючі речовини, такі як діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю, ртуть (Hg) і діоксид вуглецю CO_2 , який сприяє утворенню кислотних дощів і виникненню парникового ефекту, що викликає появу глобальному потеплінню (Гуния Г.С., 2006, Маккормик Р.А., 1989, Бримблкумб П., 1988, Степанова Н. В., Шлычков А. П., 2004).

Зазначені забруднювачі повітря шкідливі як для здоров'я людини, так і спричинюють виникнення проблем, пов'язаних з якістю повітря, таких, як: утворення приземного озону (смогу), кислотні дощі тощо. Збільшення використання викопного палива на електростанціях сприяє викиду парникових газів, таких як двоокис вуглецю (CO_2), що призводить до глобальної зміни клімату (Белан Б.Д., 2007, Белан Б.Д., 1992, Белан Б.Д., Скляднева Т.К., 2001, Звягинцев А.М., 2010). Разом з тим, зосередження перерахованих забруднюючих речовин в МОТ в сукупності з високими температурами повітря створює несприятливий вплив на НПС і на людину.

Вплив МОТ на якість води. Підвищення температури горизонтальних штучних поверхонь, таких як тротуари і покрівля будівель, призводить до збільшення температури зливної води під час дощу, що обумовлює зростання і розмноження хвороботворних бактерій у воді (Берлянд М. Е. 1992).

1.3. Формування теплового балансу на поверхні урбанізованих територій

Локальний клімат у місті можна розглядати як результат безперервних взаємодій між потоками енергії, які регулюються геометрією поверхні і фізичними властивостями елементів (Белан Б.Д, 2009). Спочатку були спроби дослідити і пояснити зміну міської температури в часі і просторі для дослідження появи МОТ та добового розвитку його стану (Оке Т. Р., 1982).

Сьогодні в крупних містах простежується тенденція до значного збільшення температури поверхонь і повітря в міському середовищі порівняно з сільськими (еталонними) околицями (Оке Т.Р., 1982). В МОТ можна спостерігати денний і сезонний цикли. Добові коливання температури в МОТ, головним чином, визначаються сонячною радіацією і здатністю міської поверхні відбивати, зберігати і перевипромінювати сонячну енергію. Сезонні зміни краще пояснюються впливом кліматичних факторів, наприклад, швидкості вітру, хмарності або тривалістю дня (Оке Т. Р., 1982).

Форма міської поверхні впливає на розвиток турбулентності і середнього профіля вітру в міському пограничному шарі. Атмосферна стабільність та турбулентний профіль впливають на інтенсивність тепло- і вологообміну між поверхнями елементів і міського середовища і атмосферою (Harman I.N., 2003). Обмін енергією між поверхнями і повітрям у міському середовищі можна розглядати через «об'ємний підхід усереднення» (Оке Т.Р., 1987) (рис. 1.10).

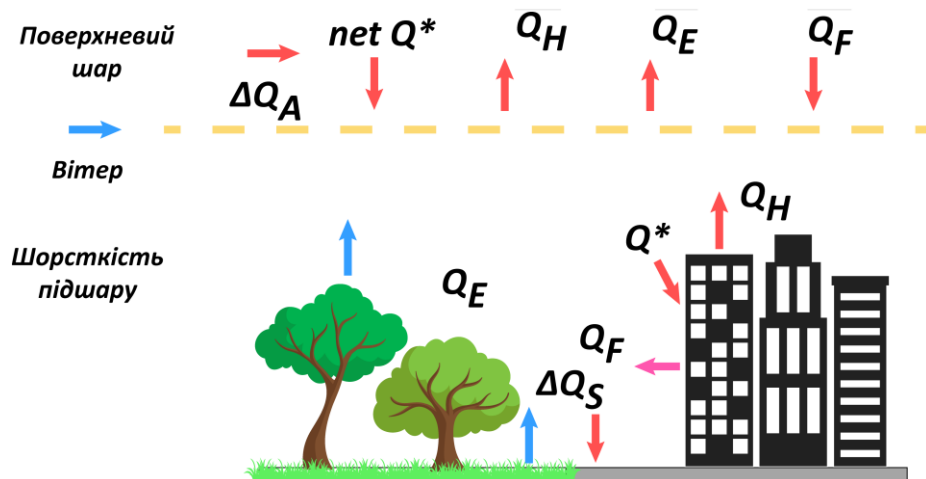


Рис. 1.10. Теплові потоки в різних шарах міської атмосфери (Pearlmutter D., 2007)

Енергетичний або тепловий баланс поверхні в міському середовищі визначається по формулі (Будыко М.И., 1956, Николаенко А.П., 2008):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (1.1)$$

де, Q^* – тепловий потік сонячної енергії, (Вт/м²);

Q_F – антропогенний тепловий потік, (Вт/м²);

Q_H – потік жари, (Вт/м²);

Q_E – прихований тепловий потік, (Вт/м²);

ΔQ_S – тепловий потік чистої накопиченої енергії, (Вт/м²);

ΔQ_A – тепловий потік чистої енергії від адвекції, (Вт/м²).

Ніччю повітря в центрі міста зазвичай тепліше, чим повітря в сільських районах, тому МОТ визначається різницею температур між містом і сільськими районами (ΔT_{u-r}), яка з'являється за рахунок різниці в енергетичному (тепловому) балансі.

В працях (Oke T.R., 1987) з досліджень клімату в пограничному шарі були представлені дві емпіричні залежності між інтенсивністю МОТ і відношенням висоти будівлі до відстані (H/B) або функцією елемента неба:

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \cdot \ln\left(\frac{H}{B}\right) \quad (1.2)$$

$$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88 \cdot \Psi_S \quad (1.3)$$

$$\Psi_S = \cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{2H}{B}\right)\right). \quad (1.4)$$

1.4. Вплив планування міст на формування ефекту міських островів тепла

1.4.1. Впливе планування міст на формування міських островів тепла

Формування ефекту МОТ сприяє велика кількість факторів. Одним з найбільш важливих є міське планування території.

Аспекти міського планування пов'язані як з внутрішніми факторами, такими як розмір міста, чисельність населення, щільність забудови і землекористування, так із зовнішніми факторами, такими як клімат, погода та пори року. Геометрія забудови міста значно впливає на тепловий баланс у місті. Так, наприклад, будівлі, що розташовані на шляху повітряного потоку, обумовлюють зниження швидкості вітру і підвищення температури повітря на даній території. З іншого боку, необхідно забезпечувати достатній простір між будівлями для циркуляції вітру. Разом з тим, велику роль відіграють властивості конструкції огорожі будівель. Так, наприклад, панорамні засклені конструкції висотних будівель, як правило, спричинюють появу підвищених температур поблизу і всередині таких будівель (*Voogt J.A., Oke T.R., 2003, Ле минь Туан, Алексашина В. В., 2018, Джедид Мурад., 2015*).

В містах на місці колись озелених природних територій споруджуються нові непроникні штучні поверхні (тротуари і дороги), будівлі і споруди, що спричинює зменшення рослинного покриву. Природні озеленені поверхні можуть зберігати теплову енергію шляхом сумарного випаровування вологи з поверхонь листя і ґрунту і тим самим відбувається регулювання температури поверхні землі. В сільських районах знаходиться більше озелених природних територій і об'єктів озеленення, внаслідок чого з поверхні листя випаровується велика кількість вологи. Це дозволяє літом зберігати повітря прохолодним. Разом з тим, для міських районів характерна значна площа непроникних поверхонь, які є причиною високої швидкості стоку і низького ступеня інфільтрації, що спричинює меншу кількість вологи, доступної для сумарного випаровування, порівняно з природним ґрунтовим покривом. Це сприяє підвищенню температури поверхні і повітря в міських районах. Способом часткового вирішення проблеми МОТ може стати озеленення міських територій (*Oke T.R., 1982*).

Енергія сонячного випромінювання складається з інфрачервоних променів (52%), видимого світла (43%) і ультрафіолетових променів (5%).

Енергія сонячного випромінювання в значному ступені бере участь в процесі формування МОТ. Разом з тим, на формування МОТ впливає показник альbedo.

Альbedo – це співвідношення між падаючою і відбитою сонячною енергією. Альbedo залежить від розташування поверхонь, матеріалу і кольору (Зацерковний В.І., 2018). Світлі матеріали мають меншу здатність поглинати енергію і високе альbedo.

$$\text{Альbedo} = \frac{\text{Відбита енергія}}{\text{Падаюча енергія}} \quad (1.5)$$

Матеріали темного кольору володіють високою поглинальною спроможністю у денний час і високою відбивною здатністю у нічний час (формула 1.5).

Зазвичай в міських районах темні поверхні мають менше альbedo (Белан Б.Д., Скляднева Т.К., Ужегова Н.В., 2005).

Теплова емісія також є важливим фактором в утворенні МОТ. Поверхні з високим коефіцієнтом випромінювання будуть виділяти більше тепла, при цьому залишаючись холодними.

Коефіцієнт випромінювання розраховується як кількість тепла, яке пройде через матеріал товщиною 1 метр за 1 годину при різниці температур всередині і зовні на 1 градус Цельсія. Відповідно, одиницею виміру будівельних матеріалів є Вт / (м·С°) – 1 Ватт, розділений на добуток метра і градуса.

Більшість будівельних матеріалів, крім метала, мають високу тепловіддачу. Радіаційні властивості деяких матеріалів наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Радіаційні властивості деяких матеріалів (Оке Т.Р., 1987).		
Матеріал	Альbedo (α)	Випромінювальна здатність (ε)
Асфальт	0.05-0.20	0.95
Бетон	0.10-0.35	0.71-0.91
Міські райони	0.10-0.27	0.85-0.96
Ґрунти	0.05-0.40	0.98-0.90
Зелені насадження	0.16-0.26	0.90-0.95

1.4.2. Роль системи озеленення в формуванні міського середовища

Зелені насадження відіграють велику роль у навколишньому середовищі міста (Коваленко П. П., 1980, Коваленко П. П., Орлова Л. Н., 1993, Ле Минь Туан, 2019).

В процесі людського розвитку природне навколишнє середовище зазнає певних змін. Так, наприклад, площа озеленення поступово зменшується, особливо в крупних містах (Лицкевич В.К., Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И. Город, 2007).

Зміна клімату в сукупності із забрудненням навколишнього середовища наносять шкоду здоров'ю людини, в тому числі і психологічному (Ландсберг Г.Е., 1983, Демин В.И., 2016). Для захисту НПС і покращення життєвого простору на додаток до заходів зі скорочення джерел забруднення надзвичайно важливо використання зелених насаджень (Гусев, Н. М., 1975, Есаулов, Г.В., 2014, Ле Минь Туан, 2020). Система зелених насаджень виконує такі функції:

– системи озеленення сприяють покращенню клімату, оскільки вони володіють здатністю утримувати вологу, поступово випаровуючи її і створюючи комфортні умови для існування живих організмів, здатністю впливати на швидкість вітру і вентиляцію (рис. 1.11);

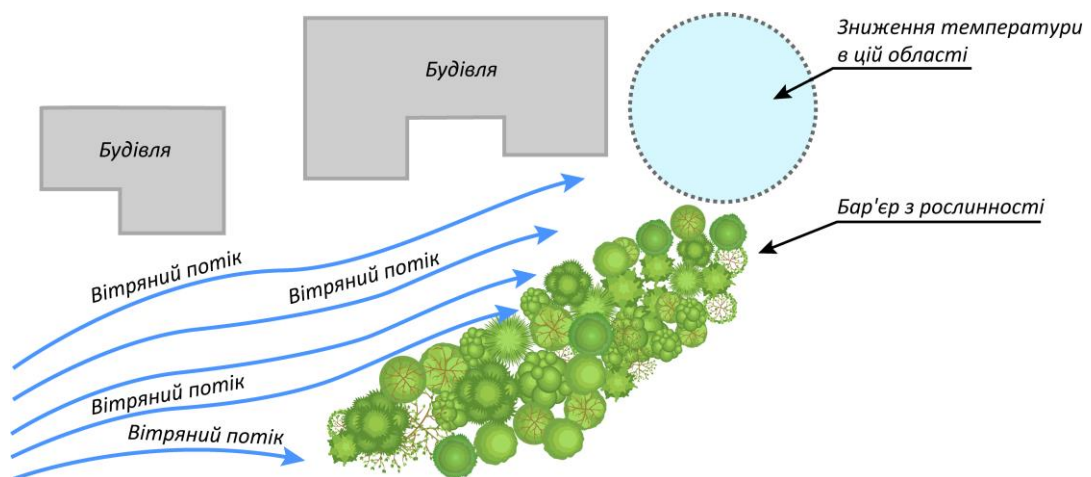


Рис. 1.11. Схема елементів (ландшафт, будівлі і споруди), які виступають як бар'єри для вітру

– системи озеленення захищають навколишнє середовище, поглинаючи CO₂ і виділяючи O₂, запобігаючи появі шкідливих газів і пилу в повітряному середовищі. В передмісті зелені насадження ефективні проти ерозії, вони також регулюють рівень ґрунтових вод (рис. 1.12).

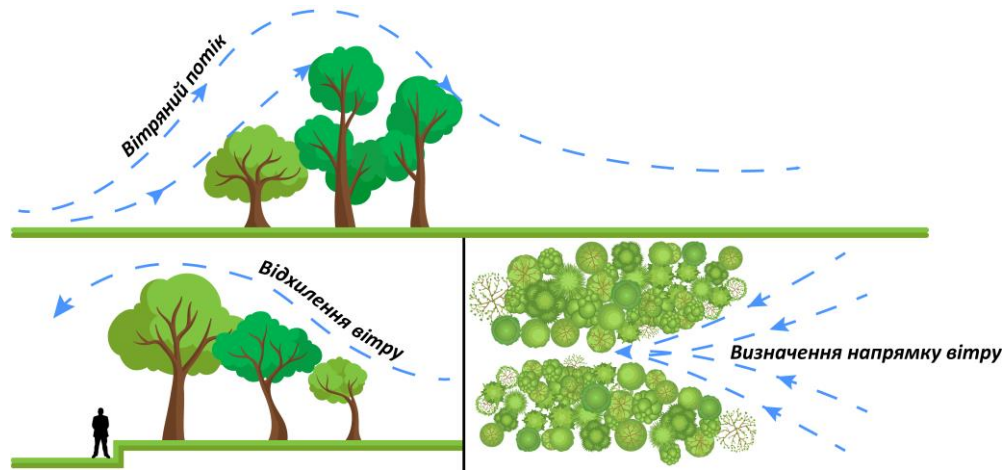


Рис. 1.12. Схема об'єктів озеленення (дерева та чагарники), що впливають на напрямок і швидкість вітру

Зелені насадження також сприяють зменшенню шуму в центрі міста.

Міська система озеленення відіграє важливу роль в архітектурі і ландшафтному дизайні. Міська рослинність крім практичної виконують і естетичну функції.

Більш того, зелені насадження в сукупності з об'єктами архітектурної спадщини і різноманітною формою ландшафту формують естетичну цінність (Куприянов В.Н., 2012, Серебровский Ф.Л., 1959). Крім цього, розміщення об'єктів озеленення, особливо дерев, у кожній частині міста сприяє соціальній діяльності людини, наприклад, розвитку туризму (Лицкевич В.К., 1984).

Площа зелених насаджень у певній частині міста повинна бути пропорційною щільності населення, що мешкає на даній території.

1.4. Класифікація міських островів тепла

Міські теплові острови поділяються на два типи:

- «надземний МОТ»;
- «атмосферний МОТ».

Утворення «надземного МОТ» – це явище, при якому такі поверхні, як дахи і тротуари, нагріваються у денний час, зберігають температуру протягом дня і віддають енергію тепла у вечірній час. Міські поверхні більше схильні впливу сонця в порівнянні з затіненими поверхнями в сільській місцевості. Хоча феномен «надземного МОТ» можна спостерігати як днем, так і ніччю, він досягає максимальних позначок у денний час. Коли температура міського повітря стає вище, чим у суміжних сільських районах, вона визначається як «атмосферний МОТ», який в свою чергу, поділяється на два види: «міський шар» і «поверхневий шар» (Стулов Е.А., Постнов А.А., 1991, Шукуров И.С., 2020).

«Міський шар» формується від поверхні землі до верхньої позначки крони дерев або дахів будинків, а «поверхневий шар» розташовується в повітряному масиві від поверхні дахів або верхнього рівня дерев і простягається до точки, де міський ландшафт більше не впливає на атмосферу. Незважаючи на це, «поверхневий шар», як правило, впливає на збільшення «МОТ», оскільки вони є суміжними.

Основні характеристики поверхневого і міського теплових островів представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Основні характеристики поверхневого і міського теплових островів

Особливість	Міський шар МОТ	Поверхневий шар МОТ
Часовий розвиток	<ul style="list-style-type: none"> – присутній у будь-який час дня і ночі; – найбільш інтенсивний протягом дня; – активніше проявляється у літній період 	<ul style="list-style-type: none"> – може бути менш вираженим або не існувати в у денний час; – найбільше проявляється у темну пору доби або на світанку; – активніше проявляється у зимній період
Пікова	Великий розмах	Менший розмах значень:

інтенсивність (найбільш інтенсивні умови MOT)	просторових і часових значень: день: 10-15 °С ніч: 5-10 °С	день: 1–3 °С ніч: 7–12 °С
Типовий метод ідентифікації	Непрямий вимір Дистанційне зондування	Прямий вимір. Стаціонарні метеостанції. Мобільні траверси
Типове зображення	Теплові зображення	Ізотермічні карти Графік температури

Більш високі температури повітря, що виникли внаслідок формування MOT, особливо в літній період, можуть впливати на навколишнє середовище і якість життя мешканців міста. Разом з тим, деякі впливи можуть бути позитивними, наприклад, збільшення тривалості вегетаційного періоду, однак більшість з них – негативні.

1.5. Аналіз температур поверхні найбільших міст України

На рис. 1.14 – рис. 1.18 представлені індекси рослинності (NDVI) і температури поверхонь найбільших міст України.

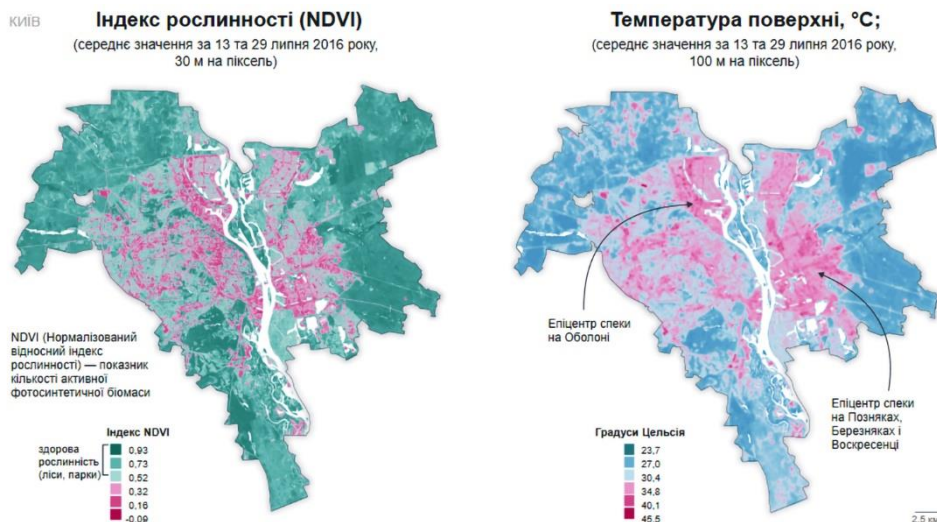


Рис. 1.14. Індекси рослинності (NDVI) і температура поверхні м. Київ

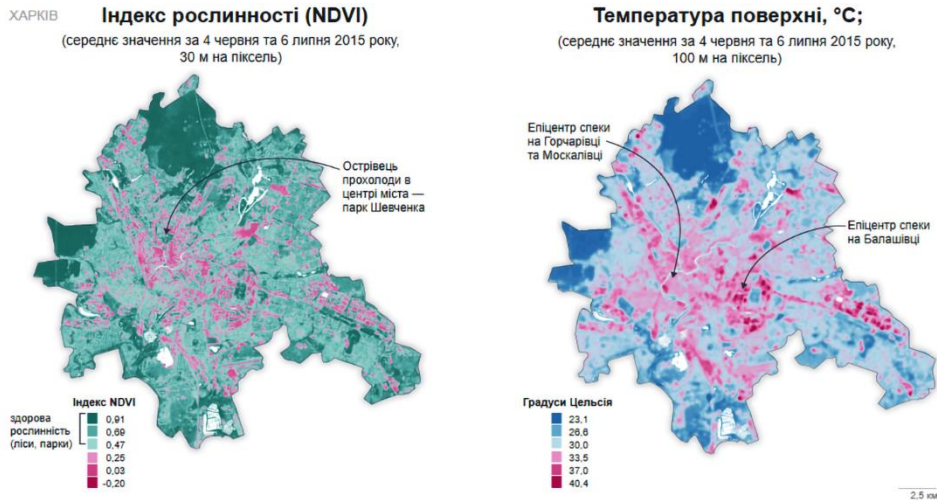


Рис. 1.15. Індекси рослинності (NDVI) і температура поверхні м. Харків

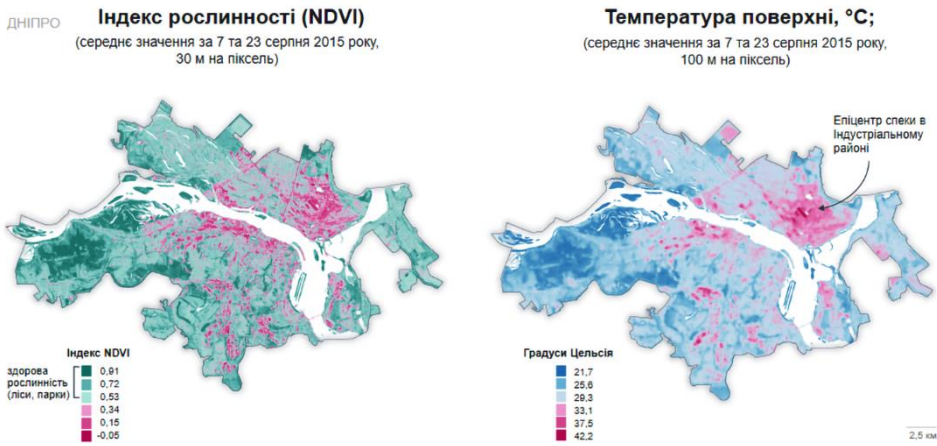


Рис. 1.16. Індекси рослинності (NDVI) і температура поверхні м. Дніпро

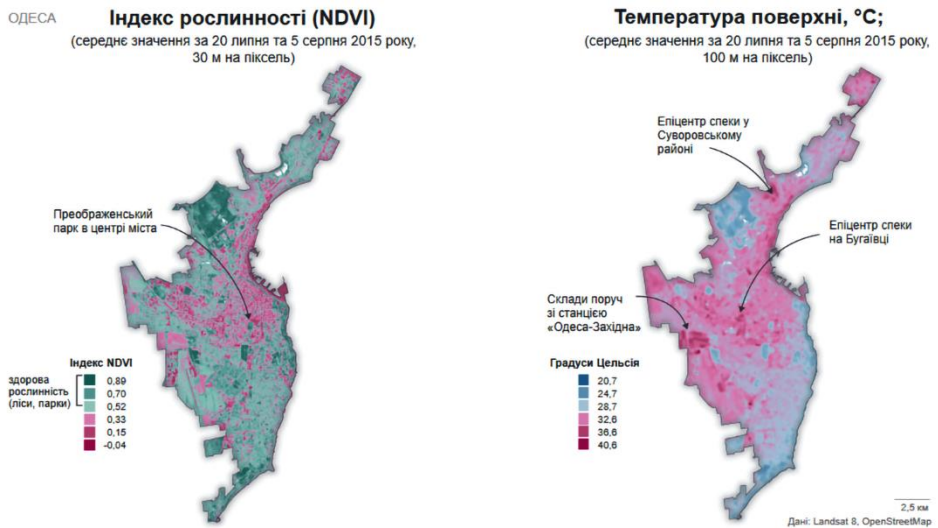


Рис. 1.17. Індекси рослинності (NDVI) і температура поверхні м. Одеса

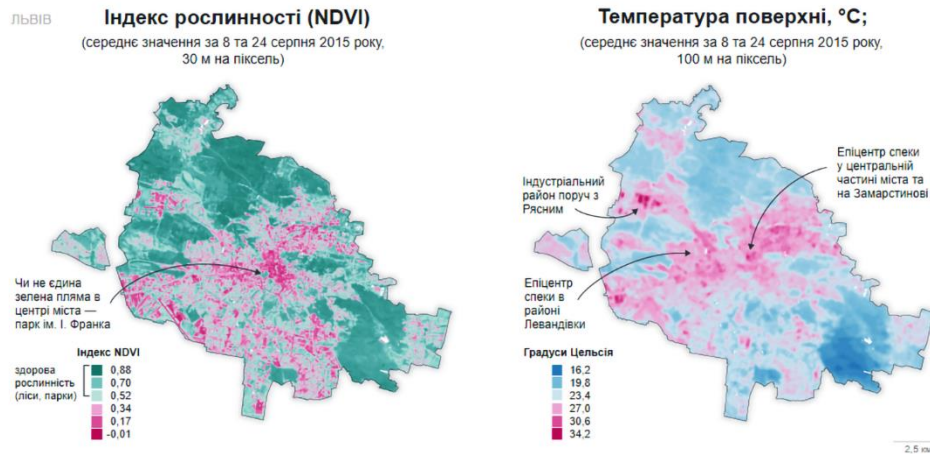


Рис. 1.18. Індеси рослинності (NDVI) і температура поверхні м. Львів

У більшості випадків карта рослинності (NDVI, або нормалізований відносний індекс рослинності) доволі точно віддзеркалює острови спеки.

На карті температур Києва (рис. 1.14) чітко видно острови спеки на Оболоні та Позняках, де температура може сягати 35–40 °C, в той час коли на дачних Осокорках – близько 25–30 °C. Звісно, найбільш спекотне у промзонах, але «теплові острови» помітні і в густо забудованих центральних та спальних районах.

Дерева поглинають вуглекислий газ і дають таку бажану влітку прохолоду. Але політика озеленення в українських містах кульгає на обидві ноги. Тож більшості містян доводиться жити та працювати в бетонних пустелях.

Багатьом містам України постійно загрожують вирубки зелених зон. Переважно – незаконні. Інший бік проблеми – недбалий догляд комунальних підприємств за деревами та неврахування зелених зон при житловій забудові. Комунальники в більшості українських міст зрізають дерева чи обрізають гілки без відповідної документації. На жаль, в Україні в жодному місті немає повноцінного реєстру зелених насаджень. До прикладу, в Нью-Йорку кожне дерево зареєстроване та має свій інвентарний номер (*file:///C:/Users/Admin/Downloads/531-Текст%20статми-632-1-10-20180418.pdf*).

Крім парків, у Нью-Йорку 675781 дерев. Вони всі нанесені на карту (рис. 1.19), де кожне (!) дерево має свою персональну сторінку, на якій вказана

порода, форма листя, діаметр стовбура і навіть точні координати розміщення дерева і зображення із Google-панорам.

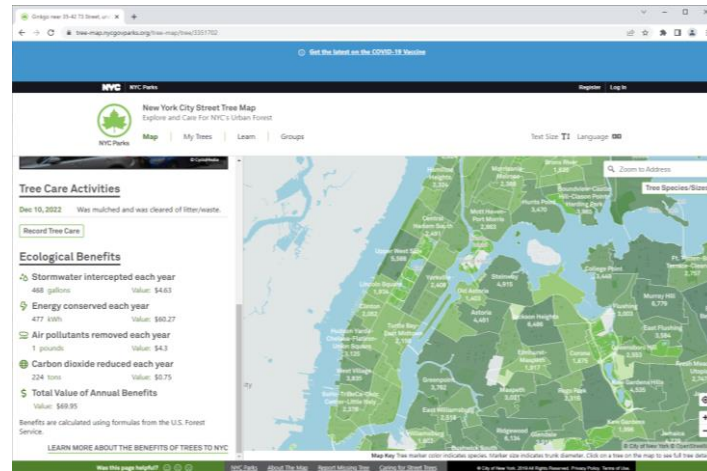


Рис. 1.19. Карта обліку дерев Нью-Йорка

В середньому одне дерево економить бюджету 165 доларів США. В сумі всі 675 тис. дерев поглинають 285 тонн вуглекислого газу щорічно, фільтрують 3,7 млрд літрів води і зберігають 676 млн кіловат на годину електроенергії. У картці дерева розраховують економічну користь за чотирма показниками: скільки дерево відфільтрувало дощової води, зберегло електроенергії, очистило повітря і знизило рівень діоксиду азоту. Всі формули і грошові розрахунки беруть із калькулятора i-Tree Лісового управління США. У міській базі даних можна переглянути, коли його посадили, який його стан і хто за ним доглядає. (<https://zaholovok.com.ua/10-mifiv-pro-amerikantsiv-abo-chomu-ukrajintsi-tak-lyublyat-stereotipi>). Для українських міст – це мрія.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МІСЬКИХ ОСТРОВІВ ТЕПЛА

2.1. Методика проведення моніторингу температури поверхні землі

Температура поверхні землі є важливим фактором, що формує НПС, впливаючи на фізичні процеси, що відбуваються в ґрунті і в атмосфері (Дубровская С.А., Ряхов Р., 2015, Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Сухоруков В.А., 2020).

Виміряти температуру можна або наземними методами або на основі супутникових даних.

Для визначення температури поверхні землі на великій території метеорологічними станціями потрібно розташовувати на поверхні суші в значній кількості і експлуатувати протягом тривалого періоду часу для одержання точних даних (Попова И. В, Куролап С. А., Виноградов П. М., 2018, Кадыгров Е. Н., Коддасв А.В. Миллер Е. А., Соколов В. В. и др. ,2007).

Гідрометеорологічна служба України являє собою багатофункціональну розгалужену систему, що організаційно оформилася ще в 1921 р. Вона здійснює комплекс гідрометеорологічних спостережень і прогнозування, вивчення змін клімату, спостереження за забрудненням навколишнього природного середовища на базовій мережі. Систематичні цілодобові спостереження за станом погоди проводяться на 187 метеорологічних станціях, з яких 49 залучено до передачі даних у глобальну систему телез'язку Всесвітньої метеорологічної організації (<https://www.ecoleague.net/forumy-konferentsii-kruhli-stoly-seminary/ekolohichnyi-kalendar/berezen/item/305-vseshvitnii-meteorologichnyi-den>).

За останні 10 років якість українських прогнозів, як стверджують синоптики, підвищилась на 2,5 %. А все тому, що Україна одержала повний доступ до інформаційних ресурсів Всесвітньої метеорологічної організації .

Незважаючи на це, наземних метеостанцій для проведення моніторингу температури землі в Києві дуже мало (табл. 2.1), тому досліджувати температуру поверхні землі в місті по даних існуючих метеостанцій вкрай складно.

Таблиця 2.1

Метеостанції Києва

Синоптичний індекс	Назва метеостанції	Широта,	Довгота	Висота над рівнем моря	Країна
33341	Київ Гостомель	50,6	30,2	157	Україна
33344	Київ Святошин	50,5	30,4	186	Україна
33345	Київ город	50,4	30,6	167	Україна
33346	Київ Жуляни	50,5	30,5	179	Україна
33347	Київ Бориспіль	50,3	31	122	Україна

На сьогодні синоптики можуть проаналізувати тільки відмінність погоди в центрі і на периферії – Київ перебуває під куполом тепла і чим ближче до окраїн, тим ночі холодніше.

У зв'язку з наведеним, цілком зрозуміло, що єдиним виходом для моніторингу температури поверхні землі залишаються дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Оцінка температури земної поверхні по супутникових даних виконується з 1960-х рр. Для цього використовуються ДЗЗ теплового інфрачервоного (ІЧ) діапазона, на основі яких обчислюється температура поверхні Землі. Зокрема, з 1970 р. функціонують супутники серії NOAA (США), на яких встановлюється скануючий радіометр високого розрізнення AVHRR, який вимірює відбивну здатність Землі в 5 спектральних діапазонах, у тому числі в інфрачервоному тепловому. Основне призначення – моніторинг хмарного покриву і вимір вихідного теплового випромінювання Землі (Зацерковний В.І., 2018).

Широко використовуються дані спектро радіометра MODIS, встановленого на американських супутниках Terra і Aqua. Він здійснює щодобову зйомку з

просторовим розрізненням 1000 м у 36 спектральних каналах, серед яких – канали теплового ІЧ-діапазону. Температура поверхні Землі (LST – Land Surface Temperature) – один із стандартних інформаційних продуктів MODIS (http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=2&table=KA).

Дані ДЗЗ теплового ІЧ-діапазону на даний час широко використовуються для дослідження природних і антропогенних об'єктів і процесів, моніторингу небезпечних природних явищ, оцінки стану геосистем (*Зацерковний В.І., 2018*).

Однією з провідних країн у світі, яка здійснює на підставі даних супутникових зображень дослідження земної поверхні є США (*Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., 2014, Оке Т. Р., 2017*).

Американська програма Landsat розпочала своє існування в 1972 р., з цього часу було запущено дев'ять поколінь супутників. Починаючи з Landsat-4 і Landsat-5, у яких з'явився сенсор ТМ (англ. Thematic Mapper – Тематичний картограф, камера для цілеспрямованого картографування), що фіксував енергію теплового випромінювання, і Landsat-7 із ММС (мультиспектральним сканером), який забезпечив одержання мультиспектрального зображення. Сенсор ЕТМ+ (англ. Enhanced Thematic Mapper + Удосконалений тематичний картограф) у Landsat-7 може фіксувати теплову енергію об'єктів на природних поверхнях і отримувати тепловізійне зображення з доволі високим розрізненням (*Попова, І. В., 2017*). З появою цього обладнання технології ДЗЗ дозволили визначати температуру поверхні у будь-якій області на землі (*Кадыгров Е.Н., Кузнецова І.Н., Голицын Г.С., 2002*).

У 2013 р. був запущений Landsat-8. Щодоби супутник знімає близько 400 сцен (площа близько 12.5 млн. км²), які після обробки у відповідності з поточним стандартом продуктів Landsat, зберігаються в Центрі збереження даних Геологічної служби США. Більша частина даних надається користувачам менше чим через 24 години після прийому.

На борту космічного апарата встановлені багатоканальний скануючий радіометр OLI (Operational Land Imager) і скануючий двоканальний ІЧ-радіометр

TIRS (Thermal Infrared Sensor). Радіометр OLI дозволяє отримувати зображення земної поверхні з максимальним розрізненням 15 м з використанням удосконалених технологій космічної зйомки. ІЧ-радіометр TIRS призначений для одержання «теплого» зображення земної поверхні з розрізненням 100 м.

У 2021 році на заміну Landsat-7 був запущений Landsat-9.

2.2. Матеріали і методи аналізу температури поверхні землі в Києві

Набори даних, що використані в дослідженні, включають в себе супутникові знімки Landsat досліджуваного регіону в трьох часових точках (1999, 2009 та 2016 роки), за даними архіву Геологічної служби США (USGS). В табл. 2.2 наданий опис знімків Landsat.

Таблиця 2.2

Дані супутникових знімків Landsat, що використані в дослідженні

Сенсор	Ідентифікатор сцени	Дата одержання	Сезон
Landsat-5 TM	LT51270451999266BKT00	23.09.1999	Осінь
Landsat-5 TM	LT51270452009309BJC00	05.11.2009	Осінь
Landsat-8OLI/TIRS	LC81270452016281LGN01	07.10.2016	Осінь

На додаток до супутникових знімків також використовуються такі дані:

- топографічна карта території дослідження;
- характеристика території дослідження (географічне положення, природні умови, населення, соціально-економічне положення тощо).

Математичні формули складають алгоритм максимальної імовірності (Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., Константинов М., 2015, Richards, John A., 2013):

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i)$$

(2.1)

де i – об'єкти класифікації;

x – кількість універсальних каналів;

$p(\omega_i)$ – значення імовірності, яке виникає, коли об’єкт ω_i подібний іншим об’єктам;

$\sum_i^{-1}(x - m_i)$ – обернена матриця об’єктів ω_i ;

m_i – зміна значень вектору.

Це правильна класифікація, але вона вимагає багато часу для обрахунку і залежить від нормального розподілу даних. Необхідно включати такі кроки:

- визначення типів земель з метою використання цих даних для інтерпретації зображення;
- вибір спектрів і структури для відділення об’єктів один від одного;
- виділення області зображення для сортування результатів;
- оцінка точності зразка при порівнянні кожного зразка з іншими зразками і знаходження відмінностей;
- оцінка точності класифікації зображень на основі індексу Каппа (κ), цей індекс знаходиться в діапазоні від 0 до 1 і вказує на пропорційне зменшення похибки, допущеної при повній класифікації випадковим чином.

$$\kappa = [N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \dots x_{+i})] / [N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \dots x_{+i})] \quad (2.2)$$

де N – загальна кількість точок відбору проб;

r – кількість об’єктів класу;

x_{ii} – кількість точок поля в першому класі;

x_{i+} – загальна точка поля i -го класу вибірки;

x_{+i} – загальна кількість точок поля наступного i -го класу.

Ідентифікація системи класифікації є першою важливою задачею при застосуванні ДЗЗ для побудови карти стану поверхні землі. Налаштування анотації заснована не тільки на об’єктах, видимих на зображенні, але й на багатьох інших факторах: розрізненні зображення, характеру сезону, часу і інформації про поле (Исаков С.В., Шкляев В.А., 2014). Тому в дослідженні класифікатор максимальної правдоподоби був проведений на оптичних смугах зображень Landsat для побудови карт землекористування / земельного покриття з трьома категоріями класів землекористування (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

№		Класи	Включення
1	Забудова	Житлова	території малоповерхової, середньо та багатоповерхової житлової забудови на території
		Промислова, Комерційна	території індустріальних парків, промислових кластерів, території переробної промисловості; території для торгівлі та обслуговування
2	Озелененні території	Активне сільське господарство	території для вирощування багаторічних дерев
		Неактивне сільське господарство (Занадто волога або суха земля)	території рисових полів, території для вирощування багаторічних дерев
		Лісове господарство	Захисні ліси, виробничі ліси
		Відмілини	Прибережна земля
		Голий ґрунт	Невикористовувана земля
3	Водні поверхні	Водні поверхні	Земля з ріками, струмками, каналами, водними джерелами

NDVI – один з найбільш широко використовуваних індексів рослинності (*Vani V.; Mandla V., 2017*). Цей індекс є мірою різниці у відбивній здатності між червоною смугою (RED) і смугою ближнього інфрачервоного діапазону (NIR) зображень. NDVI змінюється в діапазоні від -1,0 до +1,0, де позитивні значення вказують на ділянки з рослинністю, а від’ємні значення – на ділянки без рослинності (*Zhang Y.; Odeh I.O.; Han C., 2009*).

NDVI розраховується наступним чином (2.3):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.3)$$

де RED – коефіцієнт відбиття в червоній спектральній зоні, відповідає смузі 3 Landsat TM (0,63–0,69 мкм) і смузі 4 Landsat OLI (0,64–0,67 мкм);

NIR – коефіцієнт відбиття в ближній інфрачервоній зоні, відповідає смузі 4 Landsat TM (0,76–0,90 мкм) і смузі 5 Landsat OLI (0,85–0,88 мкм).

NDBI – ефективний метод картування міських забудованих територій з загальною точністю 92% (He C.; Shi P.; Xie D.; Zhao Y., 2010).

NDBI розраховується на основі різниці зображень між *NIR* та *MIR* (середній інфрачервоний діапазон). Цей індекс отримується з рівняння (Zha Y.; Gao J.; Ni, S., 2003):

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (2.4)$$

де *MIR* – відповідає смузі 5 Landsat TM (1,55–1,75 мкм) і смузі 6 Landsat OLI (1,57–1,65 мкм).

Для одержання температури поверхні землі по даних Landsat існує багато алгоритмів (Guha S.; Govil H.; Dey A.; Gill N., 2018). Алгоритм, представлений в даній роботі, використовується для одержання температури поверхні землі по даних знімків Landsat на основі вхідних сигналів RED, *NIR* та TIR (тепловий інфрачервоний діапазон). По-перше, рослинність $P(v)$ розраховується із значень *NDVI* за формулою [Quintano C.; Fernández-Manso A.; Calvo L.; Marcos E.; Valbuena L., 2015):

$$p(v) = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} + NDVI} \right)^2 \quad (2.5)$$

де $NDVI_{min}$ (мінімальний *NDVI*) і $NDVI_{max}$ (максимальний *NDVI*) позначають динамічний діапазон значення *NDVI*.

Для одержання даних по температурі поверхні землі потрібен коефіцієнт випромінювання поверхні землі, який знаходиться з рівняння (Sobrino J.A.; Jimenez-Munoz J.C.; Paolini L., 2004):

$$\varepsilon = mP(v) + n \quad (2.6)$$

$$m = (\varepsilon_v - \varepsilon_s) - (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v; \quad n = \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v$$

де ε_s і ε_v – коефіцієнт випромінювання ґрунту і коефіцієнт випромінювання рослинності, відповідно;

m – значення випромінювальної здатності ґрунту;

n – значення випромінювальної здатності рослинності.

Значення $m=0,004$ і $n=0,986$ (*Sobrino J.A.; Jimenez-Munoz J.C.; Paolini L., 2004*).

Після перетворення цифрових числових значень у спектральну яскравість на датчику L_λ , температура поверхні землі (LST) може бути отримана за допомогою коефіцієнта випромінювання поверхні землі (ε) з рівняння (2.6) при використанні формули (2.7):

$$LST = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\varepsilon \cdot K1}{L_\lambda}\right)+1} - 273,15 \quad (2.7)$$

де LST – температура поверхні землі в градусах Цельсія (°C);

$K1$ і $K2$ – термічні константи TIR, які можна ідентифікувати у файлі метаданих, пов'язаному із супутниковим зображенням (*Tan K.C.; San Lim H.; MatJafri M.Z.; Abdullah K., 2010*);

L_λ – спектральна величина випромінювання;

ε – коефіцієнт випромінювання, розрахований по формулі (2.6).

Щоб представити результати в градусах Цельсія, необхідно скорегувати дані, додавши абсолютний нуль, який дорівнює -273.15 . Відповідно, були проаналізовані взаємозв'язки між типами земного покриву і температурою земної поверхні.

Оскільки не в усіх містах є чітко виражені MOT, а їх розподіл і розвиток 'залежить від багатьох чинників, то необхідно вказати просторовий розподіл і тенденції розвитку MOT.

Інтенсивність MOT визначається як різниця між температурою поверхні землі в MOT міста і сільської місцевості з використанням формул (*Guha S.; Govil H.; Mukherjee S., 2017*):

$$LST > \mu + 0,5 \cdot \delta \quad (2.8)$$

– відноситься до зони MOT

$$0 < LST \leq \mu + 0,5 \cdot \delta \quad (2.9)$$

– позначається як не MOT,

де μ і δ – середнє і стандартне відхилення температури поверхні землі в досліджуваній області, відповідно.

Однак, на розподіл зон MOT, засноване на цьому методі, можуть впливати багато чинників. Тому для підвищення точності визначення зони MOT використовується комбінований метод з використанням карти земельного покриття і карти температури поверхні землі. В даному дослідженні область теплового острова визначається, як така, що містить такі елементи $LST > \mu + 0,5 \cdot \delta$ і тип земельного покриття – житловий і промисловий, що відноситься до міської зони MOT.

В урбанізованих районах ефект MOT є важливим чинником, здатним вплинути на навколишнє середовище і здоров'я міського населення. Для оцінки впливу MOT на якість міського життя існує ряд індексів теплового комфорту. В даному дослідженні був обраний індекс дисперсії теплового поля в містах (UTFVI), який оцінюється рівнянням (Zhang Y.; Yu T.; Gu X.; Zhang Y.; Chen L., 2006):

$$UTFVI = \frac{T_s - T_m}{T_s} \quad (2.10)$$

де T_s – температура поверхні землі, а T_m – середня температура поверхні землі в досліджуваній області.

Значення індексу дисперсії міського теплового поля були розділені на шість категорій, кожна з яких мала відповідні інтерпретовані екологічні оцінки (Исаков С.В., Шкляев В.А., 2014).

У табл. 2.4 представлені порогові значення в шести категоріях індексу дисперсії теплового поля в містах.

Таблиця 2.4

Порогові значення рівнів індексу дисперсії міського теплового поля (UTFVI), що використанні в дослідженні

UTFVI	Міський острів тепла	Індекс екологічної оцінки
< 0,000	не має	Відмінно

0,000 – 0,005	слабкий	добре
0,005 – 0,010	середній	задовільно
0,010 – 0,015	сильний	погано
0,015 – 0,020	більш сильний	гірше
> 0,020	найсильніший	найгірший

2.3. Метод визначення ефективності охолодження повітряного середовища за допомогою зелених насаджень

Стале міське планування не тільки сприяє гарній якості життя, але й забезпечує сталий розвиток міст в умовах зростаючої урбанізації. Розвиток і зростання міст, збільшення чисельності міського населення призводить до підвищення температури повітря в місті і до формування ефекту МОТ. У цьому контексті, для мінімізації негативного впливу МОТ на людину і навколишнє середовище необхідно збільшити площу міського озеленення. Ця міра призведе до пом'якшенню впливу МОТ і охолодженню повітря, а також до створення комфортної для людини температури повітря (Yu, Z., Guo, X., Jorgensen, G., Vejre, H., 2017).

Деякі дослідники доводять, що охолоджуючий ефект від зелених насаджень зменшується з віддаленням від території озеленення і зникає на певній відстані (Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010). Охолоджуючий ефект від масиву зелених насаджень визначається як різниця температур на поверхні землі між границею території на певній відстані від озелененого простору і навколишньою міською територією.

Ефективність охолодження визначається як крива між областю (змінною) і максимальною інтенсивністю охолодження кожної озелененої зони (рис. 2.1), де $\Delta t_{пз}$ – різниця температури поверхні землі, (°C); МОП – міський острів прохолоди; СТПЗ – середня температура поверхні землі; ТПЗ – температура поверхні землі, (°C); МОПП – міський острів протяжності прохолоди; ПЗЕ – порогове значення ефективності.

Якщо розмір озелененої зони збільшується з П1 до П2, зміна температури поверхні ґрунту (T_2-T_1) буде значною. Однак, якщо розмір зелених насаджень збільшується з П3 до П4, температура поверхні підвищується несуттєво (T_4-T_3), хоча зміна площі залишається такою ж. У певний момент значення охолоджуючого ефекту стає стабільним у заданому діапазоні.

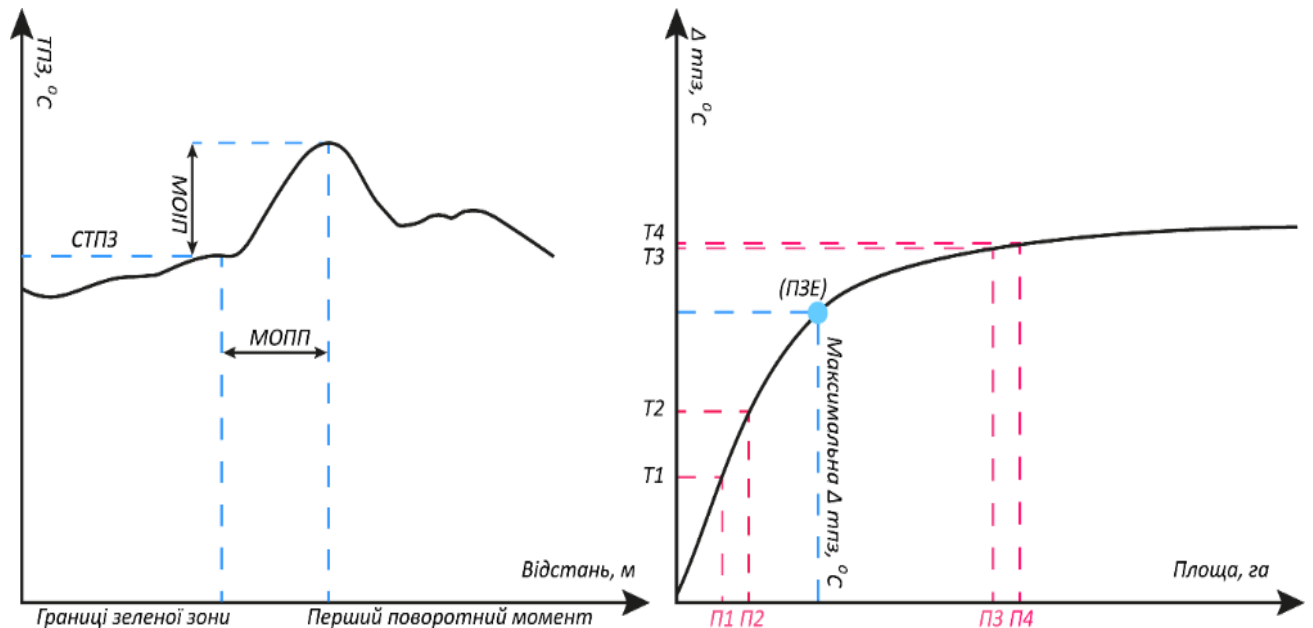


Рис. 2.1. Крива охолоджуючого ефекту від озелененого простору (Zhaowu Yu, Xieying Guo, Yuxi Zeng, Motoya Koga, Henrik Vejre, 2018)

Тому для раціонального озеленення територій, яке максимально ефективно сприяє охолодженню повітря в теплий період року, доцільно при визначенні площі озеленення міської території враховувати показник порогового значення ефективності (ПЗЕ).

2.4. Методи визначення температури дорожнього покриття

Однією з причин формування МОТ є підвищення температури штучних поверхонь у містах. Як правило, більша частина міських поверхонь представлена асфальтобетонними дорожніми покриттями, температура яких значно підвищується в теплу пору року, що призводить до появи ефекту МОТ.

Внаслідок цього, необхідно дослідити властивості покриттів в місті в контексті їх зв'язку з ефектом МОТ.

Немаловажним фактором є якість і строк служба автомобільної дорожньої мережі – важливої складової частини транспортної системи, що сприяє розвитку всіх сфер виробництва країни і яка здійснює вплив на її економічну стійкість. Механізм покращення технічного стану дорожньої мережі є актуальною проблемою для багатьох міст України, яка може бути вирішена за рахунок збільшення термінів служби автомобільних доріг. На міцність і довговічність дорожніх покриттів впливають багато факторів, у тому числі і кліматичні умови.

Відомо, що асфальтобетонне покриття є термопластичним матеріалом (Подольский В.П., Нгуен В.Л., Ле В.Ч., 2013), тому одним із кліматичних факторів, який спричинює деформацію даного матеріалу в конструкції дорожнього покриття, є температура. Напружено-деформований стан покриття багато в чому визначає строк служби асфальтобетонних покриттів.

Потрібно відзначити, що більшість існуючих досліджень зосереджено на дослідженні таких властивостей дорожніх покриттів, як показник альбеда, щільність, проникність і здатність покриття утримувати вологу у верхньому шарі. Це обумовлено впливом даних властивостей дорожніх покриттів на температуру їх поверхні.

Дорожні покриття поділяються на гнучкі та жорсткі, які відрізняються один від одного кількістю шарів та їх властивостями. Як правило, гнучке дорожнє покриття являє собою термопластичний матеріал з поверхнею, що зношується (наприклад, асфальт), укладений на основу, розташовану на підстильній поверхні. На відміну від гнучкого, жорстке дорожнє покриття має бетонний шар в основі, що розташовується на підстильній поверхні. Верхній шар жорсткого дорожнього покриття може бути представлений шаром бетону або тонким шаром асфальту.

Гнучкі покриття деформуються під навантаженням, оскільки в шарах покриття утворюються горизонтальні деформації розтягування або стиснення. Жорсткі покриття мають високу міцність на вигин, а діюче навантаження розподіляється по великій площі покриття. Отже, жорсткі покриття не передають навантаження на шарах. Таким чином, вибір структури дорожнього полотна залежить від поставлених задач.

Як свідчить багато досліджень, дорожнє покриття істотно впливає на ефект МОТ, що пов'язано з великою площею міських територій, займаних дорожньою мережею, і відносно низьким показником альbedo темної поверхні дорожнього полотна (*Synnefa A., Karlessi T., Gaitani, N., Santamouris M., Assimakopoulos D.N., Papakatsikas C., 2011*). Дорожні покриття, як правило, складають близько 40% від площі міст. В результаті аналізу мезомасштабних супутникових зображень у тепловому інфрачервоному діапазоні дослідниками було встановлено, що дороги є практично основним джерелом теплового випромінювання (*Gorsevski V., Taha H., Quattrochi D., Luvall J., 1998*).

Важливо відзначити, що сонячна радіація складається з 43% видимого випромінювання, 52% інфрачервоного і 5% ультрафіолетового випромінювання (*Зацерковний В.І., 2018*). В той же час, показник альbedo для асфальтобетонного покриття становить 5%, тобто, даним покриттям поглинається приблизно 95% сонячного випромінювання. Внаслідок цього, актуальною задачею є розгляд відповідних заходів для покращення теплових характеристик дорожніх полотен у крупних містах.

Існує кілька методів розрахунку температури поверхні асфальтобетонних покриттів. Порівняємо 2 найбільш відомих: метод Ковальова Ю.М. (Росія) та метод «Supergave» (США).

За методом Ковальова Ю.М. (*Kovalev Y.N., 1966*) мінімальна температура асфальтобетонного покриття визначається за формулою:

$$T_{\Pi}^{min} = 0.7T_{min} , \quad (2.11)$$

де T_{Π}^{min} – розрахункова мінімальна температура поверхні покриття асфальтобетону, °С;

T_{min} – мінімальна зовнішня температура, °С.

Формула для визначення максимальної температури:

$$T_{\Pi} + T_B + T_{EKB},$$

(2.12)

де T_{Π} – максимальна розрахункова температура поверхні покриття асфальтобетону, °С;

T_B – температура повітря, °С;

T_{EKB} – еквівалентна температура $T_{EKB} = A = (1 - A) \frac{I}{a_n}$, °С;

A – альbedo поверхневого покриття, яке характеризується його відбивною здатністю, для асфальтобетону $A = 10\%$;

I – інтенсивність сонячного випромінювання, для клімату Києва в середньому становить $I = 3,1 \text{ Вт/м}^2$;

a_n – коефіцієнт теплопровідності, для асфальтобетону $a_n = 1.05 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$.

За методом «Superpave» (*Asphalt Institute Superpave, 1997*) мінімальна температура асфальтобетонного покриття визначається за формулою:

$$T_{\Pi}^{min} = 0.859T_{min} + 1,7, \quad (2.13)$$

де T_{Π}^{min} – мінімальна розрахункова температура поверхні покриття асфальтобетону, °С;

T_{min} – мінімальна температура повітря в середньому за рік, що встановлена за метеорологічними даними, °С.

A максимальна температура такого покриття дорівнює:

$$T_2^{max} = 09545(T_{B7} - 0,00618 \text{ Ш} + 0,2289\text{Ш} + 42,2) - 17,18, \quad (2.14)$$

де T_2^{max} – максимальна розрахункова температура покриття на глибині 2 см, °С;

T_{B7} – максимальна температура повітря в середньому за тиждень, °С;

Ш – широта об'єкта в градусах, для Києва складає $50^{\circ}27'16''$ пн.ш.

РОЗДІЛ 3

АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ МІСЬКОГО ОСТРОВУ ТЕПЛА

3.1. Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі обрано територію м. Києва у межах 50.6^о пн. ш., 30.2^о сх. д. у лівому верхньому куті та 50.2^о пн. ш., 30.9^о сх. д. у нижньому правому куті.

Місто Київ розташовано в центрі східної Європи на обох берегах р. Дніпро, у його середній течії, нижче впадіння лівої притоки – р. Десна. Площа міста 836 км². Довжина вздовж берега – понад 20 км. Географічні координати: північна широта – 50° 26'; східна довгота – 30° 34'; середня висота над рівнем моря – 105 (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Своєрідність і різноманітність природних умов Києва пов'язані з його розташуванням на межі фізико-географічних зон: лісостепової та мішаних лісів. Північна частина міста розташована на Поліській низовині, південно-західна (правобережна) – на Придніпровській височині, південно-східна (лівобережна) – на Придніпровській низовині (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Поверхня правобережної частини міста – підвищена платоподібна рівнина, розчленована ярами та балками, долинами невеликих річок, лівобережної – низовинна рівнина. Характерні форми рельєфу правобережжя – гори-останці, зокрема, Печерська (її висота найбільша – 196 м над рівнем моря), Старокиївська (188 м), Батієва (176 м), Хоревиця (174 м), Багринова (170 м), Щекавиця, Замкова, Звіринецька, Чорна, Черепанова, Лиса (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Найвідоміші яри: Бабин, Хрещатий, Смородинський, Кмитів, Протасів, Цимбалів та інші. Найнижчі ділянки міста відповідають рівню води в Дніпрі – близько 92 м над рівнем моря (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

У геологічному відношенні Київ з прилеглими до нього територіями розташований у зоні стику двох регіональних структур північно-східного схилу Українського кристалічного щита та південно-західного борту Дніпровсько-Донецької западини. Межею між ними слугує Дніпровська зона розломів північно-західного простягання. Завдяки цьому Київ знаходиться у досить спокійній тектонічній зоні (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Ґрунтовий покрив Києва є вельми строкатим, зважаючи на різноманітність природних умов. Північним околицям міста, що тяжіють до Полісся, властиві дерново-підзолисті ґрунти, сформовані переважно під хвойними лісами. На правобережній високій частині міста панують звичні для більшої частини України ґрунти – чорноземи. Утворились вони переважно на дуже своєрідних пухких, добре провітрюваних і відносно сухих суглинках – лесах. У природних київських лісопарках поширені темно – сірі лісові ґрунти, що утворились під пологом широколистяних лісів. Місто Київ є багатим на воду: існують значні запаси підземної води; окрім цього, великою є кількість поверхневих водних об'єктів: річок, озер, ставків. Загалом водні об'єкти на території міста займають 6,7 тис. га, або 8,0 % території (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Гідрографічна мережа району представлена р. Дніпро, річками його басейну (Десна, Либідь, Сирець, Нивка, Горенка, Віта, стр. Пляховий), озерами, болотами, штучними ставками і каналами. Річка Дніпро і його долина мають вирішальний вплив на природні умови Києва і дислокацію елементів його житлово-промислової агломерації (*Екологічний паспорт м. Київ 2018...*).

Характерним режиму всіх річок є чітко виражена весняна повінь, низька літня межень, дещо підвищені рівні восени через сезонні дощі. Живлення річок змішане з переважаючим живленням ґрунтовими водами.

Київ характеризується досить комфортним, помірно континентальним кліматом з теплим літом і м'якою зимою, оптимальною є зволоженість. Відчутний вплив на клімат Києва здійснює Дніпро, що в межах міста витягнутий

в субмеридіональному напрямку. Велика рухома водна площа сприяє формуванню бризового повітря: вдень різниця температур між водною та суходолом створює потоки свіжого вологого повітря до міста. Протягом року переважає антициклонічна діяльність, якій властива доволі стійка, малохмарна погода (*Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва...*).

Середньорічна температура повітря $+8,9 - +11,90$ °C. Глобальні зміни клімату, що спостерігаються на земній кулі, не могли обминути і Київ. Більше того, на кліматичні умови істотно впливає саме місто – розсіювання тепла з теплотрас, будинків, ТЕЦ тощо. У зв'язку з цим температура повітря у місті вища, ніж на його околицях. Підвищення температури повітря у Києві за останні десятиріччя є більшим, ніж глобальне на планеті. Середньорічна кількість опадів становить 600-700 мм. Переважаючий напрямок вітру влітку – західний, взимку – північно-західний.

Загальна площа м. Києва становить $835,6$ км². Забудовані землі міста – $364,0$ км² або 43,5%, із них під житловою та громадською забудовою знаходиться $115,0$ км². Значна кількість земель зайнята промисловими об'єктами – $56,0$ км², об'єктами транспорту та зв'язку – $22,0$ км² (*Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва...*).

По функціональному використанню територія м. Києва розділяється на – селітебну (міська і сільська забудова), промислову та рекреаційну (лісові масиви, парки, сквери, зелені насадження загального користування, об'єкти природоохоронного фонду, водоймища) зони.

Кожна із функціональних зон характеризується своїми особливостями, призначенням і впливом на НПС.

Селітебна зона характеризується висотною забудовою в центральній правобережній частині міста, на нових масивах – Оболонь, Виноградар, Теремки та ін., на Лівобережжі – масиви Троещина, Харківський, а також приватною забудовою, яка розташована переважно на околиці міста по його

периметру. Негативний вплив цієї зони на навколишнє природне середовище можна оцінити як середній (*Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища м. Києва...*).

Промислова зона складається з промислових та автотранспортних підприємств. В межах Київської міської агломерації вони згруповані в промислові вузли і зони: Подільсько-Оболонський, Шулявка, Нижньолибідський, Дарницький, Тельбінський. Негативний вплив цієї зони на навколишнє природне середовище оцінюється як сильний.

Рекреаційна зона представлена умовно природними ландшафтами (ліси, луки, озера, річки), які збереглися в межах міста і його околиць, а також штучними зеленими насадженнями (парками, лісозахисними смугами тощо). Зона позитивно впливає на стан НПС і є показником екологічного благополуччя. Лише у межах забудованої частини міста площа паркових насаджень досягає 183,0 км², а навколишнє зелене кільце з лісовими масивами Голосієва, Пущі – Водиці та Дарниці становить біля 339,0 км².

Для виявлення взаємозалежностей показників МОТ та кореляційного аналізу в розділі 3 межами обробки стали сучасні адміністративні кордони м. Київ (рис. 3.1) з метою виключення великих сільськогосподарських угідь за межами міста.



Рис. 3.1. Адміністративно-територіальний поділ м. Києва

Київ є одним з провідних промислових, технологічних та інноваційних центрів України. Саме тому темп урбанізації тут досить високий, незважаючи на загальний від'ємний приріст населення в Україні. Станом на 01.08.2022, в місті проживає понад 4 мільйони мешканців (за даними Головного управління статистики в Києві, постійне населення міста становить 2,9 мільйона осіб, 1 мільйон незареєстрованих жителів і ще близько 200 тисяч внутрішньо переміщених осіб). Найбільше мешканців у Солом'янському, Деснянському, Дніпровському районах. Найменше – у Печерському, Подільському та Шевченківському.

3.2. Отримання та попередня обробка знімків Landsat

Теплове інфрачервоне ДЗЗ широко використовується для виявлення змін температури земної поверхні (ТЗП) завдяки широкому охопленню, повторному циклу орбіти та низькій вартості. Проте на таких зображеннях зазвичай присутні хмари, аерозолі, систематичні помилки та пропущені значення. Щоб уникнути похибки у даних, в роботі було вирішено вибрати набір супутникових зображень з нульовим (або близьким) рівнем хмарності в межах території дослідження. Були обрані літні місяці з липня по серпень, оскільки підвищення температури повітря у даний період є критичним для здоров'я мешканців та найяскравіше відображає феномен МОТ. Також у літні місяці можна отримати безхмарні зображення. У табл. 3.1 надані вибрані дати та серії супутників Landsat. Всього сім зображень отримано з веб сайту USGS Earth Explorer згідно з Всесвітньою системою відліку (WRS2 path 181, row 025) в універсальній поперечній проекції Меркатора (UTM).

Попередня обробка необхідна для підготовки отриманих супутникових зображень для подальшого аналізу. На необроблених супутникових

зображеннях кожен піксель містить число, що відповідає отриманому необробленому значенню датчика.

Таблиця 3.1

Обрані супутникові знімки та їхні метадані

Супутник	Сенсор	Розрізнен- ність, м	Хмарність, %	Дата отримання	Час одержання, GMT
Landsat 8	OLI та TIRS	30 (120 для TIRS)	2.88	2016-07-29	08:49:27.8798 750
Landsat 5	TM	30 (100 для TIRS)	0 0 0 0 0 2	2009-08-11 2005-07-31 2001-08-05 1995-08-21 1990-08-07 1985-08-25	08:38:39.4884 400 08:37:07.4630 940 08:29:44.6183 800 07:52:33.2078 800 08:09:24.4698 800 08:18:57.3625 600

Для отримання кількісної інформації у подальшому з зображень дане цифрове значення має бути перетворено у фізичні величини, такі як енергетична яскравість та температура яскравості. Отримані продукти Landsat Collection Level-1 з платформи Earth Explorer USGS вже геометрично та радіометрично калібровані. Зображення можуть далі бути перетворені в значення енергетичної яскравості верхньої частини атмосфери згідно з формулою (3.1) для Landsat 5 та формулою (3.2) для Landsat 8. Значення коефіцієнту відбиття для Landsat 5 отримується за формулою (3.3); для Landsat 8 за формулою (3.4) (*Landsat 7 Science Data Users Handbo, Landsat 8 (L8) data users handbook*):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX_{\lambda}} - L_{MIN_{\lambda}}}{Q_{cal_{MAX}}} \right) Q_{cal} + L_{MIN_{\lambda}} \quad (3.1)$$

$$L_{\lambda} = M_{\lambda} Q_{cal} + A_{\lambda}, \quad (3.2)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d_s^2}{E_{0\lambda} \cos\theta}, \quad (3.3)$$

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho}, \quad (3.4)$$

де Q_{cal} – відкаліброване значення пікселя;

$L_{MIN\lambda}$ – енергетична яскравість, що відповідає Q_{calMIN} ;

$L_{MAX\lambda}$ – енергетична яскравість, що відповідає Q_{calMAX} ;

d_s – відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях;

$E_{0\lambda}$ – екзо-атмосферне сонячне випромінювання в каналі λ (у $Вт/(м^2 \cdot мм)$);

θ – зенітний кут Сонця;

M_{λ} , M_{ρ} , A_{λ} , A_{ρ} – каналні фактори мультиплікативного та адитивного (відповідно) перемасштабування з метаданих.

3.3. Розрахунок температури земної поверхні

Наступним кроком є перетворення спектральної енергетичної яскравості у температуру яскравості на супутнику (або температуру чорного тіла, T_B) за наступною формулою:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}, \quad (3.5)$$

де T_B є ефективною температурою на супутнику (К);

L_{λ} – спектральна енергетична яскравість ($Вт/(м^2 \cdot ср \cdot мкм)$);

K_2 та K_1 – калібрувальні константи (Oke T. R., 1997).

Проте значення температури яскравості не є ТЗП, а скоріше змішаним сигналом, що включає енергію випромінювання Землі, висхідну та низхідну енергетичну яскравість [59]. Випромінювальна здатність земної поверхні є одним з основних параметрів для отримання ТЗП. У даній роботі буде

використовуватись метод оцінки ВЗ, представлений Artis та Carnahan у праці [15]. Загальна формула обчислення ТЗП:

$$T = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \times \frac{T_B}{\rho} \right) \ln \varepsilon}, \quad (3.6)$$

де λ – довжина хвилі енергетичної яскравості;

$\rho = h \cdot c / \sigma$ (1.438×10^{-2} м·К);

σ – константа Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К);

h – константа Планка (6.626×10^{-34} Дж·с);

c – швидкість світла (2.998×10^8 м/с).

Для каналів Landsat 5 $\lambda = 11.5$ мкм; для Landsat 8 одинадцятого каналу $\lambda = 12$ мкм. Можна отримати значення ТЗП у градусах Цельсія, відіймаючи 273.15.

Для оцінки значення ВЗ в даній роботі було вирішено використати метод граничних значень нормованого індексу відмінностей рослинного покриву (NDVI).

Перекласифікація значень NDVI у ВЗ наведена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Оцінка випромінювальної здатності за NDVI	
NDVI	Відбивна здатність земної поверхні (ε)
NDVI < -0.185	0.995
$-0.185 \leq \text{NDVI} < 0.157$	0.970
$0.157 \leq \text{NDVI} \leq 0.727$	$1.0094 + 0.047 \ln(\text{NDVI})$
NDVI > 0.727	0.990

3.4. Класифікація зображень земного покриву

Методом класифікації для цього дослідження став метод опорних векторів (SVM). Він був розроблений у 1970-х роках, але почав застосовуватись в галузі дистанційного зондування тільки нещодавно (Zheng B., 2015).

Як показано у табл. 3.3, SVM – це непараметрична контрольована методика статистичного навчання.

Рис. 3.3 ілюструє простий лінійний варіант роботи SVM для класифікації набору даних за двома класами у двовимірному вхідному просторі.

Таблиця 3.3

Опис типів земельного покриття	
Клас покриття	Опис
Ліси	Густо посаджені дерева, змішані ліси
Розріджена рослинність	Парки, трава, пасовища, водно-болотні угіддя
Водні об'єкти	Річки, озера, ставки, болота
Забудова	Вся інфраструктура: житлові, комерційні, промислові райони, села, дороги, тротуари та техногенні споруди.

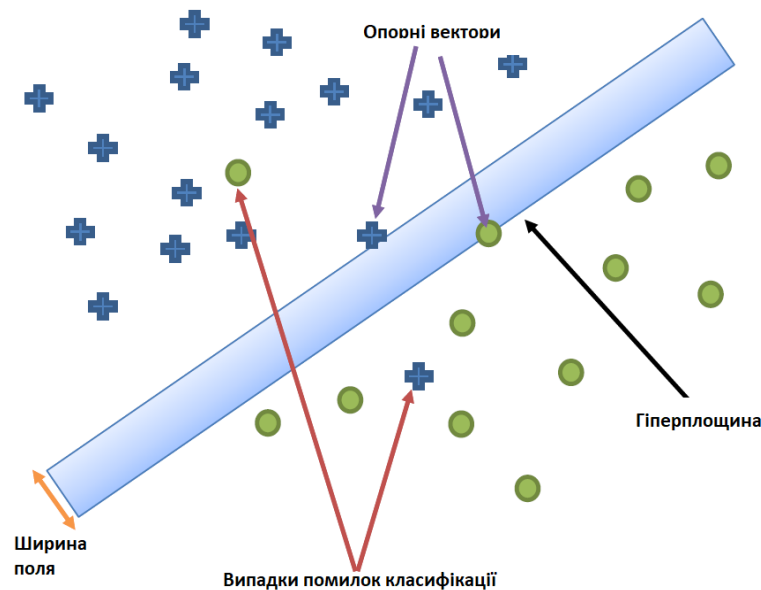


Рис. 3.3. Класифікація двох наборів даних за двома класами, використовуючи просту лінійну SVM

Процес базується на класифікації наборів даних, використовуючи оптимальну гіперплощину, за допомогою навчання. SVM бере навчальну вибірку (опорні вектори), щоб знайти оптимальну гіперплощину, яка мінімізує неправильну класифікацію між попередньо визначеними класами. Оптимальна гіперплощина отримується через ітераційний процес (процес навчання). SVM використовує лише опорні вектори для визначення ширини гіперплощини.

Отже, висока точність класифікації може бути досягнута й з обмеженою кількістю вхідних даних у вибірці (*Mountrakis G., Im J., Ogole C., 2001*).

Першим кроком до класифікації зображень є розробка схеми класифікації. Були вибрані чотири основні класи земельного покриття, що описані в табл. 3.3.

Для кожного класу було обрано початкову вибірку на території дослідження за допомогою зображень Google Earth. Вхідні параметри функція SVM: толерантність до помилок (ξ або C), глибина піраміди (P), радіальні базисна ядерна функція (γ) та порогові значення. Типом ядра для дослідження було обрано Radial Basis Function (RBF), яке здатне обробляти нелінійні зв'язки між класами та їхніми спостережуваними значеннями; воно найчастіше використовується науковцями (*Oke T. R., Maxwell G. B., 1975*).

Найефективнішими параметрами для цього типу ядра є $C = 100$, $P = 2$, $\gamma = 0.1$, порогове значення = 0.05. Обрані параметри SVM покращили здатність алгоритму класифікувати великі та неперервні класи земного покриття, кордони за допомогою невеликої правильно обраної навчальної вибірки. В цілому, дана параметризація дає точність класифікації від 86 до 98% для знімків у різні часові періоди (*Martins S., 2016*).

З метою докладного дослідження островів тепла для обраного часового періоду було вирішено проаналізувати можливі зв'язки між ТЗП, NDVI та КЗП.

Для візуального та описового порівняння були обрані усі сім знімків за 31-річний період в межах полігону досліджуваної області.:1986, 2005 та 2016 рр. були вибрані для статистичного аналізу. Дані зображення було обрізано до адміністративних кордонів Києва. Далі значення NDVI та ТЗП було винесено на графік співвідношення для кожного року, а також згідно з чотирма КЗП. З метою подальшого вивчення зв'язку були надані функції кореляції та коефіцієнт детермінації.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Створення алгоритму і коду для одержання значень інтенсивності МОТ

Загальний алгоритм і код отримання значень інтенсивності МОТ, відбивної здатності земної поверхні та NDVI з супутникових знімків Landsat наведений у додатку А. Для цього були завантажені та попередньо оброблені знімки для обраних дат та району дослідження, атмосферно скориговані зображення в програмі QGIS, обрізані за вибраною областю дослідження, розраховані індекси NDVI з червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів, розраховані значення ВЗ, ТЗП та інтенсивності МТО, виявленні зміни цих значень в часі та просторі.

Представлений код на мові програмування Python, що реалізує перераховані вище етапи. Попередня обробка зображень відбувалась за допомогою бібліотеки Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) та відповідно для двох серій супутників Landsat. Далі програма була викликана через інтегроване середовище розробки PyCharm.

Додаток Б є скриптом для ПЗ ГІС ArcGIS, в якій було зроблено більшість аналізу та візуалізації даних. Скрипт базується на бібліотеці Arcsru та може бути викликаним як з інтегрованого середовища розробки, так й з ArcGIS. Імплементация даного коду для аналізу МОТ? як набору інструментів в ArcGIS представлена на рис. 4.1.

Вхідні параметри програми з попередньої обробки супутникових зображень Landsat:

– *folder_path* – шлях до директорії із завантаженими знімками Landsat 5 або 8 однієї дати.

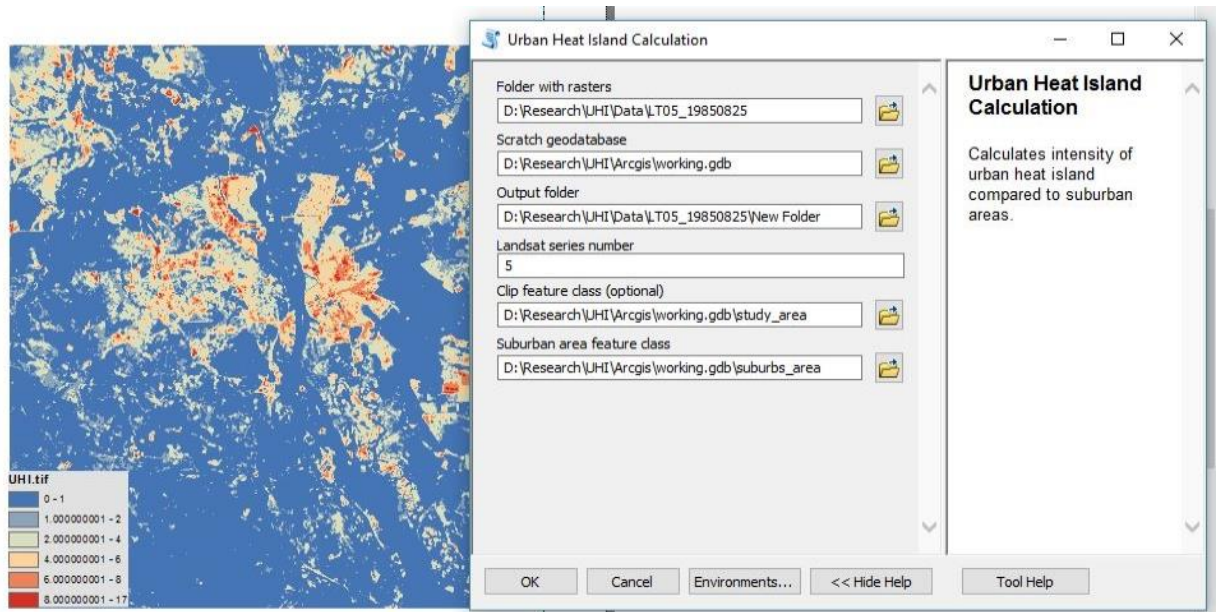


Рис. 4.1. Імплементція скрипту в ГІС ArcGIS

Вхідні параметри програми отримання растрів температури земної поверхні:

- *input_folder* – шлях до директорії із попередньо обробленими знімками однієї дати;
- *workspace* – шлях до бази геоданих ArcGIS, що буде використовуватись за замовчуванням для інструментів геообробки та виводу інформації;
- *output_folder* – шлях до директорії, де будуть збережені вихідні растри;
- *series_num* – номер серії супутників Landsat (5 або 8), що використовується для обрання алгоритму отримання температури земної поверхні;
- *clip_feature* – векторний файл полігону території дослідження, який задається для обрізання знімків.

Результатом роботи даного інструменту геообробки є обрізані супутникові зображення Landsat, растри NDVI та температури земної поверхні для заданої серії знімків. Інструмент працює доволі швидко (~40 с. на комп'ютері з Windows 64 bit, Intel Core i7, 4 GB RAM).

У додатку В надана реалізація класифікації земного покриття за допомогою бібліотек GDAL та Scikit Learn мови програмування Python. Оскільки обраний тип ядра, Radial Basis Function, є нелінійним, його складність оцінюється в $O(\text{розмір_вибірки}^2 * \text{розмір_даних})$ (Chapelle O., 2007).

Це значно сповільнює час класифікації необхідних знімків Landsat, проте дає точніші результати класифікації. Вхідні параметри програми:

- *image_path* – шлях до директорії із попередньо обробленими знімками однієї дати;
- *roi_path* – векторний файл полігонів Region of Interest, які представляють класифіковані вчителем зразки КЗП;
- *output_path* – шлях до директорії, де буде збережений вихідний класифікований растр LC.tif.

4.2. Динаміка змін температур земної поверхні м. Києва

Випромінювальна здатність (ϵ) пов'язана з рослинним покривом та біомасою. Результати визначення ВЗ земної поверхні на вибраній ділянці показали, що райони з середнім покриттям рослинністю зазвичай мають $\epsilon > 0.92$. В районах з густішим рослинним покривом, як правило, $\epsilon > 0.95$. Пустирі, забудовані зони характеризуються ϵ в діапазоні 0.90-0.91. Випромінювальна здатність водойм, річок та озер коливається в межах 0.91-0.92, що залежить від рослинного покриття.

На рис. 4.2 відображені різниці значень ТЗП у 2016 та 1985 рр., що були отримані відіманням значень двох растрів. Як можна побачити, за 31 рік температури підвищились. Це можна пов'язати, по-перше, з урбанізацією. Особливо великі різниці температур за цей період спостерігаються на Позняках та півночі Троєщини, що були лише приміськими зонами у 1985 р. По-друге, на дані також впливає загальна зміни клімату та підвищення температур.

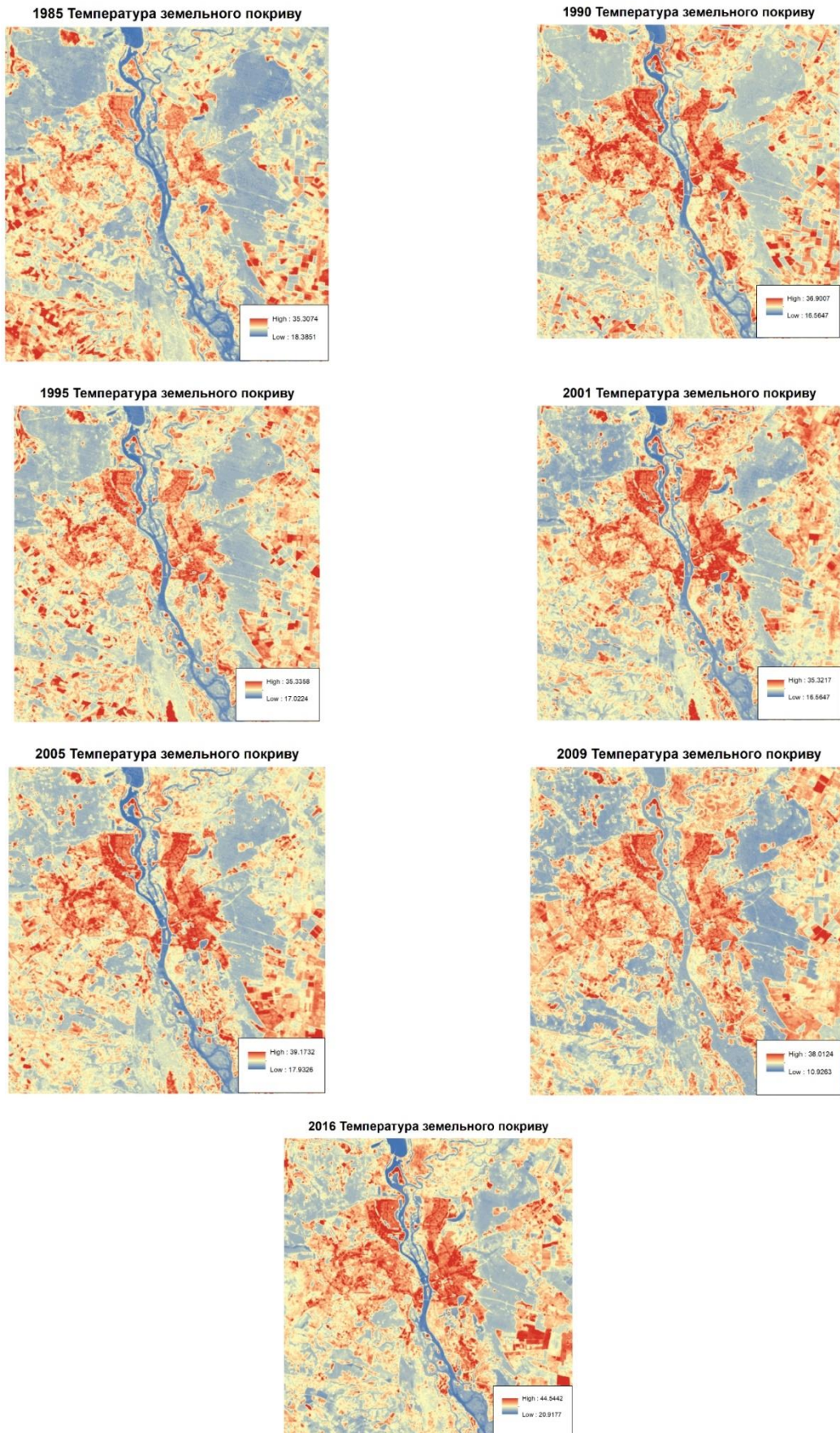


Рис. 4.2. Динаміка ТЗП у період 1985-2016 рр.

Проте останній фактор не можна назвати вирішальним, оскільки зміна температур в багато разів перевищує зміну фонових температур в області.

Результати просторово-часового розподілу ТЗП свідчать, що вищі температури характерні для спальних та індустріальних районів міста, а саме Оболоні, Солом'янського, Дніпровського та півночі Дарницького районів. Тут температури влітку досягали в середньому 30 °С у 1980-1990х рр., а в 2016 році – до 40 °С. Ще вищі температури характерні для району м. Нивки–м. Шулявка, де знаходяться декілька заводів. Найвищі значення ТЗП пов'язані не тільки з міськими центрами, житловими комплексами з високою щільністю населення та промисловими районами, а також з посівами та пустирями. За рахунок обрізання знімків дещо зменшилися їхні території на зображеннях в аналізі. Правильні форми посівів можна побачити на пн-сх. на пд-зх. Києва, а пустирі без рослинності на пд-сх. міста по правому березі р. Дніпро.

За 31 рік істотно збільшився рівень урбанізації (рис. 4.3).

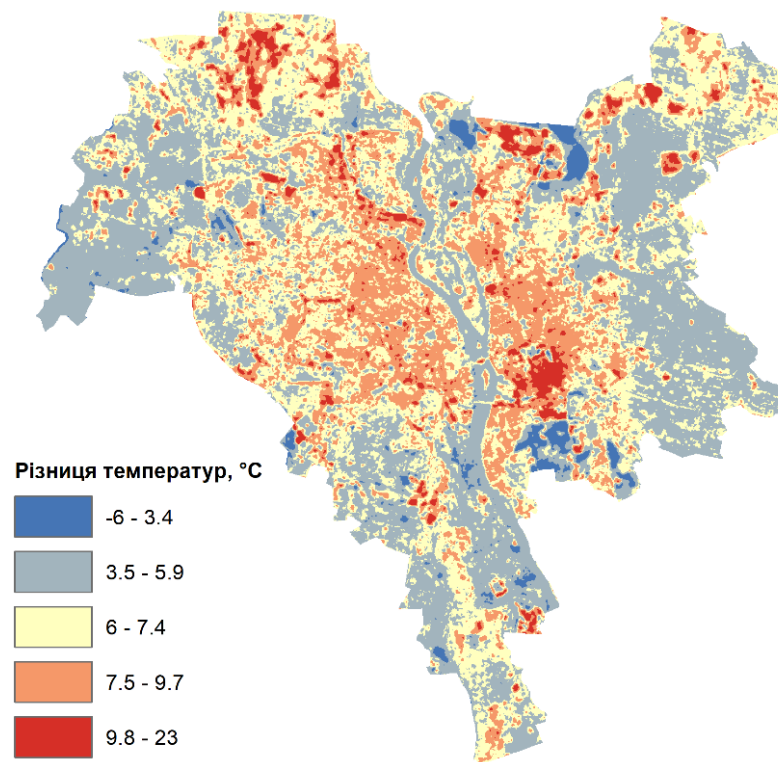


Рис. 4.3. Різниця температур земної поверхні з 1986 по 2016 рр.

Утворились нові МОТ. Одними з них є прибережний Дарницький район, Голосіївський район між м. Васильківська та м. Теремки. Найважливішими переходами КЗП, що підвищують температуру, є від розрідженої рослинності та лісу в забудову, а також перехід лісу в розріджену рослинність. Це вказує на вирубку лісу та урбанізацію як важливі чинники островів тепла.

Погодні фактори впливають на візуалізацію МОТ за супутниковими знімками, особливо хмаровий шум. Отримані зображення інтенсивності островів тепла (а також й ТЗП) характеризують не тільки картину урбанізації, а й метеорологічні умови. В працях (*Arnfield A.J., 2003, Weng Q., Lu D., Schubring J., 2004*) було досліджено вплив на МОТ різних погодних умов та виявлено, що швидкість вітру, опади, хмарність є головними факторами впливу. Тому деякі острова тепла можуть бути не очевидними або зі значеннями, що відхиляються від дійсних значень вимірювань наземними приладами. Точність аналізу супутникових знімків можна у подальшому перевірити за допомогою наземних метеорологічних спостережень.

4.3. Динаміка змін вегетаційного індексу NDVI

Індекс NDVI варіюється від -1 до +1. Області пустирів, піску або снігу, як правило, мають дуже низькі значення NDVI (0.1 та менше). Розріджена рослинність (чагарники та луки), вмираючі культури можуть мати середні значення (0.2–0.5). Високі значення NDVI (0.6–0.9) відповідають густій рослинності, лісам та сільськогосподарським культурам на піку росту. Відповідно, на рис. 3.7 червоним та помаранчевим кольорами зображені території, що за 30 років втратили здорову біомасу, а зеленим – що набули. Дані райони корелюють з островами тепла м. Київ. Індeksi NDVI для обраних дат представлені на рис. 4.4.

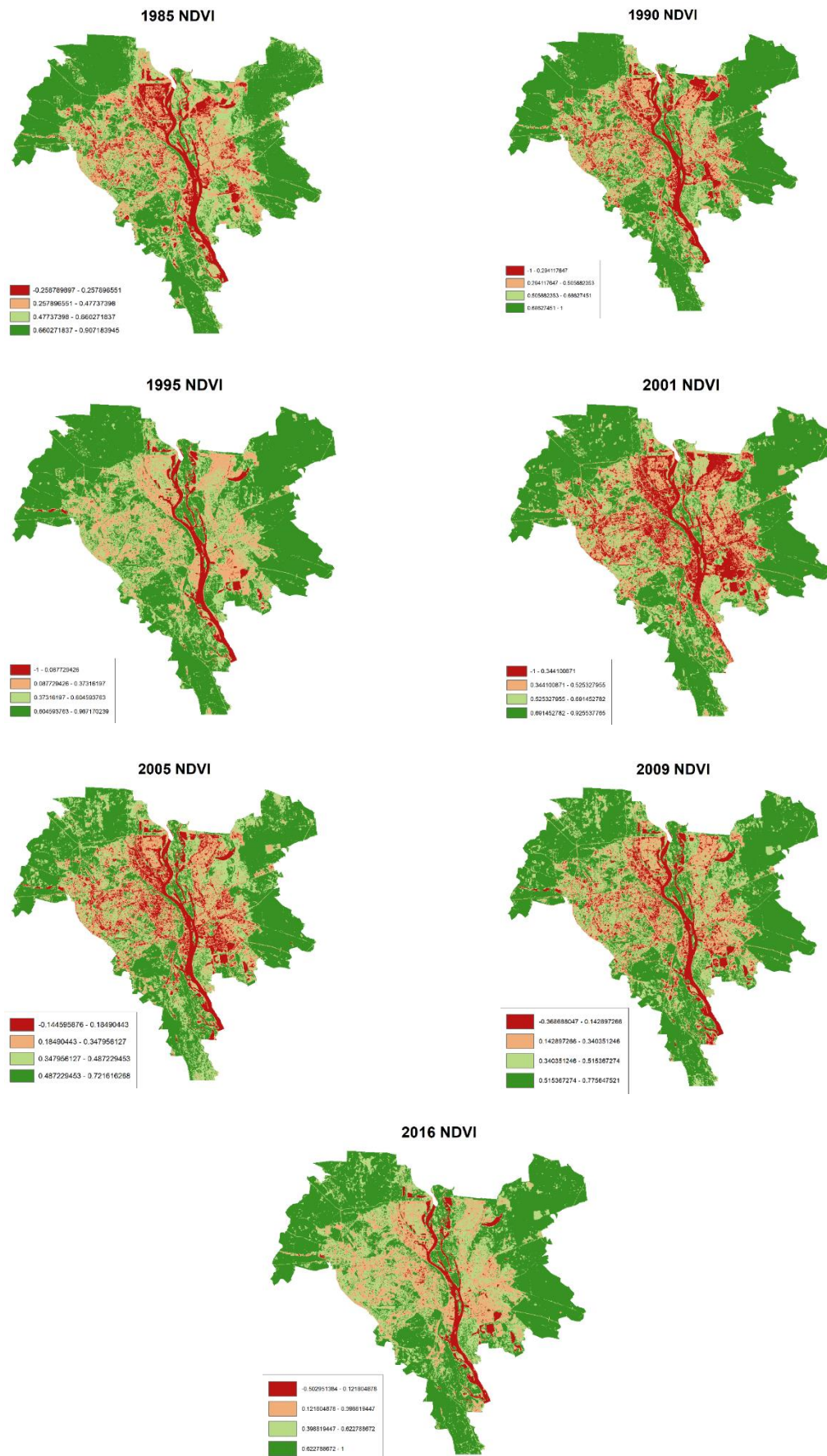


Рис. 4.4. Динаміка NDVI за період 1985-2016 рр.

4.4. Вплив земного покриття на температуру земної поверхні

Основні КЗП, які були використані для пояснення ефекту міських островів тепла та чинників, включають густу та розріджену рослинність, водні об'єкти та міську забудову (непроникні поверхні). На рис. 4.5 представлена динаміка зміни земного покриття.

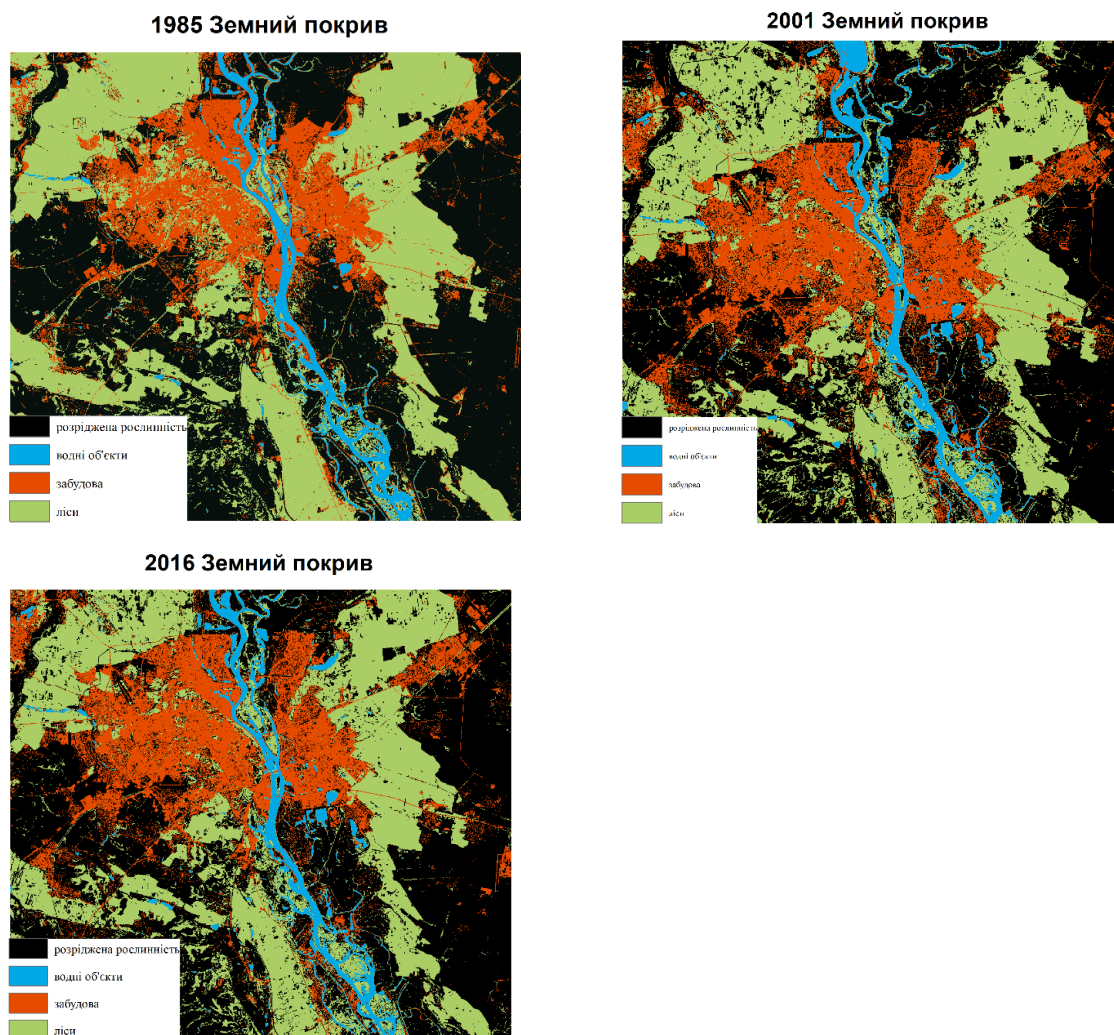


Рис. 4.5. Класифікація земельного покриття у 1985, 2001 та 2016 рр.

Візуальний аналіз свідчить, що площа забудови з 1986 по 2016 р. збільшувалась, із зменшенням площі зелених насаджень. Особливо помітно зростання площі вирублених ділянок посеред лісного масиву на пн-зх. та пд-зх. міста. Існує позитивний зв'язок між МОТ та непроникними поверхнями, тоді як водні ділянки та густіша рослинність мають негативний зв'язок з МОТ.

У табл. 4.1 надано результати класифікації знімків методом опорних векторів.

Таблиця 4.1

Перевірка результатів класифікації SVM

1985 р.					
Точність	0.97 (+/- 0.03)				
Клас	Ліс	Водні об'єкти	Забудова	Розріджена рослинність	Всі
ліс	2972	4	0	1	2977
водні об'єкти	13	693	0	130	836
забудова	0	1	811	0	812
розріджена рослинність	0	4	0	4844	4848
Загалом	2985	702	811	4975	9473
2001 р.					
Точність	0.96 (+/- 0.08)				
Клас	Ліс	Водні об'єкти	Забудова	Розріджена рослинність	Всі
ліс	7854	0	205	15	8074
водні об'єкти	149	2555	67	67	2771
забудова	0	0	1240	0	1240
розріджена рослинність	0	73	0	6820	6893
Загалом	8003	2628	1445	6902	18978
2016 р.					
Точність	0.96 (+/- 0.07)				
Клас	Ліс	Водні об'єкти	Забудова	Розріджена рослинність	Всі
ліс	1272	0	0	0	1272
водні об'єкти	0	959	2	98	1059
забудова	0	0	1948	0	1948
розріджена рослинність	11	0	0	3104	3115
Загалом	1283	959	1950	3202	7394

Як свідчать наведені результати, точність класифікації достатньо висока (0.96-0.97). Найбільша кількість помилок виникає при класифікації водних об'єктів, що може бути спричинено змішаними пікселями з заболоченою або затопленою місцевістю, а також помилками навчальної вибірки.

4.5. Узагальнений статистичний аналіз отриманих даних

Аналіз описової статистики та кореляційної статистики допомагає зрозуміти ТЗП та зв'язок з рослинністю, непониклими поверхнями та характером землекористування. У табл. 4.2 наведена статистичні дані температури поверхні для кожного знімку Landsat.

Таблиця 4.2

Статистичні дані растрів ТЗП, °С

Растр	MIN	MAX	MEAN	STD
1985	18.3851	34.9269	23.0201	2.2268
1990	17.0224	36.9007	22.5225	2.7731
1995	17.0224	35.3358	23.2051	2.4336
2001	19.2915	35.3217	24.7732	2.6058
2005	20.6223	39.1732	26.7664	2.6374
2009	17.0222	38.0124	22.2735	3.4112
2016	22.7954	44.5442	29.4545	2.965

Наведені результати свідчать про логічну послідовність середніх значень від 23°C до 29 °С, за винятком 2009 р., що може бути спричиненим часовими погодними варіаціями. Стандартне відхилення є найменшим у 1986 р. та найбільше у 2009 р. з різницею у 1.19 між цими датами. Мінімальне значення ТЗП є найменше для знімку 2009 р. при 17.02 °С, а найбільше – у 2016 р. при 22.79 °С. Рекордний максимум для серії знімків зареєстрований у 2016 р. – 44.54 °С.

Далі у табл. 4.3 розглянуті значення індексу NDVI для регіону дослідження. Середні значення доволі узгоджені, коливаються в межах 0.41-0.66 з різницею у 0.205 між знімками 1990 та 2005 рр. Стандартні відхилення відрізняються до 0.062 між зображеннями 1995 та 2005 рр.

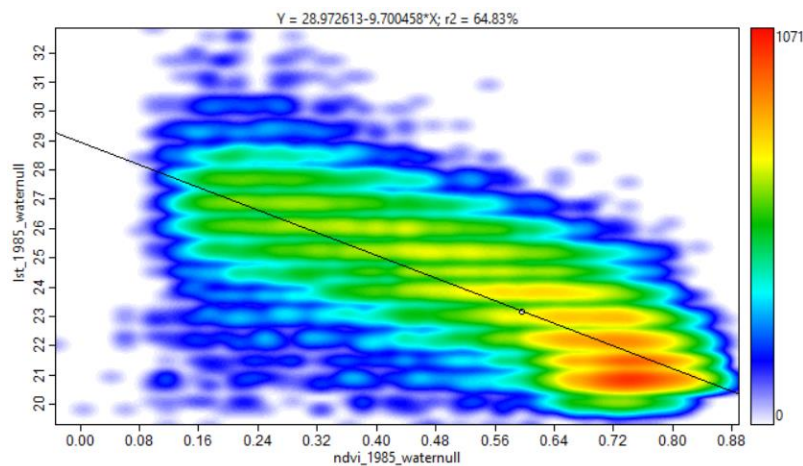
Таблиця 4.3

Статистичні дані растрів NDVI

Растр	MIN	MAX	MEAN	STD
1985	-0.2588	0.9072	0.5749	0.2055
1990	-1	1	0.6152	0.2065
1995	-1	0.9672	0.5585	0.2243
2001	-1	0.9255	0.6069	0.197
2005	-0.1446	0.7216	0.4106	0.162
2009	-0.3687	0.7756	0.4468	0.1906
2016	-0.503	1	0.5662	0.2193

Був виконаний регресійний аналіз середніх значень ТЗП та NDVI для всіх КЗП (виключаючи водні об'єкти), а також для кожного типу окремо. Результати регресійного аналізу представлені на рис. 4.6, де градієнтом кольорів від синього до червоного відображена кількість пікселів відповідно до пари середнього NDVI та температури. Аналіз проводився за 1986, 2005, 2016 рр. в адміністративних межах м. Києва. Як було згадано вище, водні об'єкти були виключені з аналізу через те, що значення ТЗП та NDVI позитивно корелюються в межах водних об'єктів. Тому виключення такого класу підвищить точність регресії для поверхонь землі.

Результати вказують на значну зворотну кореляцію між середнім ТЗП та NDVI для регіону дослідження. Іншими словами, пікселі із високими температурами в середньому відповідають низьким значенням індексу вегетації та навпаки. Концентрація пікселів найбільша (на рис. 4.6 показано червоним) при великих значеннях NDVI (здорова рослинність) та низьких температурах. Такі показники характерні для лісного покриву м. Київ.



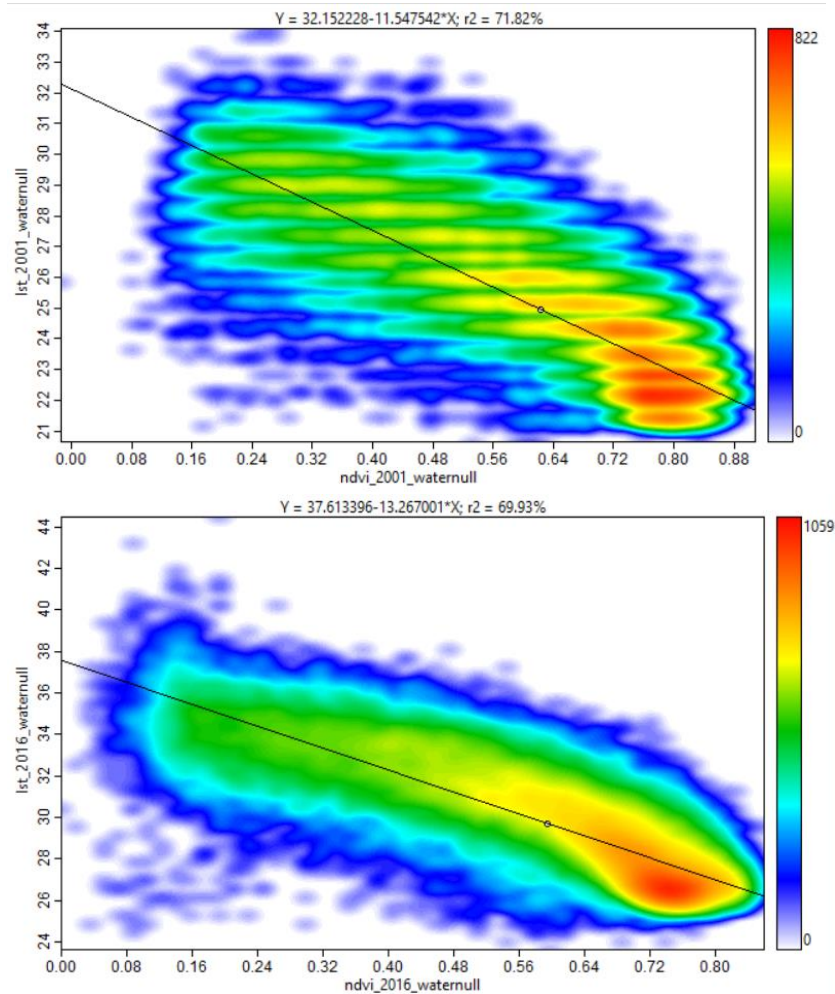


Рис. 4.6. Кореляція растрів ТЗП та NDVI за 1985, 2001 та 2016 рр. (без водних об'єктів)

Для того, щоб значення NDVI краще прогнозували ефект островів тепла, на діаграмі розсіювання має бути явна лінійна залежність. Така лінійна залежність характерна для значень NDVI та КЗП, а зв'язок між NDVI та ТЗП є більш нелінійним. Коефіцієнт детермінації r^2 є мірою залежності варіації залежної змінної від варіації незалежних змінних. Для трьох обраних років коефіцієнт детермінації ближче до 1 (64.83% у 1986 р., 71.82% у 2005 р., 69.93% у 2016 р.), що означає сильнішу залежність та відповідність модель даним.

Щоб краще зрозуміти взаємозв'язок між ТЗП, NDVI та КЗП, далі розглянуто регресійний аналіз кожного типу покриву у 2016 році. Зведення ТЗП та NDVI для кожного типу було реалізовано за допомогою зональної операції в ArcGIS. Для усіх КЗП був знайдений зворотній зв'язок між ТЗП і NDVI. Найменший негативний схил лінії регресії має тип «забудови», а найкрутіший – розріджена

рослинність. Інакше кажучи, з збільшенням NDVI температури розрідженої рослинності зменшується найшвидше, а забудови – повільніше.

Найбільша середня величина NDVI (0.35-0.5) характерна для забудови з рослинністю в межах цього типу. Далі слідують деякі сільськогосподарські ділянки та розріджена рослинність (0.55-0.65) в залежності від фенології, ліси (0.65-1). Цим значенням NDVI також характерні найнижчі значення ТЗП, що вказує на збільшення відносної швидкості евапотранспірації.

Водні об'єкти мають значення NDVI від -0.7 до -0.02 через відсутність рослинності в межах цього типу. Оскільки температура поверхні води піднімається дуже повільно, її температура поверхні також є нижчою, ніж у всіх інших КЗП. Неперервна міська забудова характеризується значеннями від -0.02 до 0.3. Загалом, класи покрову з найменшими середніми значеннями NDVI демонструють найвищі середні значення ТЗП.

На основі регресійного аналізу можна зробити висновок, що NDVI при співставленні із КЗП та растрами ТЗП є гарним способом виявлення того, як розподіл щільності рослинності для чотирьох класів впливає на підвищення температури в межах м. Київ.

Також необхідно оцінити динаміку зміни площі кожного КЗП та відповідну динаміку температур. Площа лісів за 31-річний період скоротилась на 36.1 км², тоді як площа міської забудови збільшилась на 19.5 км² (рис. 4.7).

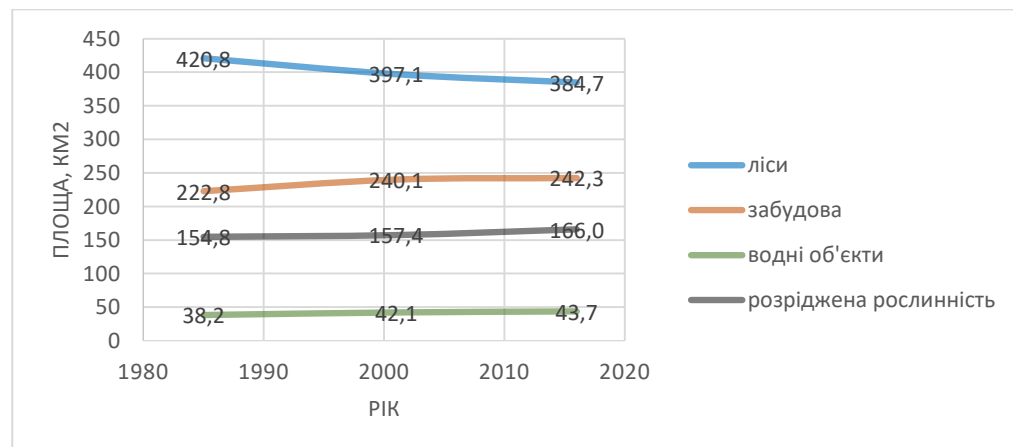


Рис. 4.7. Динаміка зміни площі КЗП у м. Києві з 1985 по 2016 рр.

Ця статистика наводиться без включення приміської урбанізації. Розріджена рослинність та водні об'єкти також займають більшу площу, із збільшенням на 11.2 та 5.5 км² відповідно. У 2016 р. забудова складала 29 % території м. Київ, ліси – 46 %, розріджена рослинність – 20 %, а водні об'єкти – 5 %.

Гістограма на рис. 4.8 показує динаміку середніх температур для кожного КЗП.

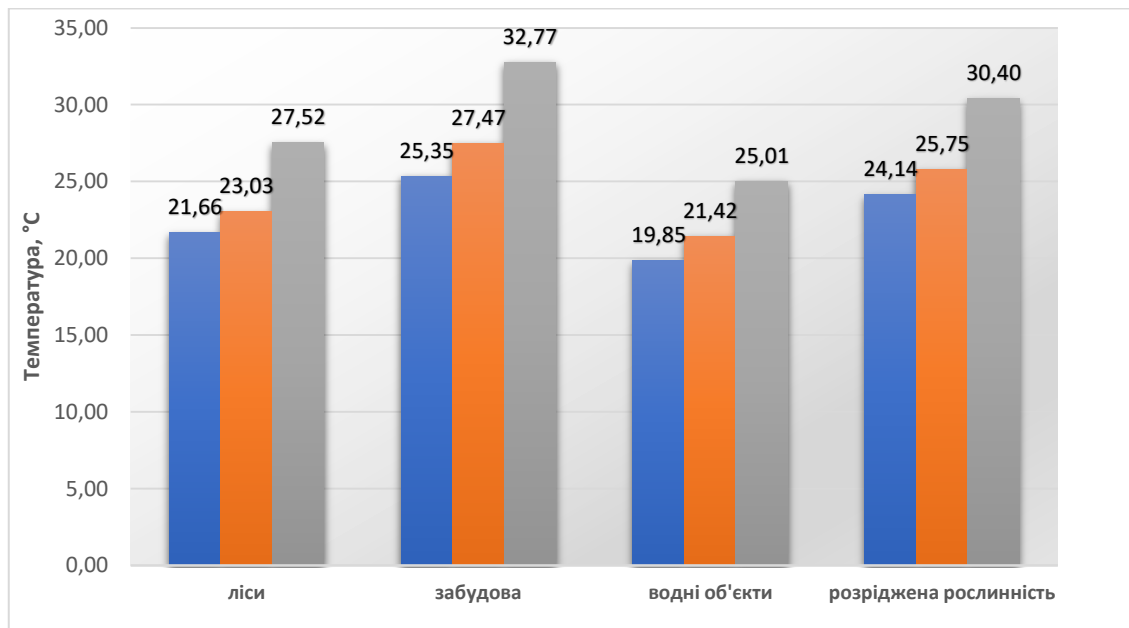


Рис. 4.8. Динаміка температур поверхні м. Києва згідно з класами земного покриття

Спостерігається загальний тренд підвищення температур для кожного класу. У 2016 р. середня ТЗП забудови складала 32.77 °С, за якою слідує ТЗП розрідженої рослинності (30.4 °С), лісів (27.52 °С) та водних об'єктів (25.01 С). Цікаво, що середня різниця температур між 1985 та 2016 рр. дорівнює 5-5.8°С для лісів та водних об'єктів, у той час як для забудови вона сягає 7.42°С. Це може означати, що загальне підвищення температур міської забудови посилюється іншими факторами, такими як зміна альбедо, геометрії території міста.

4.6. Моніторинг міських островів тепла за допомогою нормалізованого індексу рослинності

Аналіз температур поверхні Києва. У більшості випадків карта рослинності (NDVI, або нормалізований відносний індекс рослинності) доволі точно віддзеркалює міські острови тепла.

На рис. 4.9 представлений індекс рослинності (NDVI) і температура поверхні у місті Києві в червні 2020 р., яка свідчить про пряму залежність зміни температур від значення індексу рослинності: зелені пікселі, що отримані при розрахунку NDVI є холоднішими, а ніж коричневі, окрім водної поверхні.

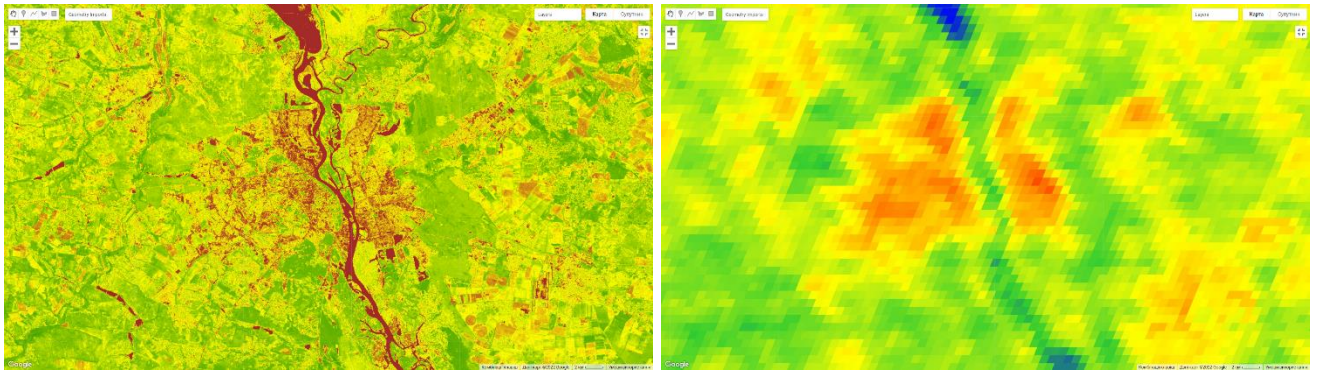


Рис. 4.9. Карта розрахованого рослинного індексу та температури поверхні міста Києва в червні 2020 року, виконано на платформі Google Earth Engine

Для дослідження можливих небезпек, були обраховані ті ж значення, але на чотири роки раніше, а саме на рис. 4.10 представлено NDVI і температуру поверхні Києва в червні 2016 року.

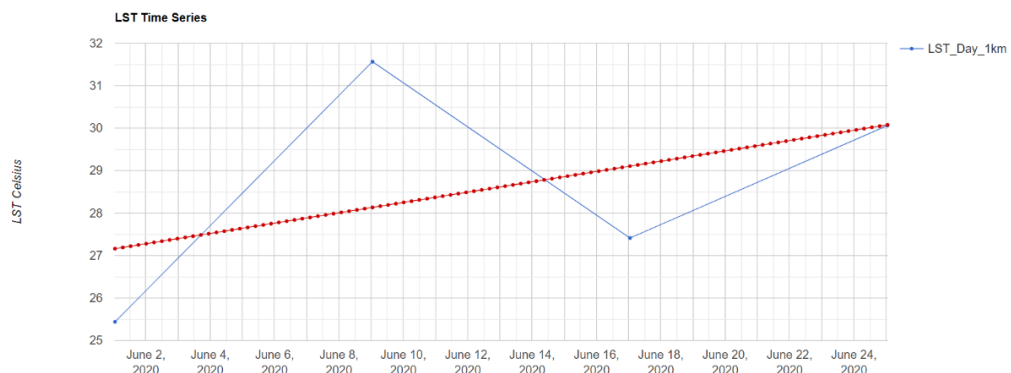


Рис. 4.10. Карта розрахованого рослинного індексу та температури поверхні міста Києва в червні 2016 р., виконано на платформі Google Earth Engine

Незважаючи на, здавалось би, невеликий проміжок часу, все ж маємо різницю в результатах. Так, температура поверхні є значно меншою, відповідно значення NDVI є більшими. Отже навіть за чотири роки температура поверхні змогла зрости, що свідчить про необхідність проведення дієвих попереджувальних заходів.

Щодо кількісних даних варіювання температур, то ми маємо збільшення середньомісячної температури за 4 роки, графічна ілюстрація яких представлена на рис. 4.11.

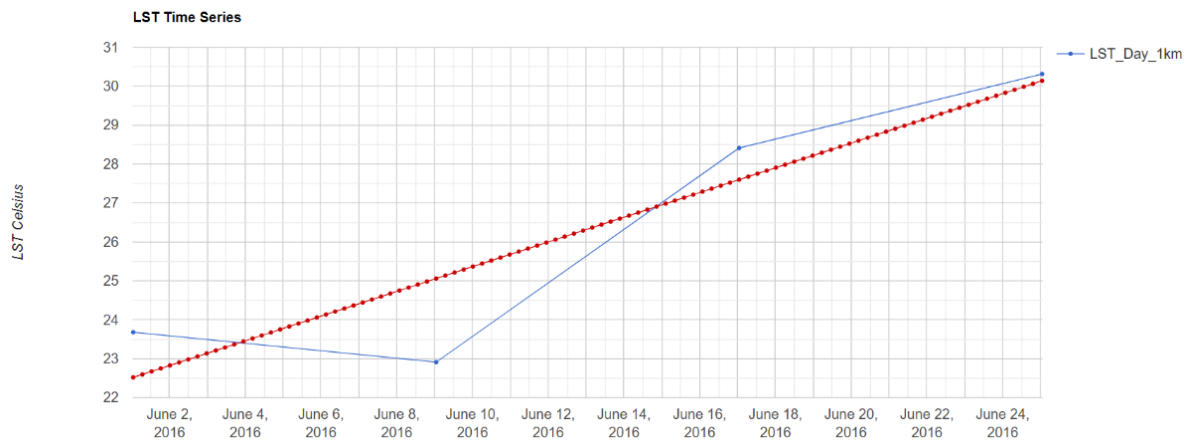


Рис. 4.11. Графік температур в червні 2020 (зверху) та 2016 (знизу) років, виконано на платформі Google Earth Engine

Для більшої точності були обраховані температури за три літніх місяці рис. 4.12, які свідчать підтвердженням допущення, щодо незначного підвищення температури.

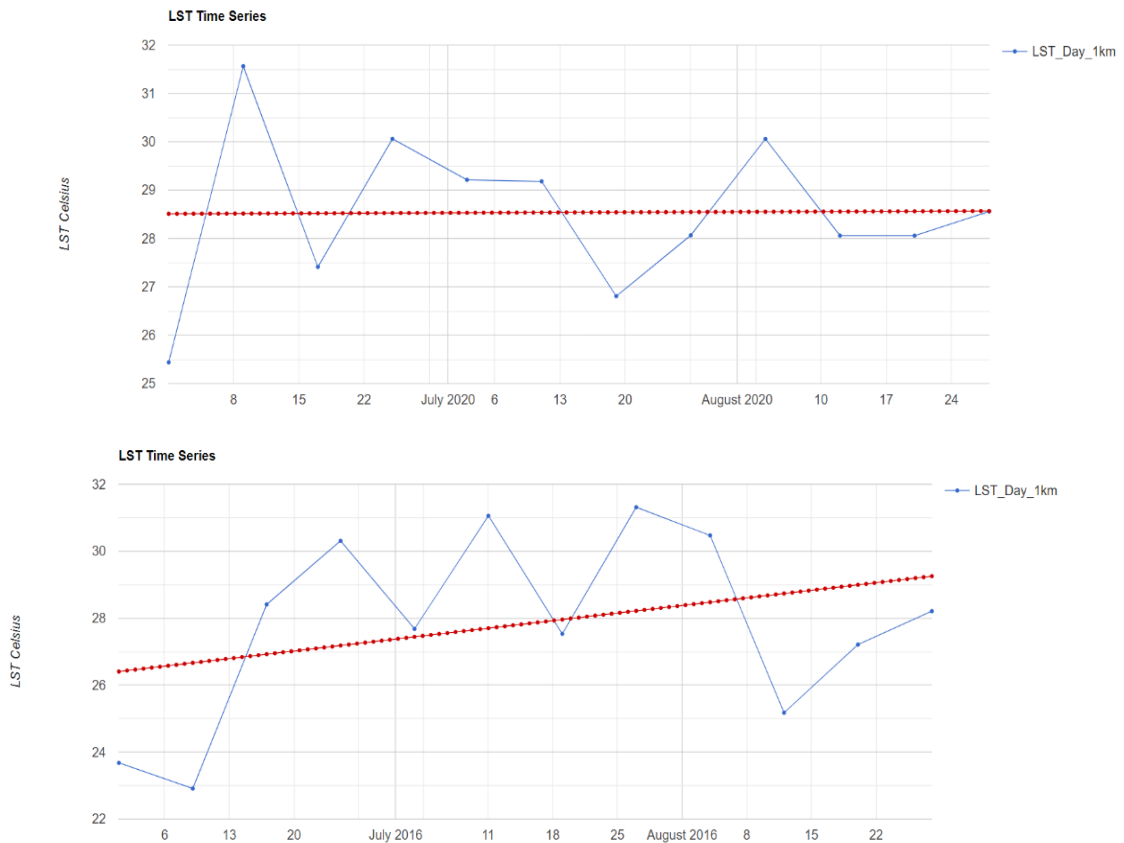


Рис. 4.12. Графік температур за три місяці (червень, липень та серпень) 2020 (зверху) та 2016 (знизу) років, виконано на платформі Google Earth Engine

Зважаючи на важливість зелених насаджень на зменшення впливу МОТ, можна виділити такі основні стратегії:

- зелені дахи: цей спосіб передбачає озеленення дахів, наприклад, шляхом посадки невеликих дерев або створення газону. Рослини на даху збільшують альbedo і зменшують температурні прояви міського теплового острова;

- посадка дерев у містах: посадка дерев у місті є ще одним способом збільшення альbedo та зменшення потужності МОТ. Дерева поглинають вуглекислий газ і створюють затінок. Рекомендується садити листяні дерева, тому що їхні крони затіняють більшу площу в літній час і не затримують тепло взимку;

– зелені стоянки: зелені стоянки створюють для відновлення рослинного покриву та на заміну асфальту, щоб обмежити вплив МОТ.

Для порівняння та розуміння як змінилася площа листя в Києві можна обрахувати LAI (leaf area index)- індекс листової поверхні, який являє собою невід’ємну частину у питанні моніторингу зелених насаджень, оскільки показує відношення загальної площі листя до площі землі. В свою чергу від площі листя залежить кількість перехопленого світла, накопиченого ним азоту, відповідно температура поверхні тощо (*Компанія Agrii, 2020*). Даний індекс є безрозмірним коефіцієнтом, але можливе приведення його розмірності (m^2/m^2 , га/га) (*Довідковий сайт SuperAgronom, 2016-2020*).

Особливістю LAI є те, що він зазвичай обраховується на основі співвідношень значень NDVI та інших коефіцієнтів, які в свою чергу залежать від місця, де необхідним є обрахунок індексу листової поверхні. Тобто формула обрахунку значень LAI буде однією при аналізі лісів у помірних широтах та іншою при аналізі саван тощо. Тож при обрахунку LAI важливим є правильно підібрана формула, яка передбачена для зелених насаджень досліджуваної місцевості.

На рис. 4.13 представлені карти розподілу значень LAI в Києві, а саме ліворуч значення за серпень 2020 р., праворуч за серпень 2016 р.. Відразу стає помітним значно більша кількість зелених та темно-зелених пікселів на старішому знімку. Що в свою чергу свідчить про зменшення площі листової поверхні. Як ми вже згадували, причини можуть бути різними: вирубка, захворювання рослин тощо. Отже необхідним є перевірка районів, які зазнали суттєвих змін. Оскільки площа листової поверхні прямо впливає на температуру. Користуючись базою даних Hansen Global Forest Change (роздільна здатність 30 м), яка дає змогу переглянути як змінювався світовий лісовий покрив з 2000 р. до сьогодні, змогли дослідити та відобразити зміни, які відбулися на території м. Києва та за його околицями за цей проміжок часу.

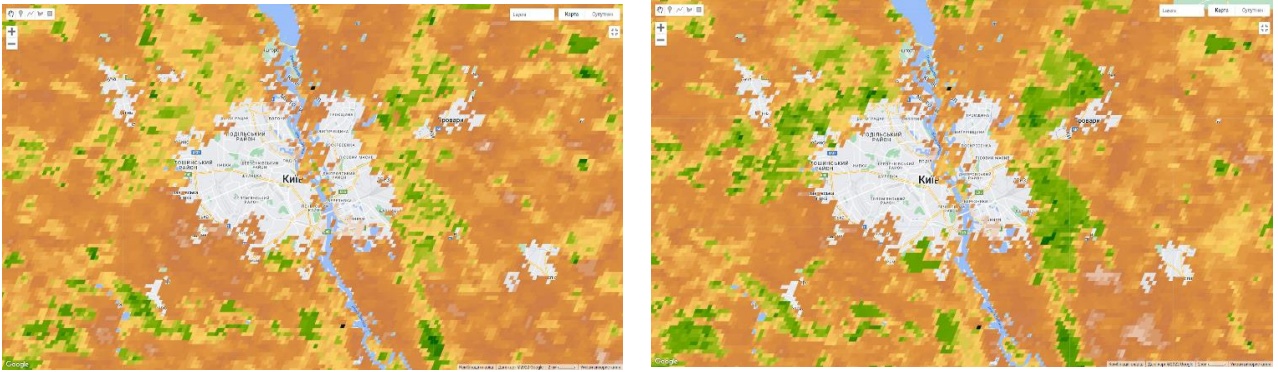


Рис. 4.13. Розрахунок індексу листової поверхні за 2020 (ліворуч) та 2016 (праворуч) рр. в м. Києві, виконано на платформі Google Earth Planet з використанням бази даних MOD15A2H.061: Terra Leaf Area Index 500m

На рис. 4.14 пікселі червоного кольору відображають втрачені дерева та іншу рослинність. Сині пікселі ж навпаки демонструють приріст, або появу нових насаджень

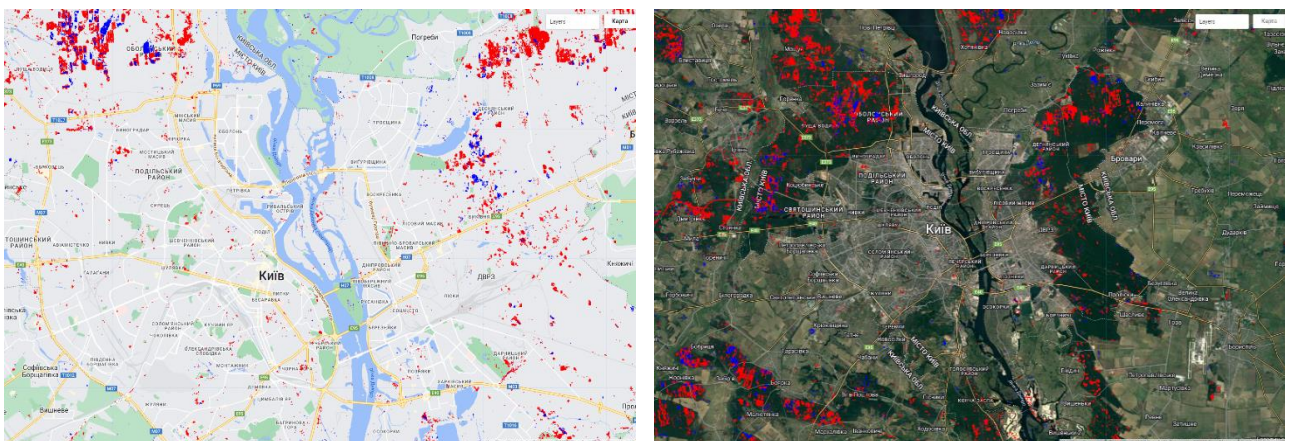


Рис. 4.14. Карта втрат та збільшення дерев в Києві в період з 2000 до 2018 року, виконано на платформі Google Earth Engine з використанням бази даних Hansen Global Forest Change 30m

Аналізуючи отриманий результат, бачимо, що центр Києва майже не має синіх пікселів, що свідчить про відсутність нових деревних насаджень за цей проміжок часу. Дивлячись на околиці міста та за їхні межі, також бачимо перевагу в кількості червоних пікселів, що свідчить відповідно про вирубку або загибель дерев, які на жаль, стають більш частішим явищем, а ніж висадка нових. А це прямо впливає на зростання температури міських островів тепла.

4.7. Пропозиції щодо пом'якшення ефектів островів тепла

У проведеному дослідженні було доведено, що КЗП тісно пов'язані з ТЗП, NDVI та впливають на загальний характер міських островів тепла. Різні класи покрову мають різні коефіцієнти детермінації ТЗП та NDVI. Загалом, для досліджуваної території спостерігались зворотні зв'язки між даними показниками.

Останнім часом в Києві збільшуються темпи зростання кількості населення, плануються нові житлові та комерційні комплекси. Теплові характеристики таких типів забудови при збереженні сучасних трендів та характеру планування призведуть до інтенсифікації островів тепла. З цих причин важливим є аналіз того, які типи забудови (відповідні альbedo, геометрія) та характер рослинного покриву є найбільш сприятливими для зменшення ТЗП.

Стратегії пом'якшення негативного впливу МОТ можуть мати негайний результат у малих масштабах за рахунок збереження енергії та зниження витрат. Такі результати, як правило, проявляються в масштабі великих структур або комплексів структур з вищою ТЗП, ніж у навколишніх територіях. При поєднанні декількох локальних структур відбувається пом'якшення впливу МОТ на більшому, місцевому рівні. Отже, таке важливе примноження результатів починається з жилих комплексів та районів; змінюючи земельні покрити та конструкції спочатку у невеликих масштабах, а потім на рівні всього міста

Низьковартісні та ефективніші методи вимірювання ТЗП можуть допомогти при боротьбі із наслідками феномену островів тепла. Наприклад, це можуть бути безкоштовні дані дистанційного зондування Землі, такі як знімки Landsat, що були використані в даній роботі. Містобудівники також можуть приймати до уваги растри NDVI та кадастрові карти землекористування з метою зменшення впливу МОТ. Такі міста, як Чикаго та Нью-Йорк, вже проводять

картування MOT для визначення найінтенсивніших областей та пом'якшення їхнього впливу (*Hertsgaard, M., 2011, Rosenzweig C., Solecki W., Slosberg. R.B., 2007*). Такий підхід покращується додаванням соціально-економічних даних для того, щоб вразливі групи населення, такі як люди похилого віку або малозабезпечені мешканці з меншими фінансовими ресурсами для оплати електроенергії, в результаті нової стратегії могли б жити в районах із зниженим тепловим навантаженням. Стратегії пом'якшення ефектів MOT передбачають стратегічне озеленення парків та міських лісів, збільшення поверхневих альbedo конструкцій, планування кращої текстури та геометрії житлових комплексів.

Крім того, низьковартісні супутникові дані ТЗП є ефективною методикою дослідження розміщення MOT в країнах, що розвиваються. Багато цих країн перебувають у тропічному кліматі з зростаючим населенням та швидким розширенням міської інфраструктури. Отже, початковий акцент на озеленення при міському плануванні цих територій може зменшити енергетичні потреби та витрати, зменшити генерування електроенергії, подальше використання викопного палива та викиди CO₂. Отримання даних температури земної поверхні за супутниковими знімками у поєднанні з використанням низькочастотних реєструвачів температури повітря представляє собою ефективний метод низьковартісного дослідження при плануванні конкретних стратегій зменшення ефектів MOT. У поєднанні з практичними рішеннями, такими як застосування білого покриття для покрівлі дахів, термоізоляція будівель та водопровідних труб, висадка рослинності у масштабах всього району, це могло б стати основою майбутніх стратегій пом'якшення ефектів MOT у м. Києві.

ВИСНОВКИ

Розглянуто актуальну проблему розвитку феномену MOT за матеріалами ДЗЗ на прикладі м. Києва. МДЗ дозволяють різко знизити вартість досліджень та одночасно збільшити території досліджень. Отримані та проаналізовані знімки Landsat 5 ETM+ та Landsat 8 OLI/TIRS за загальний період у 30 років, а саме 1985, 1995, 2005 та 2016 рр. Крім того, були створені растрові зображення температури земної поверхні, NDVI, класифікації земного покриття.

Основою розробленого під керівництвом проф. Зацерковного В.І. алгоритму стала мова програмування Python та програмне забезпечення ArcGIS.

Удосконалені навички роботи з бібліотекою Arcpy, Gdal, Sklearn, методами обробки геоданих, інструментами ArcGIS.

Вивчена специфіка роботи з растровими зображеннями та методи дистанційного зондування Землі.

Представлені результати розрахунків за програмою та проведений аналіз отриманих даних.

Інтенсивність МТО визначається взаємодією кількох факторів, таких як ступінь урбанізації (загальна площа забудови, чисельність населення, промисловість та транспорт), геометрія території міста, фізичне середовище та характер діяльності людини.

Підтверджено, що феномен міських островів тепла пов'язаний з підстильною поверхнею, типом землекористування та рослинного покриття. Урбанізація території Києва безпосередньо збільшує розмір існуючих островів та створює нові за останні 30 років.

Високі значення температур поверхні характерні для забудованих районів, заводів, а також пустирів та посівів. Области з щільною рослинністю та високим NDVI мають нижчі температури, ніж райони з розрізненим рослинним

покривом; забудовані та густонаселені райони мають дуже високі температури та формують острова тепла.

Підтверджено, що інтенсивність МОТ історично була високою в Оболонському, Шевченківському, Дніпровському та на заході Святошинського району, де досить висока щільність забудови. Найменше островів тепла в районах з водними об'єктами, лісами, парками та дачними ділянками. Тим не менш, залишились певні невизначеності в роботі для подальшого розгляду з боку використаних методів, сезонної та добової варіації клімату.

Дані супутників Landsat забезпечують достатньо високий рівень деталізації просторових об'єктів для моніторингу та аналізу.

Недоліком є обмеження в періодичності отримання знімків для довгострокового аналізу трендів. Проте додавання до аналізу теплових інфрачервоних каналів супутників з меншим часом орбіти (наприклад, MODIS) може збільшити кількість безхмарних знімків та заповнити часові проміжки у подальших дослідженнях, таким чином покращуючи оцінку міських островів тепла. Отримані результати доцільно порівняти з даними наземних метеорологічних станцій для покращення алгоритму та підвищення деталізації.

Результати досліджень було апробовано на конференції «XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 листопада 2022 р., Київ, Україна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Абдуллаев С. М., Кораблева Е. Г., Сапельцева Ю. А., Егорова А. В., Бабинцева В. А., Неверова Е. А. Оценка жизненного цикла природно-антропогенных систем // Вестник ЧелГУ. -2008. -№17

Антонович В.В., Белан Б.Д., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Фофонов А.В. Выделение вклада города в изменение термодинамических характеристик воздуха на примере г. Томска // Оптика атмосферы и океана. -2005. -Том 18, № 08. -С. 638-642.

Балдина Е. А., Грищенко М. Ю., Константинов М. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне// ДЗЗ для будущей Земли. Земля из космоса. «СПЕЦВЫ- ПУСК», 2015. – С.38-42.

Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. - Л.: Гидрометеиздат. -1980. -С. 184.

Безуглая Э.Ю. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере.- Л.: Гидрометеиздат, 1983.- 328 с.

Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. - Л.: Гидрометеиздат, 1991, 255 с.

Белан Б.Д. К вопросу о формировании «шапки» загрязнений над промышленными центрами // Оптика атмосферы и океана. -1996. -Том.9, №4. - С. 460-463.

Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Маринайте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофонов А.В., Ходжер Т.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосф. и океана. -2007. -Том 20, № 5. -С. 428 – 437

Белан Б.Д., Колесников Л.А., Лукьянов О.Ю., Микушев М.К., Семьянова О.И., Толмачев Г.Н., Усманова В.М. Изменение концентрации озона в

приземном слое воздуха. Оптика атмосферы и океана. -1992. -Том 5, №6. -С. 635-638.

Белан Б.Д., Скляднева Т.К. Суточный ход концентрации приземного озона в районе г. Томска // Метеорология и гидрология. -2001. -№5. -С.50-59.

Белан Б.Д., Пелымский О.А., Ужегова Н.В. Исследование антропогенной составляющей теплового баланса города // Оптика атмосферы и океана. -2009. -Том 22, № 6. -С. 558 - 561.

Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты,- Л.: Гидрометеоиздат. -1992. – 40 с.

Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений. - Л.: Химия. - 1989, 288 с.

Бримблкумб П. Состав и химия атмосферы. - М.: Мир, 1988. - 352 с.

Бызова Н.Л. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте. - М.: Гидрометеоиздату -1982. - С. 69.

Вязанкин А.С., Вязанкин С.А., Жадин Е.А., Кадыгров Е. Н. Анализ вертикального распределения температуры в пограничном слое атмосферы в пригороде и мегаполисе//Метеорология и гидрология.- М. -2003. -№ 7. - С. 5-12.

Гиясова И.В., Гиясов Т.Б. Формирование микроклимата городской застройки высотными зданиями // Ивд. -2020. -№2(62).

Голицын Г.С., Мохов И.И. и др. Турбулентность, динамика атмосферы и климата // Сборник трудов. Москва: ГЕОС, 2013. — 247 с. -С. 703.

Гуния Г.С. О метеорологических аспектах загрязнения атмосферы в районах промышленных городов горных регионов Грузии // Метеорология и гидрология. -2006. -№2. -С. 51-58.

Гусев М.А. Некоторые особенности термического режима в пограничном слое атмосферы над Москвой. //Труды ЦВГМО,- М. -1975. -Вып. 3. - С. 36-43.44.

Гусев, Н. М. Основы строительной физики: Учеб, пособие по спец. "Архитектура". - М.:Стройиздат. -1975. – 440 с.

Григорьев В. А., Огородников И. А. Проблемы экологизации городов в мире, России, Сибири - Новосибирск. -2001г. -С. 148.

Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты. //Вестник Южно-Уральского государственного университета. -2021. -Том. 21. -Вып. №1. -С. 5-12.

Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В. Влияние рельефа на микроклиматическую изменчивость зимней температуры воздуха в городе Апатиты // Вестник Кольского научного центра РАН. -2016. -№3 (26).

Денисов В. В., Гутенев В. В., Луганская И. А., "Экология". - М.: Вузовская книга. -2002. – 726 с.

Джедид Мурад. "Биоклиматическая архитектура: обзор опыта создания внешнего комфорта городской среды в условиях сухого и жаркого климата" Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, №. 3 (33), 2015, С. 13-23.

Дубровская С.А., Ряхов Р. Тепловые структуры и аномалии города магнитогорска по результатам дешифрирования мультиспектральных изображений. Журнал: Вестник оренбургского государственного университета. -2015. -С. 286-288.

Дудорова Н.В., Белан Б.Д. Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томске // Оптика атмосферы и океана. -2016. -Том 29. -№ 5.

Егорычев О.О., Дуничкин И.В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки // Вестник МГСУ. -2013. -№6. -С. 123—131.

Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура - От принципов к стратегии развития // Вестник ТГАСУ. -2014. -№ 6. - С. 9-24.

Зацерковний В.І. Дистанційне зондування Землі. Фізичні основи. Навчальний посібник. Ніжин: Ніжинський державний університет ім. М. Гоголя. – 2018, 380 с.

Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А. Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности // Оптика 141 атмосферы и океана. -2010. -Том 23, №1. -С. 32-37.

Игнатов В. Г., Кокин А. В. Экология и экономика природопользования. - Ростов-на-Дону, изд. "Феникс". -2003. – 508 с.

Исаев А.А. Экологическая климатология. – М.: Научный мир. -2003. – С. 472.

Исаев А.А., Каллистратова М.А., Локощенко М.А., Пекур М.С. Термическая структура атмосферного пограничного слоя над Москвой. Оптика атмосферы и океана. -1994. -Том 7, № 05. - С. 650-664.

Исаков С.В., Шкляев В.А. Определение суммарного влияния антропогенноизменных поверхностей на возникновение эффекта «Городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // Вестник ОГУ. - 2014. - №1 (162).

Исаков С.В., Шкляев В.А. Определение суммарного влияния антропогенноизмененных поверхностей на возникновение эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // Вестник ОГУ. -2014. -Том 161, № 1. -С. 178-182.

Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Доклады Академии наук. -2002. -Том 385, № 4. -С. 541-548.

Кадыгров Н.Е., Кручештцкий Г.М., Лыков А.Д. Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного

пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. -2007. -Том 43, № 1. -С. 1-13.

Кадыгров Е. Н., Коддасв А.В. Миллер Е. А., Соколов В. В. и др. Исследование неоднородности острова тепла в г. Нижний Новгород с помощью мобильного дистанционного измерителя профилей температуры атмосферы //Метеорология и гидрология. -2007. -№2. -С. 54-66.

Клипов Ф.Я. К вопросу о распределении температуры, скорости и направления ветра с высотой в нижнем слое атмосферы // Метеорология и гидрология. - 1968. -№5. -С. 83-86.

Коваленко П. П. Градостроительная климатология: Учеб, пособие // Горький Горьков. гос. ун-т. - 1980. – 38 с.

Коваленко П. П., Орлова Л. Н. Городская климатология. М.: Стройиздат. - 1993. – 70 с.

Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе // Доклады академии наук. 1999. – Том 367, №2. – С. 253-256.

Кратцер П.А. Климат города. - М.: Изд. иностр. литер. - 1958. – 239 с.

Куприянов В.Н. Градостроительная климатология: Учебное пособие. - Казань: КГАСУ. -2012. -. 147 с.

Ландсберг Г.Е. Климат города. - Л.: Гидрометеиздат. С. 1983. – 248 с.

Ле минь Туан, Алексашина В. В. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. -2018. -№5. -С. 36-40.

Ле Минь Туан, Алексашина В. В. Проблемы градостроительства в условиях тропического климата (на примере города Ханой) // Сборник докладов международной научно-практической конференции. Москва. -2018. - С. 183-187.

Ле Минь Туан, Шукуров И. С., Шукурова Л. И., Дмитриева А. Д. Влияние эффекта городского острова тепла на развитие устойчивого градостроительства

(на примере города Ханой) // Градостроительство и архитектура. -2020. Том 10, №2. -С. 62-70.

Лицкевич В.К. Жилище и климат. - М.: Стройиздат. -1984. - 288 с.

Лицкевич В.К., Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И. Город, архитектура, человек и климат // Издательство: Архитектура. -2007. – 344 с.

Маккормик Р.А. Метеорология и загрязнение воздуха в городах//Бюллетень ВМО.-1989. - Том 18, № 3. - С. 189-196.

Малахов В.М., Сенич В.Н. Тепловое загрязнение окружающей среды промышленными предприятиями // Новосибирск: ГПНТБ СО РАН. -1997. -С. 68.

Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Формирование и особенности острова тепла в большом городе // Доклады РАН. Геофизика. -2000. – Том 370, № 2. -С. 249 – 252.

Матвеев Ю.Л., Меркурьева Н.А. Особенности формирования температурно-влажностного режима в большом городе // Оптика атмосферы и океана. -1997. -Том 10, №10. -С. 1181-1187.

Мягков М.С., Алексеева Л.И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки // АМІТ. -2014. – Том 1 (26). -С 3-14.

Мягков М. С., Алексеева Л. И. Оценка усиления городского "острова тепла" за счет применения фотоэлектрических установок // Экология урбанизированных территорий. - 2020. -№2.

Нахаев М.И., Кузнецова И.Н. Условия формирования экстремальных значений городского острова тепла в московском мегаполисе//XII Международная конференция молодых ученых «Состав атмосферы, атмосферное электричество Климатические процессы», Корок.- 2008. С. 99.

Николаенко А.П. Концепция теплового баланса планеты и глобальное потепление //Радиофизика и электроника. -2008. -Том 13. №3. -С. 572 - 576.

Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Сухоруков В.А. Использование данных дистанционного зондирования земли для построения карты городского

острова тепла. //Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва. -2020. -С. 286-294.

Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты. //Вестник Южно-Уральского государственного университета. -2021. -Том. 21. -Вып. №1. -С. 5-12.

Попова И. В. Архитектурно-климатический анализ городской среды (на примере г. Воронежа) / И. В. Попова Э. В. Сазонов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. -2017. – № 4(3). – С. 61-69.

Попова И. В., Куролап С. А., Виноградов П. М. Моделирование городского острова тепла» средствами геоинформационного анализа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. -2018. -№ 2(5).

Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат. – 1986. – 183 с..

Серебровский Ф.Л. Климат и архитектура. Перевод с английского архитектора В. Б. Соколова М.: Госстройиздат ISBN. -1959.

Стулов Е.А., Постнов А.А. О некоторых особенностях формирования «островов» тепла в атмосферном пограничном слое // Тр. Центр. Аэрол. Обсерв. -1991. – № 175. -С. 34 – 40.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. - Л.: Гидрометеиздат. -1974. - С. 568.

Шукуров И.С., Ле Минь Туан, Шукурова Л.И., Дмитриева А.Д. Влияние эффекта "городского острова тепла" на устойчивое развитие городов // Градостроительство и архитектура.-2020. – Том 10, Вып. 2(39). – С. 62-70.

Asaeda T., Ca V.T. The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model // Boundary Layer Meteorol. - 1993. - Vol. 65. P 159-179.

Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence // *Landscape and urban planning*. - 2010. - Vol. 97. P. 147-155.

Brown G., Isfält E. Solar irradiation and shading devices // Nat. Swedish Council for Building Research, Stockholm. - 1974.

Bruse Michael // ENVI-met website (n.d.) retrieved on September 16, 2007 from: <http://www.envimet.com/>.

Bruse M. ENVI-met implementation of the Jacobs .A - gs Model to calculate the stomata conductance. - 2004. http://envi-met.com/documents/new_a_gs.pdf.15.04.2015, 2004b.

Bruse M. Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur-, und Feuchtverteilung in städtischen Strukturen// PhD Thesis, Univ. Bochum. 1999.

Bussinger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. Flux-Profile relationships in the atmospheric surface layer // *J. Atmos. - 1971. Sci. Vol. 28. P 181-189.*

Chatzinikolaou E., Chalkias C., Dimopoulou E. Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model, *Int. Arch. Photogramm // Remote Sens. Spatial Inf.* - 2018. Sci., XLII- Vol. 4. - P. 69–76. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018.

Clapp R.B., Hornberger G. Empirical equations for some soil hydraulic properties // *Water Resource Research*. -1978. -Vol. 14. -P. 601-604.

Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // *Remote Sens. Environ.* -1991. -Vol. 37. -P. 35–46.

Congalton R.G.; Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices // CRC press: Boca Raton, FL, USA. -2008.

Guha S.; Govil H.; Dey A.; Gill N. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *Eur. // J. Remote Sens.*-2018. -Vol. 51. P. 667–678.

Deardoff R.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation // *J. Geophys. Research.* - 1978. -Vol. 83. -P. 1189-1903.

Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K. Global consequences of land use. *Science* [Глобальные последствия землепользования. наука], 2005, V. 309, pp. 570–574.

Guha S.; Govil H.; Mukherjee S. Dynamic analysis and ecological evaluation of urban heat islands in Raipur city, India // *J. Appl. Remote Sens.* -2017. -Vol. 11, 036020.

Harman I.N. The energy balance of urban areas // Unpublished, Doctor of Philosophy Thesis, University of Reading, Reading, UK. -2003.

He C.; Shi P.; Xie D.; Zhao Y. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach // *Remote Sens. Lett.* -2010. -Vol. 1. - P. 213–221

[Howard](#) *Luke.* The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis, 2 vol., London, 1818-20.

Howard L. The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it // London, Harvey and Darton. -1833.

Houghton J.T. The physics of the atmosphere. Cambridge University press. New York. -1977.

Jacobs C.M.J. Direct Impact of atmospheric CO2 enrichment in regional transpiration PhD Thesis // Wageningen Agricultural University. Netherlands. -1994.

Manju Mohan. Urban Heat Island Assessment for a Tropical Urban Airshed in India // *Atmospheric and Climate Sciences*, 2012, 2, 127-138.

Markus T.A., Morris E.N. Buildings, Climate and Energy. Pitman. London. - 1980.

Mitchell J. M. 'On the causes of instrumentally observed secular temperature trends // *Journal of Meteorology*. -1953. -Vol. 10. -P. 244–261.

Landsat 7 Science Data Users Handbook [Электронный ресурс] / National Aeronautics and Space Administration. – 2016. – Режим доступа: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf

Landsat 8 (L8) data users handbook [Электронный ресурс] / U.S. Geological Survey. – 2016. – Version 2.0. – Режим доступа: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>

Li, Y.; Zhao, X. An empirical study of the impact of human activity on long-term temperature change in China: A perspective from energy consumption. *Journal of Geophysical Research* (2012) 117. [doi:10.1029/2012JD018132](https://doi.org/10.1029/2012JD018132).

Liu Z., Zheng S., Zhao L. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area // *Atmosphere*. -2018. -Vol. 9. -P. 198. DOI:10.3390/atmos9050198.

Liu J., Chen J.M., Black T.A., Novak M.D. E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge // *Boundary-Layer Meteorol.* -1996. -Vol. 77. -P. 21-44.

Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. -1982. -Vol. 108 (455). -P. 1-24.

Oke T.R. City size and the urban heat island // *Atmospheric Environment*. - 1967. -Vol. 7 (8). -pp. 769-779.

Oke T. R. *Boundary Layer Climates*. – Methuen: London and New York, 1997.
Paltridge G.W., Platt C.M.R. *Radiative processes in Meteorology and Climatology* // Elsevier. New York. -1976.

Pearlmutter D., Berliner P. and Shaviv E. Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert // *International Journal of Climatology*. -2007. - Vol. 27 (14). -P. 1875-1885.

Quintano C.; Fernández-Manso A.; Calvo L.; Marcos E.; Valbuena L. Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. *Int // J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* -2015. -Vol. 36. -P. 1–12.

Renou E. 'Instructions météorologiques' // *Annuaire Société Météorologie de France.* -1855. -Vol. 3(1). - P. 73–160.

Renou, E. 'Différences de température entre, Paris et Choisy-le-Roi'. *Annuaire Société //Météorologique de France.* -1862. -Vol. 10. -P. 105–109.

Renou, E. 'Differences de temperature entre la ville et la campagne // *Annuaire Société Météorologie de France.* -1868. -Vol. 3. -P. 83–97.

Schmidt W. 'Zum Einfluss grosser Städte auf das Klima'// *Naturwissen.* -1917. - Vol. 5. -P. 494–495.

Schmidt W. 'Die Verteilung der Minimum temperaturen in der Frostnacht des 12 Mai 1927 im Gemeindegebiet von Wien'// *Fortschritte der Landwirtschaft.* -1929. -Vol. 2(21). -P. 681–686.

Solecki, William D.; Rosenzweig, Cynthia; Parshall, Lily; Pope, Greg; Clark, Maria; Cox, Jennifer; Wiencke, Mary. Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part 6: Environmental Hazards*, 2005: 39–49. [doi:10.1016/j.hazards.2004.12.002](https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002).

Santos Fabiane. Trees – the Natural Air Conditioners. *Scientific Scribbles.* The University of Melbourne, 23 Aug. 2013. Web. 27 Sept. 2013. <<http://blogs.unimelb.edu.au/sciencecommunication/2013/08/23/trees-the-natural-air-conditioners/> [Архівовано 2 жовтня 2013 у [Wayback Machine](https://www.waybackmachine.org/)].

Sobrino J.A.; Jimenez-Munoz J.C.; Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sens. Environ.* -2004. -Vol. 90. -P. 434–440.

Taesler R., Anderson C.Tan K.C.; San Lim H.; MatJafri M.Z.; Abdullah K. Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use land cover changes in Penang Island, Malaysia // *Environ. Earth Sci.* -2010. - Vol. 60, -P. 1509–1521.

A method for solar radiation computing using routine meteorological observations // *Energy and Buildings.* -1984. -Vol. 7. -P. 341-352.

Vani, V.; Mandla, V. Comparative Study of NDVI and SAVI vegetation Indices in Anantapur district semi-arid areas // *Int. J. Civ. Eng. Technol.* -2017. -Vol. 8. -P. 287–300.

Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban areas // *Remote Sensing of Environment.* -2003. -Vol. 86. -P. 370-384.

United States. NASA. Air Pollution Prevention Through Urban Heat Island Mitigation: An Update on the Urban Heat Island Pilot Project. By Virginia Gorsevski, Haider Taha, Dale Quattrochi, and Jeff Luvall. N.p.: n.p., n.d. Print.

Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, application and trends // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* . 2009 № 64H. 335-344.

Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G., Vejre, H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators.* -2017. -Vol. 82. -P. 152-162.

Zhang Y.; Yu T.; Gu X.; Zhang Y.; Chen L. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. // *Remote Sens. Beijing.* -2006. -Vol. 10. P. 789.

Zha Y.; Gao J.; Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // *Int. J. Remote Sens.* -2003. -Vol. 24. -P. 583–594.

Zhang Y.; Odeh I.O.; Han C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* -2009. -Vol. 11. P. 256–264.

Zhaowu Yu, Xieying Guo, Yuxi Zeng, Motoya Koga, Henrik Vejre. Variations in land surface temperature and cooling efficiency of green space in rapid urbanization: The case of Fuzhou city, China//*Urban Forestry & Urban Greening.* -2018. -Vol. 29. -P. 113-121