

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**Географічний факультет
кафедра географії України та регіоналістики**

Клімат міста Чернівці, тенденції його сучасних змін

Кваліфікаційна робота

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Виконав:

студент VI курсу 617 групи

Ходан Ірина Данилівна

Керівник:

кандидат географічних наук,

доцент **Николаєв А. М.**

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри

Протокол № 22 від „25” „11” 2024 р.

Зав. кафедрою _____ проф. Косташук І.І.

Чернівці - 2024

Ходан Ірина Данилівна

Здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

галузі знань 10 – Природничі науки, спеціальності 103 – Науки про Землю,

ОПП «Гідрологія» кафедри географії України та регіоналістики

Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича,

м. Чернівці, Україна

Клімат міста Чернівці, тенденції його сучасних змін

Анотація. Проаналізовано науково-методичні основи досліджень клімату урбанізованих територій як техногенних модифікацій кліматів відповідних кліматичних зон. Розглянуто сутність понять клімат міста, острів тепла, вивчено чинники і процеси їх формування. Розглянуто особливості змін клімату міст, які знаходяться у різних природно-кліматичних зонах. Розглянуто питання моніторингу кліматичних умов урбанізованої території.

Охарактеризовані антропогенні зміни термічного режиму і режиму зволоження території міста Чернівці. Встановлено просторові відмінності розподілу по території міста кількості атмосферних опадів. Встановлені тенденції змін основних характеристик клімату Чернівців і зроблена їх кількісна оцінка.

Ключові слова: Урбанізована територія; клімат; температура повітря; атмосферні опади; «острів тепла».

Khodan Iryna Danylivna

Recipient of the second (master's) level of higher education

field of knowledge 10 – Natural Sciences, specialty 103 – Earth Sciences, OPP

"Hydrology" of the Department of Geography of Ukraine and Regional Studies of

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

city Chernivtsi, Ukraine

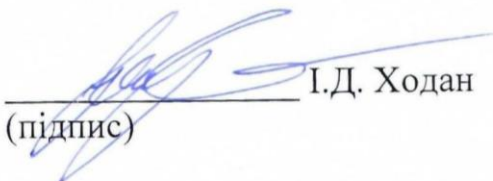
The climate of the city of Chernivtsi, the trends of its modern changes

Abstract. The scientific and methodological foundations of research into the climate of urbanized territories as technogenic modifications of the climates of the corresponding climatic zones are analyzed. The essence of the concepts of city climate, heat island is considered, the factors and processes of their formation are studied. The peculiarities of climate changes in cities located in different natural and climatic zones are considered. The issue of monitoring the climatic conditions of the urbanized territory is considered.

Anthropogenic changes in the thermal regime and humidification regime of the territory of the city of Chernivtsi are characterized. Spatial differences in the distribution of the amount of precipitation over the territory of the city are established. Trends in changes in the main climate characteristics of Chernivtsi have been established and their quantitative assessment has been made.

Keywords: Urbanized area; climate; air temperature; precipitation; "heat island".

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



(підпис) І.Д. Ходан

Перелік умовних скорочень

ABL – атмосферний прикордонний шар;
SL – поверхневий шар;
FA – вільна атмосфера;
EZ – зона захоплення;
ML – змішаний шар;
NBL – нічний прикордонний шар;
RL – залишковий шар;
UBL – міський прикордонний шар;
LCZ – локальна кліматична зона;
UHI – міський тепловий острів;
SUHI - поверхневий міський тепловий острів.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	5
Вступ.....	7
1. Клімат міста.....	10
1.1. Міська активна поверхня.....	10
1.2. Ієрархія міських активних одиниць.....	11
1.3. Класифікація міських поверхонь.....	14
1.4. Кліматопои.....	16
1.5. Вплив міста на елементи клімату.....	18
1.5.1. Процеси утворення «острова тепла».....	20
1.5.2. Вплив міста на атмосферні опади.....	23
1.5.3. Зміни швидкості і напрямку вітру.....	24
1.6. Міські клімати у різних географічних зонах.....	26
2. Вивчення клімату міста, розробка заходів з його оптимізації.....	29
2.1. Методика оцінки впливу урбанізації на клімат.....	29
2.2. Антропогенні і загальні зміни клімату міста.....	35
2.3. Стратегії планування заходів з покращення клімату міст.....	37
2.4. Проблемні аспекти міського клімату в різних регіонах.....	45
2.5. Переваги від вирішення проблем клімату міста.....	51
3. Вплив урбанізації на вплив м.Чернівці і тенденції його сучасних змін.....	54
3.1. Методика оцінки впливу урбанізації на клімат міста та встановлення тенденцій його змін.....	54
3.2. Зміни клімату Чернівців під впливом урбанізації.....	57
3.3. Сучасні тенденції змін клімату міста.....	68
Висновки.....	76
Література.....	78

Вступ

Населення Землі постійно збільшується, за останні 200 років воно зросло у 8 разів – з 1 у 1800 до понад 8млрд. у 2023 році. За той же період частка населення, яка проживала у містах, зросла з 3% до понад 56% (ООН, 2023).

Міста, навіть мегаполіси, з метеорологічної точки зору, є невеликими, у порівняння як з крупно масштабними об'єктами (океани і континенти, гірські системи, повітряні маси), так і з локальними системами (прибережні території моря – гірські і долинні особливості рельєфу). Однак урбанізовані території, особливо з високим рівнем техногенного навантаження, значно змінюють властивості атмосфери. Місто суттєво змінює всі метеорологічні елементи, впливає на місцеву погоду, на його території формується міський клімат, що є антропогенною модифікацією клімату природної зони, в якій воно знаходиться.

Міський клімат є яскравим прикладом ненавмисних кліматичних змін – ненавмисного впливу діяльності людини на атмосферу. Міста сприяють змінам клімату та складу атмосфери в локальному, та навіть в регіональному масштабах. У свою чергу атмосфера впливає на інфраструктуру, здоров'я та безпеку в містах, оскільки там намагаються впоратися з екстремальними явищами, такими як шторми, повені, посухи, тощо. Правильне розуміння, опис і моделювання цих взаємодій необхідні для забезпечення розумної мінімізації небажаних і максимізації корисних аспектів. Зрештою це сприяє накопиченню наукових даних, необхідних для проектування, управління, експлуатації безпечніших, здоровіших і стійкіших міст.

Метеорологічні спостереження в Чернівцях були розпочаті в січні 1846, регулярні спостереження за станом погоди – в жовті 1852 року. Протягом наступних 172 років вони продовжувались, результати аналізувались і узагальнювались. Перші характеристики клімату Чернівців були зроблені Тітусом фон Альтом (Titus Von Alth), опубліковані в дослідженні «Zum

Klimatologie von Chernowitz», 1875 і Адальбертом Вашловскі (Adalbert Wachlowski) в роботі «Zum Klimatologie von Chernowitz», 1886 року. Узагальнені за 1881-1915 роки результати спостережень в місті наведені у метеорологічному щорічнику «Buletinul Lunar al observatiunilor Meteorologice din Romania» за 1927 рік. Результати спостережень за наступні роки опубліковані у «Довідниках з клімату» 1966-1969 років, період 1961-1990 років характеризується даними, наведеними в «Кліматичному кадастрі України», 2006р. Характеристика клімату Чернівців за результатами спостережень у 1945-1990 роках зроблена В.С.Антоновим у дослідженні «Клімат Чернівців», 1999р.

Протягом першого, досить тривалого періоду, основною метою досліджень було вивчення особливостей і кількісна характеристика клімату міста Чернівці, що знаходиться в межах зони помірного клімату. Результати досліджень вважались репрезентативними як для території Чернівецької області, так і всієї Північної Буковини.

Починаючи з 90-х років ХХ століття актуальним аспектом кліматологічних досліджень стало вивчення тенденцій і проявів сучасних змін клімату. Дослідниками вивчались як зміни глобального клімату, так і кліматів окремих регіонів, зокрема – території України. У ряді праць О.Киналь (2011), А.Николаєв (2014), Холявчук (2022) досліджувались зміни клімату Чернівців.

Аналіз напрямків досліджень клімату Чернівців, навіть дуже неповний, показує, що у жодному разі не було зроблено спроби оцінки впливу урбанізації на клімат міста. Наразі немає впевненої відповіді на запитання, чи сформувався в Чернівцях власне міський клімат і як він відрізняється від так званого «фонового». Вирішення цього питання і, особливо – кількісна оцінка антропогенних змін клімату міста є непростим завданням, розв'язання якого потребує проведення спеціальних досліджень.

Метою роботи є спроба кількісної оцінки антропогенних змін клімату Чернівців, встановлення їх сучасних тенденцій.

Об'єктом дослідження є місто Чернівці, **предметом** – антропогенно змінений клімат його урбанізованої території.

Досягнення сформульованої мети потребувало вирішення наступних **науково-практичних завдань**:

- ознайомлення з ходом процесу урбанізації, її впливом на довкілля;
- ознайомлення з теоретичними положеннями про формування клімату міста;
- ознайомлення з сучасними підходами до вивчення клімату міст, методиками досліджень його антропогенних змін;
- розробка методики оцінки антропогенних змін клімату Чернівців і встановлення їх сучасних тенденцій;
- оцінка антропогенних змін температур повітря і кількості атмосферних опадів у Чернівцях;
- встановлення тенденцій змін клімату Чернівців під впливом глобального потепління.

При проведенні досліджень були використані: генетичний підхід, **методи** порівняння, літературно-описовий, обробки результатів метеорологічних спостережень з використанням елементів математичної статистики.

Інформаційною базою роботи є літературні джерела, результати спостережень на метеорологічних станціях Чернівці-Університет і Чернівці-Аеропорт.

Практичне значення роботи полягає у висвітленні проблематики кліматології урбанізованих територій, розробки методик дослідження клімату міста. Результати дослідження можуть бути використані при розробці заходів з адаптації інфраструктури м.Чернівці до наслідків сучасних кліматичних змін.

1. Клімат міста

1.1 Міська активна поверхня

Визначення активної поверхні є важливим першим кроком для вивчення клімату прикордонного шару будь-якого середовища. Точний характер земної поверхні в певному місці контролює велику частину характеристик прикордонного шару. Він робить це завдяки своїй ролі в поглинанні, відображенні та випромінюванні випромінювання; перетворення енергії та маси (наприклад, промениста енергія в теплову енергію, рідка вода у водяну пару); перехоплення опадів і забруднювачів повітря; і відхилення повітряного потоку та уповільнення вітру. Як наслідок, поверхня суші контролює обмін енергією, масою та імпульсом, і зазвичай вона відчуває найбільш екстремальний клімат (тобто там, де найспекотніше чи найхолодніше, найсухіше чи найвологіше, де потік зупиняється). Біля поверхні також існує найбільша мінливість мікроклімату (тобто найбільший діапазон значень від місця до місця та від дня до ночі) [22; 26; 28; 34; 38].

Розумний вибір визначення міської поверхні залежить від залученої організації, доступної системи зондування, необхідної точності та масштабу інтересу. Складність масштабу стає очевидною, якщо ми розглянемо, скажімо, проблеми, пов'язані з вимірюванням або обчисленням температури кожної з «поверхонь» [22; 26; 28; 34; 38].

Властивості міської поверхні. Міська система складається з майже безмежної кількості кліматично активних поверхонь. Вони складаються з ряду тканин, кожна з яких має різні кліматичні властивості, зокрема такі:

- випромінювання – геометрія, поглинання, відбивання, пропускання, випромінювання;
- теплоємність – теплоємність, теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, теплопровідність;
- волога – здатність до перехоплення та зберігання, проникність, характеристики продохів, хімічна природа;
- аеродинамічні – шорсткість, зміщення нульової площини, пористість.

Ці поверхні також впорядковані в характерні структурні конфігурації: розміри, форми та співвідношення відносно оточуючих їх поверхонь. Знання цих активних поверхонь має фундаментальне значення для розуміння міського клімату, тому необхідно скласти карту розподілу тих, які мають кліматично значущі фізичні характеристики. У цій книзі є приклади, включаючи розподіл альbedo поверхні, шорсткість поверхні, антропогенне виділення тепла, теплові характеристики та наявність поверхневих вод.

Ці мозаїки активних поверхонь створюють такий же великий спектр мікроклімату. Наприклад, у погожий літній день в околицях однієї ділянки будинку співіснують надзвичайно різноманітні атмосферні умови. Нерідко можна зустріти сонячні ділянки даху з температурою поверхні понад 50°C, тоді як сусідня затінена стіна або рослини в саду на 30 градусів холодніші; над відкритою галявиною може бути провітрено, але за рогом будинку повітря майже нерухоме. Крім того, хоча більша частина газону волога, під нависаючим дахом і під кронами дерев ґрунт посушливий. Найулюбленіше місце для сніданку на свіжому повітрі навряд чи буде таким самим, як місце для дрімоти після обіду чи відпочинку на вечірньому повітрі. Подібним чином кожна вулиця, квартал і квартал у межах міського району мають своє унікальне поєднання активних поверхонь, які сприяють відмінному клімату в такому масштабі. У результаті міський клімат на рівні пішоходів часто описують як «набір мікрокліматів» [22; 26; 28; 34; 38].

1.2 Ієрархія міських одиниць

Масив активних поверхонь і пов'язаних із ними мікрокліматів у містах спочатку вражає своєю складністю та тим фактом, що просторова мінливість поширюється на відстані від кількох метрів (стіна чи двір) до десятків кілометрів (цілі міста). Отже, питання масштабу є центральним для інтелектуального проектування вимірювань, моделювання та прикладних схем у міській кліматології [22; 26; 28; 34; 38].

У першому наближенні інтегрований клімат міста є сумою повторюваних комбінацій матеріалів і розташування активних поверхонь у те, що ми можемо назвати міськими одиницями.

Міські грані та елементи. Міський елемент (також званий «елемент шорсткості» в контексті повітряного потоку) розглядається як основна тривимірна одиниця, повторення цього в місті створює ефекти міського клімату. Міськими елементами можуть бути будівлі, дерева та будівельні ділянки. Вони складаються з менших одиниць, які ми називаємо гранями (наприклад, дахами, стінами, газонами та доріжками), які часто відрізняються за напрямком (напрямок компаса, вертикальний, похилий або горизонтальний). Детальний розгляд кліматичних впливів будівельної архітектури є частиною суміжної галузі будівельної кліматології. Геометричне розміщення елемента, а також його шорсткість, радіаційні, теплові властивості та властивості вологості представляють інтерес, оскільки кожен створює свій власний мікроклімат і впливає на оточення шляхом створення турбулентних вихорів і слідів, термічних або забруднювальних шлейфів, а також просторових моделей температури та опади на землі через вплив тіні та вітру. Будівлі, будучи по суті порожнистими, охоплюють кліматичний простір, призначений для підтримки комфорту людини в умовах ряду зовнішніх кліматичних умов. Будівлі є основним напрямком прикладних досліджень теплового комфорту, енергозбереження, розподілених систем відновлюваної енергії (наприклад, фотоелектричних і вітрових) і забруднення повітря в приміщеннях. Дерева також створюють власний мікроклімат і роблять значний внесок в естетичне, акустичне, гідрологічне та екологічне середовище міст. У частинах світу, де дерева є частиною природної рослинності, у міру просування від периферії до центру міста щільність забудови зазвичай збільшується, а дерев зменшується. У центрі в морфометрії переважають будівлі та візерунок вулиць, тоді як у міських районах з меншою щільністю вулиць, будинки та дерева сприяють більшій мірі [22; 26; 28; 34; 38].

Міський каньйон або вуличний каньйон — це структура, утворена спільним розміщенням вулиці та прилеглих до неї будівель. Найбільш чітко він проявляється в щільно забудованих центральних районах міст, але його основна форма зазвичай повторюється в міському ландшафті. Найхарактернішою рисою є його геометрична форма. Каньйони описуються їхнім двовимірним поперечним перерізом, який називається безрозмірним співвідношенням H/W , де H — висота будівель, що прилягають до вулиці, а W — їх ширина. H/W відомий як аспектний коефіцієнт каньйону (λ_s), він важливий, оскільки він має відношення до багатьох особливостей міського клімату, включаючи доступ радіації, тінь і захоплення, вплив вітру, тепловий комфорт і розсіювання забруднюючих речовин від транспортних засобів. Якщо дороги не є основною ознакою поселення, ця одиниця описує висоту та відстань домінуючих елементів.

Міський квартал. Міська квартальна одиниця утворена мережею доріг, яка зазвичай складається з ряду суміжних вуличних каньйонів, які мають подібну структуру. Дорожня сітка створює квадратні або прямокутні блоки з будівлями по периметру та садами, внутрішніми дворами тощо; у центрі міста квартал може являти собою одну масивну будівлю. Інші моделі доріг можуть призвести до блоків у формі трикутника та півмісяця. Блоки також можуть бути неправильними, і явища блокового масштабу створюються спеціальними групами будівель, такими як торговельні центри, кластери багатоквартирних веж, інституційні будівлі та фабрики. Структура блочних одиниць також може виявлятися у відсутності забудови, як-от у парках, кладовищах, озерах тощо. Такі одиниці створюють мозаїку клімату та мають достатній розмір, щоб мати змогу генерувати локальні системи бризу (наприклад, парки) або хмари. (наприклад, фабричні комплекси). Блоковий блок не в усіх містах можна легко ідентифікувати [22; 26; 28; 34; 38].

Околиці. Мікрорайон включає зони землекористування, які використовуються в міському плануванні, такі як промислові, житлові,

комерційні, великі паркові та незабудовані землі. Ці зони часто поділяються за певним критерієм, наприклад, на важку та легку промисловість або житлові райони з низькою та високою щільністю. Насправді опис відповідно до землекористування не дуже значущий з точки зору клімату.

Місто. Саме місто утворює набір структур і матеріалів, які контрастують із структурами його сільських околиць; це породжує різні кліматичні явища, такі як «міський острів тепла» та «шлейф міського забруднювача», обидва з яких кристалізують ідею міського клімату. Міста, які розростаються, можуть мати розмиті межі, через які важко визначити, де закінчується міська зона і починається сільська місцевість. Дійсно, інтенсивність управління для сільського господарства та розміри та кліматичні властивості особливостей, які створюють міський ландшафт. Існує чотири класи властивостей міської поверхні: тканина (матеріали), поверхнєве покриття, міська структура та міський метаболізм. Щоб належним чином вивчати та моделювати міський клімат, а також порівнювати клімати в різних місцях і містах, нам потрібно описати та кількісно визначити ці властивості. Матеріали, які використовуються для будівництва міст, надзвичайно різноманітні (наприклад, бетон, асфальт, камінь, цегла, дерево, метал, скло, плитка), а також природні матеріали (наприклад, ґрунт, рослинність, вода) все ще присутні. Кожен матеріал має своє власне відмінне поєднання радіаційних, шорстких, теплових і вологих властивостей, тому кліматична поведінка міської поверхні, яка складається з різноманітних матеріалів у різних пропорціях, є унікальною. У мікрмасштабі ці відмінності слід розуміти та враховувати, але в масштабі мікрорайону та міста прийнятно, навіть зазвичай необхідно, усереднювати або використовувати масові властивості [22; 26; 28; 34; 38].

1.3 Класифікація міських поверхонь

Чотири кліматично значущі елементи контролю міського клімату (матеріали, ґрунтовий покрив, структура та метаболізм) мають тенденцію

групуватися разом у місті. Наприклад, ядро багатьох міст має відносно високі будівлі, щільно розташовані разом, земля здебільшого вкрита будівлями або вимощена матеріалами, які є водонепроникними, зазвичай сухими та добре накопичують тепло, а концентрація людської діяльності призводить до великих викидів тепла, можливо викиди вологи та забруднювачів повітря з печей, кондиціонерів та транспортних засобів. На іншому кінці спектру міської забудови розташовані райони з низькою щільністю житлової забудови, одно- або двоповерховими будинками відносно легкої конструкції, оточені значними садами, сільськогосподарськими та відкритими площами з відносно низьким викидом тепла, але, можливо, великими ін'єкціями тепла. води шляхом зрошення. Просторова відповідність між тканиною, ґрунтовим покривом, структурою та метаболізмом означає, що різні кліматичні зміни можуть бути пов'язані з типами міського ландшафту [22; 26; 28; 34; 38].

Схема місцевих кліматичних зон. Така кластеризація лежить в основі поняття локальних кліматичних зон. Відомо, що критерії, на яких базується класифікація, впливають на аспекти мікро- та місцевого клімату (вітер, температура та вологість). LCZ об'єднані в кластери за їхньою приблизною здатністю змінювати місцевий поверхневий клімат через їх типову тканину, ґрунтовий покрив, структуру та метаболізм. Класифікація охоплює як збудовані, так і природні екосистеми. Більшість міст у всьому світі включають кілька побудованих LCZ або їх варіанти, залежно від їх культурного та економічного характеру. Класифікація може бути реалізована за допомогою об'єктивних критеріїв, які легко отримати з аерофотознімків, методів дистанційного зондування та карт, включаючи прямі вимірювання структури, наприклад співвідношення сторін каньйону (H/W), яке, як відомо, є критичним контролем режимів течії, сонячної затінення та величина теплового острова, а також міра поверхневої проникності, яка тісно пов'язана з наявністю вологи на поверхні. Ця схема більше підходить для міських кліматичних досліджень і проектів, ніж класи

землекористування, які призначені для вираження міської функції, а не фізичних властивостей ділянки, які контролюють його кліматичні реакції. Наприклад, «житловий» клас землекористування може включати широкий діапазон міських форм: житло в центрі міста з щільним розміщенням (можливо, рядове житло) і невеликими садами, або високі багатоквартирні будинки чи малозаселені будинки з ізольованими будівлями на відносно великі рослинні ділянки. Очевидно, що кліматичні наслідки цих трьох зразкових «житлових» районів, ймовірно, будуть дуже різними, враховуючи їхню контрастну структуру, ґрунтовий покрив, структуру та метаболізм. LCZ, ймовірно, будуть більш значущими способами класифікації міських округів у локальному (мікрорайонному) масштабі для цілей міського клімату. Схему було протестовано на основі результатів термічного клімату, отриманих зі спостережень у реальних містах та змодельованих за допомогою числових моделей (Stewart та ін., 2014) [22; 26; 28; 34; 38].

1.4 Кліматопи

Існує альтернативний метод класифікації та картографування міського (і сільського) мікроклімату на основі географічно узгоджених територій, які демонструють приблизно однакові мікрокліматичні характеристики. Його просторові одиниці називаються кліматопами, які описують області зі схожими властивостями приземної атмосфери. На відміну від LCZ, вони явно не описують поверхню, яка їх характеризує. Кліматопи визначаються аспектами приземного клімату, які мають відношення до планування місця та зазвичай відповідають чітким географічним особливостям, таким як системи долин, які генерують потоки холодного повітря. Їх мета полягає в тому, щоб дозволити міським планувальникам проектувати міста, які найкращим чином використовують послуги атмосферних екосистем, і визначати території, які можуть погіршити приземний клімат, перешкоджаючи потокам повітря, які забезпечують природну вентиляцію. Вхідна інформація для карти кліматопасу надходить у формі «шарів»

просторових даних, що стосуються атмосферних властивостей (потік повітря, температури), міської форми (структура, покрив) і географії конкретного місця (топографія, населення, землекористування). Карти створюються експертами, які володіють вимірними та змодельованими кліматичними елементами; отже, вони унікальні для конкретного місця [13; 18; 34; 38].

Міська територія вважається «однорідною» щодо певної властивості поверхні, якщо просторова варіація цієї характеристики знаходиться в межах деякого статистичного критерію. Однорідність залежить від масштабу, у якому визначається властивість, і від розміру області, у якій вона досліджується та застосовується. У випадку невиконання критерію неоднорідності, площа чи масштаб вважаються неоднорідними. Зазвичай найменшою міською одиницею, де можна знайти однорідність, є міський квартал, а найбільшою одиницею, де можлива однорідність, є, ймовірно, мікрорайон.

Просторово щось однорідне в одному масштабі довжини може бути неоднорідним в іншому. На малих горизонтальних масштабах (<50 м) міські поверхні дуже неоднорідні, але на більших масштабах (>близько 250 м) ви бачите, що усереднення робить ту саму поверхню майже однорідною. Отже, масштаб «сусідства» зазвичай є відносно однорідним, що концептуально виправдовує наше ставлення до міської поверхні в цьому масштабі як до одновимірної. Це прийнятно, тому що зміни у властивостях поверхні та атмосфери у вертикальному напрямку сильніші, ніж у будь-якому горизонтальному напрямку. З іншого боку, при дослідженні клімату в роздільній здатності окремої будівлі, міського кварталу або цілого міста необхідно розглядати проблему як тривимірну, неоднорідність поверхні в усіх напрямках є актуальною, тобто є поверхнева неоднорідність за шкалою дослідження [13; 18; 34; 38].

1.5 Вплив міста на елементи клімату

Міста, навіть мегаполіси, можна розглядати з метеорологічної точки зору як невеликі об'єкти в порівнянні як з великомасштабними, що впливають на погоду і клімат (океани і континенти, гірські хребти, антициклони і циклони), так і з локальними системами (прибережні території з морем). Сухопутні системи, ліси, гірські та долинні особливості тощо). Однак їхня велика модифікація поверхневих і атмосферних характеристик у локальних масштабах означає, що міста змінюють майже всі атмосферні змінні в їх околицях. Таким чином, міста суттєво впливають на місцеву погоду, особливо змінюючи та здебільшого посилюючи небезпечні погодні явища. Це міський клімат [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

Спостереження за міським кліматом почалися в дев'ятнадцятому столітті в Лондоні, і в літературі є навіть докази УНІ в Парижі. Кілька відмінних особливостей характеризують міський клімат:

- вищі температури: температура повітря в містах, особливо вночі та в антициклоніальних умовах, може бути набагато вищою, ніж у сільській місцевості, іноді на 10°C у великих містах. Ці високі температури відомі як УНІ. Це тепло поширюється вгору в атмосферний шар, як правило, на глибину 1 км, і переноситься вітром. Поверхневі температури також зазвичай вищі порівняно з неміським оточенням, за винятком міст із пустельним кліматом. Високі температури на поверхні створюють впізнаваний SUNI, який помітно відрізняється від температури повітря біля поверхні, особливо вдень;

- змінені вітри: в умовах помірного або сильного вітру аеродинамічно нерівна міська поверхня сповільнює вітер і трохи повертає його в напрямку градієнта тиску. Це також може призвести до зон конвергенції та виникнення розбіжності, що призводить до вертикального руху. За умов слабого вітру УНІ створює потік повітря в місто з сільської місцевості в системі міської циркуляції, схожій на

морський/сухопутний бриз; це також може призвести до рециркуляції забруднюючих речовин, а висхідний рух повітря над містом, який є частиною цієї циркуляції, сприяє модифікованому міському режимом хмарності та опадів;

□ хмари та опади, модифіковані міськими умовами, над містом і під вітром: змінені потоки вітру та циркуляції, спричинені міськими умовами (див. вище), викликають висхідні області над містами, що може збільшити міський хмарний покрив та опади, особливо пов'язані з літніми конвективними опадами. Міста також можуть або розділяти наближаючі грози навколо міста на дві частини (коли синоптичний потік достатньо сильний), або можуть ініціювати грози вище та нижче за течією. Конвергенція потоку та (трохи) вищий прикордонний шар у містах також можуть утворювати купчасті хмари за гарної погоди та призводити до збільшення хмарного покриву влітку над великими агломераціями, такими як Париж, Лондон [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

Міський клімат також опосередковано впливає на якість повітря (що пов'язано насамперед з викидами забруднюючих речовин), враховуючи іншу вертикальну температурну структуру атмосфери в перших 0,1–1,0 км над поверхнею Землі та змінені горизонтальні вітрові циркуляції. Це може створити проблеми з вентиляцією, що призведе до накопичення теплого повітря та поганої якості повітря, особливо в густонаселених міських районах. Наприклад, покращення вентиляції в китайських мегаполісах зараз є пріоритетом як для зниження УНІ, так і для покращення якості повітря [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

Зміни характеристик поверхні в містах також важливі для міського клімату в контексті масштабних кліматичних змін. Непроникність міських поверхонь посилює вплив опадів, таких як повені, а також призводить до підвищення температури поверхні, що збільшує теплове навантаження на міських жителів. Таким чином, зміни поверхні, які допомагають створити

місцевий міський клімат, також важливі для того, щоб зробити міста менш вразливими до впливу зміни клімату [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

1.5.1 Процеси утворення міського «острова тепла»

Міста — це дуже складні системи. Це ускладнює виявлення причин міського клімату для нефахівця, навіть для вчених у відносно тісно пов'язаних галузях або в галузі міського планування. Це справді призводить до багатьох неправильних уявлень про причини міського клімату і, отже, робить складними або неефективними стратегії адаптації для пом'якшення УНІ. Однак наукові причини, що стоять за УНІ, тепер добре визначені міською кліматичною спільнотою.

УНІ – це метеорологічне явище зі швидкою мінливістю, яке значною мірою залежить від добового циклу сонячної радіації, який змінюється день у день. Виникає в результаті терморадіаційних і енергетичних процесів. УНІ виникає головним чином через штучну поверхню. Протягом дня майже половина тепла, що надходить від сонця, накопичується в матеріалах міської тканини (цегла, камінь, бетон, дороги, плитка тощо). Складна тривимірна (3D) форма міста також сприяє такому сховищу, де більше поверхонь контактує з атмосферою, і обмежує втрату енергії через випромінювання вгору. Переважно сухі, непроникні поверхні в містах призводять до вищих поверхневих температур із великими варіаціями температури, що контролюються радіаційними, тепловими, аеродинамічними та вологими властивостями поверхні. Порівняно з сільською місцевістю вдень міська поверхня тепліша, з чітким SUHI. Міські та сільські відмінності в евапотранспірації та ефективності конвекції є основними детермінантами підвищення температури поверхні в містах, старіші джерела, Oke et al, надати різницю альbedo між містом і селом у діапазоні від -0,09 до. Для більшості міст різниця в альbedo між містом і сільською місцевістю

невелика. Від численних $+0,03$ із запропонованим загальним значенням $-0,05$. Чутливість міських температур до альбедо є вищою протягом дня, але відносно альбедо між містом і селом не таке велике. Хоча альбедо окремих поверхонь часто може досягати $0,30$ або вище, наприклад, для світлих стін, відбита енергія перехоплюється іншими міськими поверхнями (радіаційне захоплення), що обмежує енергію, відбиту в небо, а отже, і загальне міське альбедо. Таким чином, існує низька різниця в денній чистій радіації між міськими та сільськими ділянками. Оскільки чисте випромінювання є подібним, це пояснює більшу роль у формуванні UHI процесів, які змінюють спосіб його споживання: більше зберігання та набагато менше випаровування [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

У денний час інтенсивність UHI загалом набагато менша, ніж SUHI, через схожу структуру атмосфери на низьких рівнях (на висоту 1 км) і сильне перемішування повітря через турбулентність. Можна навіть спостерігати прохолодні острови, як правило, вранці, коли відбувається більш швидке, ніж міста, нагрівання поверхні сільської місцевості. Будівництво тіней у густонаселених частинах міст також може створювати локалізовані прохолодні зони вдень з точки зору температури повітря та поверхні, але тепло, що зберігається в будівельних матеріалах, зробить ці області найтеплішими вночі.

Вночі накопичене тепло виділяється в атмосферу, обмежуючи охолодження повітря. Ось чому в містах може бути набагато тепліше, ніж у навколишніх сільських районах, особливо після заходу сонця й до середини ночі, навіть іноді всю ніч. Наявність водопроникних ґрунтів і рослинності обмежує цей ефект через випаровування ґрунтової води та транспірацію рослин, а також ефект затінення та пом'якшення вхідного випромінювання листям дерев протягом дня. Для того самого населення міста нічний UHI загалом менший у тропічних районах, ніж у помірному кліматі. Температури поверхонь у містах також залишаються вищими вночі, при цьому SUHI подібний до UHI, хоча з більшою мінливістю поверхневих

температур, що визначається специфічними властивостями окремих поверхонь [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

Діяльність людини також незначно впливає на УНІ шляхом прямого виділення тепла в атмосферу (основними джерелами є побутове опалення та кондиціонування повітря, а також виділення тепла транспортом у меншій мірі). Для переважної більшості міст і метеорологічних умов це не основний механізм створення УНІ. Наприклад, кондиціонування повітря може підвищити температуру в містах максимум на 1–2°C у Парижі в ночі хвиль спеки (що становить ~10–20% від максимальної інтенсивності УНІ); аналогічне збільшення було змодельовано для Фенікса і Гонконгу. Побутове опалення також може призвести до великого викиду енергії в атмосферу. Це може дорівнювати вхідній сонячній радіації протягом 24-годинного періоду для середньоширотного океанічного клімату. У холодному та помірному континентальному кліматі домашнє опалення зазвичай велике взимку [як у Лодзі, Польща], але напрочуд слабе для міст з ефективною ізоляцією та наявністю снігу на дахах, наприклад у Монреалі, Канада). У деяких конкретних випадках, наприклад у полярних містах взимку, опалення будинку може стати найважливішим процесом.

Навіть якщо метеорологічні ситуації, що сприяють сильним УНІ, часто пов'язані з епізодами забруднення атмосфери, атмосферні забруднювачі істотно не змінюють температуру повітря над містами. Лише в дуже забруднених мегаполісах, таких як Делі, дуже високий рівень міського аерозольного забруднення може трохи модулювати міську погоду: у цьому випадку обмеження сонячної радіації, що досягає поверхні (яка розсіюється та поглинається в нижній частині атмосфери) натомість) може сприяти створенню прохолодного острова протягом дня [14; 16; 20; 21; 25; 27; 28; 30; 42; 47; 50].

1.5.2 Вплив міста на атмосферні опади

Хоча відносна вологість може бути нижчою в міській атмосфері, через вищу температуру абсолютна вологість може бути вищою, особливо вночі.

«Ефект міської вологості (UME)» у міському пологовому шарі може бути наслідком зменшення роси, антропогенної пари та застою повітряного потоку [12; 17; 19; 23; 24; 44].

Дослідження роси в міському середовищі залишаються обмеженими (Richards, 2004). Хоча видимість іноді може бути нижчою в містах, густий туман рідше зустрічається в містах (Landsberg, 1981).

У деяких ситуаціях міський хмарний покрив може бути на 10% вищим, а також кількість опадів (переважно конвективний літній дощ, що випадає на підвітряній стороні міст.

Лоурі (1998) надає всебічний огляд міського впливу на опади, особливо посилені конвективні опади на підвітряній стороні міст враховуються через підвищену нерівність міської поверхні та ядра конденсації, а також вищу температуру повітря. Подальша робота була зосереджена на інтенсифікації конвективних опадів. Вплив міських ядер конденсації на посилення опадів також заперечується; Базуючись на супутникових даних, Розенфельд (2000) надає докази того, що міське та промислове забруднення пригнічує опади через пригнічення злиття крапель хмари.

У Shepherd (2005) можна знайти синтез цієї теми та довгий список посилань, починаючи з 1990-х років. Автор також зазначає, що подальшого моніторингу землекористування, твердих часток, мікрофізики хмар і опадів (за допомогою радарів) все ще бракує для розробки моделювання в різних просторових масштабах, перевірки моделювання та повного розуміння явища.

За словами Оке (1987), існують «суперечливі дані щодо впливу

снігопаду». Насправді в Берліні, Парижі, Лунді, серед іншого, є докази того, що кількість снігопадів у містах на 30% нижча, ніж у прилеглих сільських районах (Landsberg, 1981).

Це можна пояснити тим, що УНІ може бути достатньо, щоб розплавити пластівці над містом (Оке, 1987) [12; 17; 19; 23; 24; 44].

1.5.3 Зміни швидкості і напрямку вітру

Міські райони сприяють зниженню середньої горизонтальної швидкості вітру, оскільки опір, спричинений міськими елементами, затримує рух поблизу землі. Степеневий закон шару Екмана добре підходить для профілю вітру (Davenport, 1965), де U — швидкість вітру (мс-1) на висоті z (м), U_G — геострофічний вітер (мс-1) і Z_G (м) – висота, на якій виникає геострофічний незбурений потік. Показник α наведено Девенпортом для рівнинних територій (0,16), приміських територій (0,28) і міського ядра (0,40). Профілі вітру показують, що висота, на якій зустрічається геострофічний потік, збільшується в міському ядрі, де нерівність більша (Оке, 1987). За Давенпортом (1965), для нейтральних умов середня Z_G досягає 270 м над сільською місцевістю, 390 м над передмістями та 420 м над міським ядром.

«При слабкому вітрі Z_G також залежить від кількості теплової конвекції, створеної на поверхні» (Оке, 1987) [12; 19].

Однак у турбулентному поверхневому шарі (Оке, 1987), створеному шорсткістю поверхні та конвекцією, за нейтральної стабільності, де $U(z)$ є середньою швидкістю вітру (мс-1) на висоті z (м), U^* швидкість тертя, k постійна фон Кармана ($\sim 0,4$) і Z_0 довжина шорсткості (м). $U^{*2} = \tau/\rho$, де τ – напруга зсуву, а ρ – густина повітря.

Z_0 — міра аеродинамічної шорсткості поверхні, пов'язана з висотою елементів шорсткості. Оке (1987) визначає це як «висоту, на якій профіль нейтрального вітру екстраполюється до нульової швидкості вітру».

Z_0 також можна розрахувати для твердих перешкод, дотримуючись рівняння Леттау (1969), де h — середня висота перешкод, s - середня площа, відкрита вітру, а S — питома площа землі перешкоди. У випадку кількох перешкод (кількість n) у зоні A , тоді $s=A/n$. Для покритих рослинністю поверхонь Z_0 можна визначити розрахунковим способом. (Wilmer, 1997): де h_0 — середня висота рослин. Кондо та Яматава (1986) пропонують додатковий підхід для рослинних поверхонь, де Z_0 становить 12,5 % від середньої висоти рослинної поверхні [12; 19].

Оновлення повітря в міській місцевості залежить від потоку повітря, який, у свою чергу, регулюється міською. Однак міська тканина також породжує вихори між будівлями та навколо них (Oke, 1987), вільні простори направляють вітер і створюються захищені зони (переважно на вузьких вулицях, розташованих під прямим кутом до середнього потоку, Wilmer, 1997). Grimmond and Oke (1999) наводять загальний огляд змін у режимах течії, відповідно до співвідношення між Z_0 і Z_d (переміщення нульової площини, Rotach, 1994ii) і дають рекомендації щодо методів оцінки Z_0 і Z_d через аналіз форми поверхні та просторовий розподіл елементів шорсткості. Лопес та ін. (2011) наводять приклад із посиланням на Лісабон []. З іншого боку, у спокійні та ясні ситуації, коли виникає УНІ, між сільською та міською місцевістю виникає потік прохолоднішого (і чистішого) повітря: це називається сільським бризом (Barlag and Kuttler, 1990/91) або циркуляція міського теплового острова (Holmer and Eliasson, 1999). У ці дні швидкість вітру в місті може бути дещо вищою, ніж у прилеглій сільській місцевості.

Морські бризи. Що стосується вітру в місті, слід також враховувати морський бриз, оскільки інтенсивність УНІ може значно відрізнятись. У кількох приморських містах, таких як Лісабон (Alcoforado та ін., 2006, 2007), Ніцца (Carrega, 1994) та Коломбо (Emmanuel та ін., 2006), приморські райони особливо прохолодні під час морського бризу, навіть якщо в інших випадках це найтепліші місця міської місцевості [12; 19].

1.6 Міські клімати в різних географічних зонах

За останні п'ять років наукове співтовариство міського клімату почало зосереджуватися на містах, на які впливає складна місцева географія через рельєф, водойми тощо. За таких умов спричинені містом потоки тепла та води спрямовуються до нижніх шарів атмосфери взаємодіяти набагато складнішим способом з місцевими повітряними потоками, щоб створити міський клімат, характерний для міста. Оскільки кожне місто має своє унікальне поєднання клімату, географії та внутрішньої структури, неможливо представити всі конкретні випадки, з якими можна зіткнутися [12; 19; 20; 23; 32].

Очікується, що розширення прибережних міст продовжуватиметься протягом двадцять першого століття, і до 2050 року більше половини населення планети проживатиме в містах у прибережній зоні. У густонаселених прибережних містах Азії, таких як Токіо, Гонконг і Сінгапур, на міський клімат впливають як екстремальні висотні міські особливості, так і складні системи морського/сухопутного бризу. У Токіо та на рівнині Канто протягом дня додаткове тепло, що виділяється над урбанізованою територією (порівняно з сільською місцевістю), поширюється на десятки кілометрів. На підставі спостережень Yamato et al. показують, що фронт морського бризу (який вказує на проникнення морського повітря над континентом) сповільнюється за вітром від центру Токіо. Це пояснює аномалії теплих температур у другій половині дня в цьому приміському регіоні Токійської агломерації за 40 км від берегової лінії (і найгустішої урбанізації). Мацумото та ін. огляд минулих досліджень міського клімату в столичній зоні Токіо. Висотні будинки на набережній або в центрі міста також можуть перешкоджати охолоджувальному ефекту морського бризу на райони, розташовані з вітру. Це також викликає проблеми з вентиляцією. Котаркар та ін. переглянули 85 робіт про 28 міст Південної Азії. Вони показують, що в денний час морський бриз у Делі,

Мумбаї та Коломбо покращує тепловий комфорт, обмежуючи денне потепління в містах і пом'якшуючи забруднення атмосфери. Однак, хоча вдень у прибережних районах залишалося прохолодніше, ніж у центральних районах міста, вночі відбувалося навпаки. Морський бриз у Нью-Йорку знижує температуру в містах у більшості ситуацій зі спокійним синоптичним вітром, але під час хвиль спеки вітер, як правило, надходить із внутрішньої частини країни, а потім сильно зменшує цей ефект охолодження. Взаємодія між морським бризом і УНІ може навіть призвести до утворення хмар і грози. Поєднуючи спостереження з метеорологічних станцій, радарів і супутників, Vemado & Pereira Filho показують, що грози переважно розвивалися над мегаполісом Сан-Паулу після того, як фронт морського бризу досяг агломерації [12; 19; 20; 23; 32].

Гори та навіть невеликі пагорби створюють систему долинних вітрів, які сильно впливають на місцеву метеорологію: як правило, вдень дмуть долини, а вночі — дрібніший вітер, що спускається з гір. Таким чином, гірські міста піддаються впливу топографії та місцевих потоків, які можуть впливати на УНІ та його мінливість і розсіювання атмосферних забруднювачів. Використати переваги чистого та холодного дренажного потоку повітря, що надходить з гір чи пагорбів уночі, і враховуючи його проникнення всередину міста, є викликом для міських планувальників. Доступних досліджень небагато, і це може стати новою темою для досліджень міського клімату в найближчі роки. Місто Штутгарт (Німеччина) є одним із міст, де вивчався вплив пагорбів на нічний УНІ. Він розташований в улоговині, оточеній пагорбами. Це призводить до застою повітря над містом, що призводить до поганої якості повітря, а також до сильного УНІ. Протилежний ефект спостерігається поблизу високих гірських хребтів, де нічні стокові або дренажні потоки можуть пом'якшити УНІ. Largeton & Staquet показують, що потік над містом Гренобль, Франція (розташоване в басейні в регіоні Альп), під час епізодів забруднення взимку

є дуже складним з вертикальним шаруванням, що є результатом суперпозиції нижньої долини. Вітри, що ллються з різних долин, що оточують місто. Оскільки відносний вплив міста та рельєфу на УНІ не можна легко розділити, Bokwa et al., проаналізувавши дані про місто Краків, Польща, запропонував новий підхід рельєфно-модифікованого УНІ [12; 19; 20; 23; 32].

2. Вивчення клімату міста, розробка заходів з його оптимізації

2.1. Методика оцінки впливу урбанізації на клімат

Щоб вивчати міський клімат, окрім знань про фізичні, біофізичні (і, зрештою, соціально-економічні) процеси, що відбуваються, необхідно мати адекватний опис міста та його околиць. Як Массон та ін. описують необхідні параметри, які можна класифікувати як картування землекористування ґрунтового покриву, морфологічні параметри, архітектурну та будівельну інформацію, дані опису міської рослинності та соціально-економічні параметри (для деяких застосувань, таких як оцінка антропогенного теплового потоку). Однак під час збору таких даних виникає багато проблем, наприклад:

- труднощі (щодо досвіду, часу чи грошей) застосувати методологію для визначення параметрів;
- узгодженість джерел даних, збору та методів обробки від одного міста до іншого;
- глобальна доступність даних для всіх міст.

Останніми роками було досягнуто успіхів у вирішенні цих проблем двома основними способами. Перший полягає у використанні однорідних методів і класифікацій параметрів як для дослідження міського клімату, так і для застосування [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Гомогенізація опису використання міських земель. Експоненціальне зростання досліджень міського клімату означає, що часто дуже важко порівняти їх результати та дійти загальних кількісних висновків. Наприклад, важко кількісно пов'язати інтенсивність УНІ та її внутрішньоміську мінливість із міською морфологією для різних міст. Це пояснюється тим, що більшість досліджень проводяться локально. Отже, дані, які використовуються в різних містах, є дуже неоднорідними, і навіть класифікація землекористування може бути дуже різною залежно від міських даних і лабораторних минулих використання (іноді в інших

областях). Stewart & Oke висловили це занепокоєння. Вони запропонували нову універсальну класифікацію міського та позаміського землекористування/грунтового покриву, яка називається місцевими кліматичними зонами (LCZs), з акцентом на більш детальну інформацію про міську поверхню. Він включає 10 міських класів для опису цих LCZ, дійсних у масштабі мікрорайону (зазвичай від 0,1 до 1 км²). Вони здебільшого залежать від висоти забудови (високі, середньоповерхові, малоповерхові) та щільності забудови (щільні, відкриті, розріджені), а також описують специфічну міську структуру (неформальне поселення, легка промисловість, важка промисловість)). Основне наукове припущення полягає в тому, що подібні околиці мають подібний локальний вплив на УНІ та мають відносно однорідні температури порівняно з сусідніми околицями (принаймні з іншими LCZ). Це припущення було підтверджено експериментальними кампаніями з використанням метеорологічних станцій, апаратних засобів або супутникових зображень температури поверхні. LCZ були широко прийняті дослідниками, дозволяючи більше досліджень використовувати загальну класифікацію міського землекористування та грунтового покриву, а їх простота також полегшила їх використання міськими планувальниками та службовцями міської адміністрації [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Міжнародна ініціатива World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) була запущена для створення таких карт LCZ для будь-якого міста. Bechtel та ін. описують методологію створення карт LCZ з роздільною здатністю 100 м з використанням супутникових зображень. Щоб належним чином пов'язати LCZ з мікрорайонами міста, потрібен певний досвід роботи на місцевому рівні, але цей метод легко застосувати в будь-якому місті світу та нещодавно завершити з додаванням системи контролю якості. Це було зроблено для кількох міст. Ідальго та ін. порівнюють LCZ, отримані з інвентаризації та супутникових зображень для трьох французьких міст.

Класифікації, засновані на кадастрах, показують дрібніші просторові деталі всередині агломерацій та на їх межах [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Експлуатація нових джерел даних. Інтернет надає багато джерел даних різних типів для використання широким загалом, які спочатку не були призначені для наукового використання. До них входять, наприклад, дані Google Maps Street View і OpenStreetMap (OSM). Багато інформації також можна зібрати через соціальні мережі. Ці нетрадиційні дані вимагають специфічних підходів для використання та обробки. За останні два роки вчені розробили оригінальні методи використання цього нового інформаційного потенціалу.

Для обчислення міських параметрів із цих джерел даних використовуються нові технології, головним чином глибоке навчання. Автори виконують аналіз фотографій і зображень Google Street View, щоб автоматично обчислити міський параметр, пов'язаний із закриттям півкулі неба будівлями та деревами, якщо дивитися з вулиці, що називається фактором огляду неба. Це важливий параметр, який впливає як на кількість сонячного випромінювання, що надходить на вулицю вдень, так і на охолодження вулиць і будівель вночі. Чжан та ін. (X. Zhang, A. Shehata, B. Benes & D. Aliaga, рукопис подано) також використовують методи нейронної мережі для реконструкції 3D-форм будівель над великими частинами міст із супутникових зображень [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Міське кліматичне співтовариство також отримує вигоду від краудсорсингових ініціатив, таких як OSM, у рамках якого волонтери та картографічні агентства роблять внесок у глобальну карту світу. Інформація від волонтерів покращує інформацію, зокрема щодо використання будівель (наявність магазинів, ресторанів, житлових та державних будівель тощо). Olbricht і Boeing використовують OSM для покращення та завершення карт ґрунтового покриття. Kunze & Necht використовували краудсорсингову інформацію OSM, щоб визначити житлову/нежитлову площу. Використання

інвентаризації будівель не є поширеним у міському кліматичному співтоваристві, тому що воно вимагає серйозних знань у географічних інформаційних системах і, таким чином, обмежене у застосуванні до конкретних міст. Bocher та ін. адаптував такі методи з використанням інвентаризації, щоб вони були більш загальними та застосовними до даних OSM. Це відкриває шлях до глобального картографування міських характеристик для застосування в міському кліматі, але піднімає питання про змінну якість OSM у всьому світі.

Безпосереднє залучення людей через соціальні мережі та мобільні додатки все ще є зародковим у міській кліматичній спільноті, але воно є дуже перспективним і має великий потенціал для доступу до конкретної інформації, що представляє головний інтерес для аналізу міського клімату, особливо в містах і країнах, де інституційно відсутні бази даних. У рамках WUDAPT див. et al. пропонують підхід краудсорсингу для збору інформації про будівельні матеріали та функції, морфологію ландшафту та типи рослинності. Спочатку це було у формі мобільного додатку, призначеного для використання студентами. Mhedhbi та ін. адаптували цю анкету до Facebook, щоб зібрати опис будівель в агломерації Тунісу [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Прогрес у спостереженнях. Міський клімат вперше досліджували за допомогою наукових спостережень, заснованих на порівнянні між міською та сільською температурами, виміряними на метеорологічних станціях. У 1970-х роках, особливо в Канаді та Японії, експериментальні дослідження почали зосереджуватися на енергетичних процесах, що створюють УНІ, зосереджуючись не лише на описі, але й на розумінні основних процесів. Мета полягала в кількісному вимірі радіаційних і теплових процесів, включаючи випаровування, в обміні енергією на поверхні міста з атмосферою. Польові дослідження з використанням часто фіксованих веж або макетів проводилися в окремих районах кількох міст. Ці типи

експериментів набули більшого поширення після 2000 року. Барлоу і Канда представляють огляд таких експериментів для різних процесів [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Деякі міські метеорологічні мережі були розроблені для кращого розуміння дрібномасштабної структури УНІ та міського клімату в цілому. Більшість зосереджується на вимірюванні температури повітря при поверхні для кількісного визначення УНІ, але останні мережі спостережень також використовують повні метеорологічні станції, включаючи вимірювання вологості, вітру, тиску та навіть опадів. Урбанізовані території викликають проблеми з точки зору метеорологічної репрезентативності, але керівництво було надано ВМО. Ці мережі можуть охоплювати різні просторові та часові масштаби залежно від наукових цілей. Мережі, зосереджені на поясненні процесів, часто обмежуються околицями або навіть масштабами доріг, іноді доповнюючись іншими типами інфраструктури, такими як вежі для вимірювання потоку енергії. Мережі, призначені для опису мінливості УНІ в межах усього міста, як правило, є довгостроковими — від 1 року до постійних — систем. Останні розробки досліджують взаємозв'язок між мінливістю температури та міською структурою (описаною LCZ). Ці мережі використовують метеорологічні станції професійної якості. Бассет та ін. проаналізували, як вітер впливає на зону впливу УНІ на внутрішньому місті Бірмінгем, Сполучене Королівство. Такі мережі тепер також можуть бути підключені в режимі реального часу, що відкриває перспективи для виробництва та поширення нових міських кліматичних послуг. У Чикаго експериментальний міський вимірювальний проєкт з відкритим кодом «Array of Things», який використовує мережу з 200 інтерактивних модульних пристроїв, збирає дані в реальному часі про клімат, якість повітря та шум, а також підрахунок пішоходів і транспорту. Ці дані призначені для того, щоб допомогти оцінити придатність міста для життя та ширше використовувати їх у плануванні. З наукової точки зору ці мережі

також можна використовувати для перевірки підходів, заснованих на мережах краудсорсингу [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Для вимірювання УНІ з'являються краудсорсинг і пряме залучення громадян. Густонаселені міські райони багаті на спільні дані, що створює потенціал для використання цих даних для вивчення міського клімату. Датчики можуть бути встановлені для професійних цілей, наприклад, для контролю внутрішнього комфорту будівлі, або встановлюватися мешканцями. В останні кілька років персональні підключені метеостанції привернули багато зусиль вчених. Станції Netatmo — це персональні метеостанції, підключені до Інтернету. Weather Underground також використовує мережу персональних метеостанцій різного типу. Невизначеності, упередження та помилки, пов'язані з цими результатами, в основному, викликані самими датчиками та способом їх встановлення мешканцями, вимагають значної обробки та контролю якості. Однак щільність мережі є такою, що в деяких містах (наприклад, 10 000 у Паризькій агломерації) ці дані є дуже цікавими та найбільш вивченими серед дослідників міського клімату. Автори показали для Берліна (Німеччина), Лондона (Великобританія), Парижа та Тулузи (Франція), відповідно, що ці недорогі станції Netatmo можна відфільтрувати (з ~50–75% станцій, що проходять протоколи контролю якості).), щоб задовільно отримати УНІ. Феннер та ін. проаналізували мінливість температури всередині та між LCZ за допомогою станцій Netatmo. Поки що використовувалися лише дані про температуру, але de Vos et al. підтверджують, що зростаюча кількість підключених до Інтернету приватних метеостанцій може зробити можливим моніторинг кількості опадів у містах [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

Міські дані з краудсорсингу також можна отримати за допомогою непрямих вимірювань. У міському кліматичному співтоваристві дані про температуру батареї, виміряні зі смартфонів, привернули увагу. Додаткові

поправки на основі вимірювань освітленості смартфона можуть покращити якість даних. Смартфони також можуть бути оснащені датчиками для здійснення прямих вимірювань температури повітря та інших кліматичних змінних.

Для оцінки SUHI використовується дистанційне зондування. Наявність глобального широкого охоплення супутниковими датчиками, такими як MODIS, Landsat і ASTER, забезпечує багатий набір даних, що дозволяє порівнювати характеристики SUHI, пов'язані з їх біокліматичними налаштуваннями, сезоном, часом доби та іншими характеристиками. Отримані вимірювання обмежені умовами ясного неба, хоча нещодавно було проведено деякі роботи щодо SUHI, отримані за допомогою мікрохвильового дистанційного зондування, яке обмежено дуже грубою просторовою роздільною здатністю. Вони також обмежені часом проходження супутника, який може коливатися від двох разів на день (MODIS) до приблизно одного разу на 16 днів (Landsat). Нові зображення з вищою просторовою роздільною здатністю з геостаціонарних супутників або методи зменшення масштабу можуть допомогти подолати обмеження тимчасової роздільної здатності, як і методи використання методів моделювання для отримання інформації про часові ряди температур поверхні [17; 33; 35; 37; 41; 43; 49; 52; 55].

2.2. Антропогенні і загальні зміни клімату міста

Глобальна зміна клімату представляє значну регіональну мінливість кліматичних тенденцій і небезпек. Геррейро та ін. проаналізували еволюцію хвиль спеки, посухи та повеней у 571 європейському місті між 1951–2000 та 2051–2100 роками на основі RCP8.5 та 50 модельних прогонів. Вони відзначили різницю у впливах. Незважаючи на те, що хвилі спеки стають частішими для всіх міст, більший приріст відповідних максимальних температур спостерігається для міст Центральної Європи, а більше збільшення кількості днів для міст Південної Європи. Останні стикаються з

комбінованим ризиком спеки та посухи, тоді як міста Північно-Західної Європи піддаються підвищеному ризику повеней. Проведення статистичного аналізу за кліматичними аналогами є ще одним підходом, який характеризує майбутній клімат міст у порівнянні з сучасним кліматом інших існуючих міст. У глобальному масштабі Bastin et al. показали, що клімат міст північної півкулі зсувається на сотні кілометрів у бік тепліших умов, а тропічних міст — у бік більш сухих умов. У Європі морські міста зсуваються на південь повільніше, ніж континентальні та східні [12; 14; 16; 19; 29; 30].

Щодо еволюції UHI в умовах зміни клімату, дослідження досить систематично показують, що це явище не посилюється. Нічні UHI залишаються стабільними або дещо знижуються. Перші глобальні симуляції, включаючи міста, показали узагальнення цієї тенденції. Взимку зниження UHI пов'язане зі зменшенням опалення будинку внаслідок глобального потепління. Влітку це пов'язано з посиленням нагрівання сільської місцевості порівняно з міською (через властивості поверхні) у відповідь на посилене довгохвильове випромінювання. Протягом дня явище міських прохолодних островів посилюється через більш виражене висихання природних ґрунтів навколо міст через фонове потепління. Однак ці моделювання не враховують розширення міст. Чен і Фрауенфельд і Доан і Кусака виявили більш помітне підвищення температури в містах, ніж у прилеглих сільських районах (особливо вночі), враховуючи розширення міст для міст Азії. Це є результатом зміни альbedo поверхні та енергетичного балансу поверхні, а також збільшенням антропогенних виділень тепла. Для міст США Kraenhoff et al. відзначили тенденцію до потепління, але обмежену нелінійною взаємодією між двома чинниками — зміною клімату та урбанізацією — відповідно до висновків Лі та ін. Останній підкреслив переважний вплив опалення взимку та вирішальну роль опадів влітку, які контролюють доступність води та

випаровування, що сприяє температурним контрастам між містом і селом.

Ці зміни можуть суттєво вплинути на умови життя міського населення. Виникнення хвиль спеки призводить до збільшення споживання енергії для кондиціонування повітря. Робота, проведена для Паризької області, показала, що УНІ та вплив на комфорт, попит на енергію та водні ресурси розвиваються по-різному відповідно до сценаріїв розширення міст, які відображають різні політики міського планування.

Дуже мало досліджень досліджують взаємодію між розширенням міст і тенденціями кількості опадів. Недавнє дослідження Гу та ін., засноване на попередніх часових рядах спостережень за опадами в Китаї, вказує на те, що міський ефект є значним порівняно з фоновією тенденцією в регіональному масштабі. Проте Чен і Фрауенфельд не відзначили постійної тенденції майбутніх опадів, пов'язаних з урбанізацією над мегаполісами [12; 14; 16; 19; 29; 30].

2.3. Стратегії планування заходів з покращення клімату міст

Як уже згадувалося, міста викликають УНІ, який відповідно до регіонального клімату може бути дуже негативним. Міські райони збільшують нерівність поверхні, спричиняють зниження швидкості вітру (що також посилює УНІ та погіршує якість повітря) і викидають різні види забруднюючих речовин. Деякі з цих наслідків можна пом'якшити природними засобами. Аспекти тепла, вентиляції та якості повітря вважаються одними з найважливіших для цілей планування, разом з управлінням міськими повеннями та водними ресурсами [15; 27; 31].

Містопланування в різних масштабах. Роль міського планування має першочергове значення для інформування, координації та впровадження заходів для покращення якості клімату в місті в умовах міських і глобальних проблем зміни клімату (Alcoforado та ін., 2009). Для міста Лісабон була висунута пропозиція щодо методології впровадження кліматичних

рекомендацій у міське планування (здійснюється на мезомасштабі), але її можна адаптувати до інших міст (Alcoforado та ін., 2005; 2009). Оскільки планувальникам потрібні просторові керівні принципи, була підготовлена карта із зображенням Лісабонських «однорідних кліматичних реакційних одиниць» або кліматопів (Scherer та ін., 1999), а також серія кліматичних рекомендацій для планування була представлена для різних одиниць (Alcoforado та ін., 2005; 2009). Пізніше аналіз було проведено на мікромасштабі в місті-районі (Telheiras-Lisboa, Alcoforado et al., 2010) з метою визначення кліматичних орієнтацій для цього району. Рекомендовано забезпечити мікрокліматичне різноманіття, уникати створення надмірно замкнутих просторів, на окремих ділянках забезпечити тінь (використанням листяних дерев, для покращення освітлення зимою); також було надано поради щодо орієнтації вулиць (уникнення лінійних будівель, нормальних для переважного напрямку вітру та міських типологій типу G, які створюють небажані вихори. Методології були зовсім різними, і дослідницькій групі довелося мати справу з тим фактом, що заходи, запропоновані в мезо- та мікромасштабі, були іноді суперечливі [15; 27; 31].

Протягом останніх десятиліть велика кількість наукових робіт присвячена взаємозв'язкам між «глобальною» зміною клімату та кліматичними змінами внаслідок урбанізації, хоча думки досить різні або навіть протилежні. У той же час урядові або міжнародні організації займаються питаннями зміни клімату в містах з метою планування.

Різні сценарії, запропоновані IPCC, повинні бути адаптовані до міської реальності, і планувальники повинні знати, що в різних містах і в кожному міському районі слід очікувати різних модифікацій (Alcoforado та ін., 2009).

Мацаракіс та Ендлер (2010) проаналізували перспективи теплових біокліматичних змін у німецькому місті (Фрайбурзі) між періодами 1961-90 та 2071-2100 у рамках двох сценаріїв IPCC (A1B та B1). Ґрунтуючись на припущенні, що найбільш модифікованими параметрами в міській структурі

є швидкість вітру та потоки радіації, виражені середньою радіаційною температурою (T_{mrt}), автори зосередилися на кількісному визначенні цих параметрів у міських районах (Matzarakis et al., 2000). Вони далі кількісно оцінили їхні зміни наприкінці 21 століття залежно від міської морфології та зеленої структури, оскільки T_{mrt} змінюється в основному будівлями та деревами. Виходячи з припущення, що якщо $T_{mrt} = T_a$ (більш-менш тіньові умови), передбачувані зміни днів теплового стресу ($PET > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) можуть бути високими. Крім того, якщо швидкість вітру зменшується, то кількість днів теплового стресу збільшиться, з найбільшими змінами (збільшення на 30 днів на рік) у сценарії A1B для періоду 2071-2100. Однак за того самого сценарію (A1B) і тих самих змін T_{mrt} , якщо швидкість вітру збільшиться на 1 м/с, кількість днів теплового стресу значно зменшиться до кінця 21 століття порівняно з початковими умовами PET.

Небажані зміни можна змінити шляхом висаджування певних видів рослинності, які створюють тінь влітку та дозволяють короткохвильовому випромінюванню досягати поверхні або місць, де люди проводять час взимку [15; 27; 31].

Пом'якшення УНІ. Підхід просторового масштабу пом'якшення УНІ може бути різноманітним. Тут ми будемо мати справу з місцевими та мікромасштабними, пропонуючи рішення для застосування в регіонах, щоб покращити кліматичні умови в межах міської тканини.

Зелені зони. Здається, є вагомі докази того, що посадка дерев і збільшення зелених насаджень сприятиме зниженню температури повітря біля поверхні. Однак через більшу випромінювання всіх хвиль (нижча $K\uparrow$ і нижча $L\uparrow$), в абсолютному вимірі існує більша кількість енергії, яка розсіюється, а над пологом, температури дещо вищі в околицях з високим деревним покривом. Однак, навіть якщо дерева мало впливають на температуру повітря, вони знижують температуру випромінювання, сприяючи меншому тепловому стресу [15; 27; 31].

Коппе та ін. (2004) представили синтез ефектів зелених насаджень: рослинність має нижчу теплоємність і теплопровідність, ніж будівельні матеріали, і вищу евапотранспірацію; рослини можуть фільтрувати пил із повітря та зменшувати швидкість вітру біля землі (позитивно у жаркому сухому кліматі, негативно у жаркому вологому кліматі). Як наслідок, мікроклімат прилеглих територій (позитивно) змінюється.

Затінення уздовж вулиць і парковок, а також короткі пішохідні відстані є доцільними для покращення комфорту людини (Korpe та ін., 2004). Несприятливі біокліматичні умови можна покращити, посадивши дерева (Moriyama and Matsumoto, 1988; Gulybs et al., 2003). Інші витрати та переваги варіантів планування синтезовано в Korpe et al. (2004). У рамках фінансованого ЄС проекту BUGS (Benefits of Urban Green Space) розробляється комплексний метод оцінки переваг міських зелених насаджень.

У густонаселеному місті Гуанчжоу (Китай) муніципальна влада впроваджує різні типи озеленення (Weng and Yang, 2004). Однак, оскільки основною метою є благоустрій (прізвисько міста «місто-сад»), перевага віддається газонам і квітам, а деревам нехтують.

Гілл та ін. (2007) досліджували місто Манчестер і показали роль, яку зелена інфраструктура може відігравати в адаптації до зміни клімату. Результати базуються на «енергетичному обміні та гідрологічних моделях, що показують поверхневу температуру та поверхневий стік у зв'язку з зеленою інфраструктурою за поточного та майбутнього кліматичних сценаріїв». Це дослідження є важливим, оскільки воно підкреслює необхідність кількісної оцінки та моделювання потенційної дії охолодження та інших наслідків різних типів зелених зон, оскільки часто припускають, що всі види та відсоток ґрунтового покриття є однаково позитивними в усіх місцях. Далі в ньому представлено озеленення міст як спосіб пом'якшити УНІ, а також адаптуватися до зміни клімату [15; 27; 31].

Підвищення альбедо. Більше альбедо (наприклад, фарбування дахів у білий колір) може змінити радіаційний баланс і зменшити UHI. Дулос та ін. (2004) визначають «холодні» та «теплі» будівельні матеріали відповідно до їхніх характеристик, які впливають на альбедо, колір та текстуру поверхні. Шорсткі поверхні темного кольору («теплі» матеріали) мають тенденцію поглинати більше, ніж гладкі світлі та плоскі поверхні («холодні» матеріали»). Однак необхідно також враховувати теплопровідність будівельних матеріалів (Oke et al., 1991).

Зміна щільності забудови. Деякі автори пропонують зменшити щільність забудови для пом'якшення UHI та підкреслюють, що слід враховувати кліматичні впливи різних елементів дизайну міста: планування та ширину вулиць, орієнтацію вулиць щодо переважаючих вітрів, схеми поділу ділянок під забудову, висота, форма та відносне розташування будівель. Однак цей показник не є адекватним для всіх типів клімату (наприклад, посушливого клімату). Проте деякі планувальники відстоюють компактні міста як модель сталого міста (Дженкс та ін., 1996). Наслідки компактного міста для клімату та якості повітря обговорюються Міллсом (2003) [15; 27; 31].

Водні поверхні. Інтеграція штучних водойм у посушливих районах, оскільки було показано, що навіть невеликі водойми знижують індекс теплового стресу.

Контроль вітру. Як згадувалося вище, міста впливають на вітровий потік, зменшуючи синоптичну швидкість вітру (за винятком областей, де відбуваються явища руслування). З іншого боку, UHI може спричинити надходження прохолодного (і чистого) повітря з околиць (сільський бриз, Барлаг і Куттлер, 1990/91) або з моря (Алькофорода та ін., 2006). У регіонах, де можуть бути дуже сильні вітри, необхідно впроваджувати стратегії запобігання.

Сприяння вентиляції. Кілька досліджень прикладної міської кліматології вказали на необхідність вентиляції.

Зменшення вентиляції внаслідок урбанізації сприяє збільшенню забруднення повітря (негативний ефект у всіх регіональних кліматичних умовах) і підвищенню UHI (негативний ефект у жаркому кліматі або контрастному кліматі з жарким літом). І навпаки, у холодному кліматі зниження швидкості вітру внаслідок урбанізації може мати позитивні наслідки з точки зору комфорту людини.

Значне зниження потенціалу природної вентиляції (до 10 разів) було розраховано для Афін (Santamouris та ін., 2001). У проекті, присвяченому Лісабону (Alcoforado та ін., 2009a), одним із головних вказівок для планувальників було сприяти циркуляції повітря не лише переважаючих регіональних вітрів (з півночі чи північного заходу), але й морських бризів. Їм необхідно дозволити досягати центральних районів міста, щоб зменшити міський острів тепла та сприяти покращенню стандартів якості повітря. Ця настанова базувалася на дослідженнях теплового комфорту та його сприйняття в місті, а також поля вітру, чисельного та фізичного моделювання (Lopes, 2003, Лопес та ін., 2011). Вентиляційні шляхи для сільського бризу також слід залишити вільними з тих же причин. На карті «Керівництва з планування», виготовленої Базельським університетом, нанесені вентиляційні шляхи, уздовж яких не можна посилювати шорсткість (Scherer et al., 1997; 1999; Thommes et al., 2001) [15; 27; 31].

Робота з ризиками сильного вітру. З іншого боку, слід також враховувати ризики для людей дерев і будівель, спричинені сильними вітрами. У місцях, де дуже сильні вітри є стихійним лихом, що часто повторюється, як у південному Китаї та у Флориді, технічне обслуговування до урагану (включно з вибором відповідних видів відповідно до умов середовища проживання) та роботи з усунення урагану слід планувати

ефективно (Джим і Лю, 1997). Навіть у так званому помірному кліматі пошкодження вітром можуть бути дуже серйозними. У грудні 1999 року сильні вітри дули над Північною Францією через дві дуже глибокі западини, що надходили з Атлантичного океану і були пов'язані зі струменем, що дував зі швидкістю 400 км/год на висоті 9000 м. 26 грудня в Парижі/Монсурі спостерігалися пориви 169 км/год. У регіоні Париж-Іль-де-Франс загинули 11 людей, сотня отримали важкі поранення. У Парижі було жорстоко знищено близько 6000 дерев і близько 7500 у Версальському парку (Lopes, 2003). Дослідження різної вартості шкоди від сильного вітру повинні проводити вчені у співпраці зі страховими агентствами та агентствами цивільного захисту (Abrassart, 1997). У густонаселених містах збитки та втрати людей, як правило, більші. Дослідження щодо оцінки вітрового ризику в Лісабоні на основі картографії падіння дерев під час шторму було проведено у співпраці з Управлінням цивільного захисту (Lopes et al., 2008). Висновки та карти найнебезпечніших вітрів (SW, W) і основних шляхів, якими слідують під час штормів, будуть служити допоміжним засобом для дій під час вітрів [15; 27; 31].

Контроль факторів якості повітря. Забруднення повітря та якість повітря в містах, що є результатом складної взаємодії між природними та антропогенними умовами, залишатимуться серйозною екологічною проблемою в майбутньому, особливо в країнах, що розвиваються. Міста з сезонно теплим, спокійним повітрям і сонячною погодою з високою інтенсивністю руху, як правило, особливо схильні до утворення низьких рівнів озону та інших фотохімічних забруднювачів. Пов'язані з цим проблеми транспортного руху та промислові викиди у великих агломераціях країн, що розвиваються, у деяких випадках посилюються географічним положенням у внутрішніх долинах, що призводить до сезонної поганої вентиляції, напр. Богота (Валенсія і Уертас, 2004) і Делі (Каре і Касал, 2004). Нічна максимальна концентрація CO₂ була виявлена Grimmond et al. (2002)

під час вимірювання та моделювання обміну між поверхнею та атмосферою в Чикаго, тоді як денні негативні потоки мали місце [15; 27; 31].

Забруднення повітря в містах впливає на місцевий клімат і регіональне середовище (Gotoh, 1993; Raga et al., 2001; Jauregui, 2004). Тим не менш, деякі аспекти забруднення повітря були успішно вирішені в деяких мегаполісах за допомогою політики та заходів, прийнятих з 1990-х років (Jauregui, 2004). Рекомендації щодо вивчення міської вентиляції та шляхів забрудненого/чистого повітря в міському середовищі обговорювали Кацшнер (1988), Барлаг і Куттлер (1990/91) і Баумллер (2008).

У цьому відношенні складання карт рози вітрів забруднення може виявитися корисним інструментом (Andrade, 1996; Jauregui, 2002). Повне відокремлення промисловості від житла, яке спочатку передбачалося як покращення навколишнього середовища та розумне рішення в суспільстві з промисловістю, що сильно забруднює навколишнє середовище, зараз застаріло та призводить лише до збільшення транспортного потоку та заторів (Fenger, 1999). Вплив забруднення повітря в містах можна пом'якшити шляхом конструктивного планування міста. У процесі пом'якшення наслідків скорочення викидів є ключовим питанням. Відкриті простори та парки можна використовувати та змінювати, висаджуючи дерева для зменшення забруднювачів повітря (Streiling and Matzarakis, 2003), шуму та затінення для покращення якості навколишнього середовища, особливо в житлових районах. Можливість перебудови міських районів дуже низька, але будівництво кільцевих доріг, які направляють частину транспорту навколо центру міста, є одним із варіантів уникнення забруднення повітря в деяких частинах міст (Fenger, 1999).

З точки зору біометеорології людини, кількісну оцінку якості повітря в міських районах і міських спорудах можна здійснити за допомогою індексів повітряного стресу та якості повітря. Це «дозволяє оцінити інтегральні умови якості повітря, які не обмежуються окремими забруднювачами

повітря і, отже, більш реалістично відображають навколишнє повітря, що складається із суміші забруднювачів повітря» (Mayer et al., 2004) [15; 27; 31].

2.4 Проблемні аспекти міського клімату в різних регіонах

Щоб забезпечити найкращі умови для благополуччя та здоров'я для мешканців міських районів, необхідно враховувати всі аспекти атмосфери (VDI, 1998; Scherer та ін., 1999; Baumüller, 2008). Фактори тепла, вентиляції та якості повітря є основними атмосферними компонентами, що змінюються в місті, хоча слід також враховувати інші фактори, такі як шум і запахи (Wilmers, 1997; Baumüller, 2008; Matzarakis et al., 2008). У регіонах, де ймовірні раптові повені, необхідно детально вивчити інтенсивність опадів. Однак «широко визнано, що на питання «які міські форми найкраще використовують землю?» не можна дати однозначної відповіді. Необхідно враховувати занадто багато параметрів, кожен з яких матиме свій вплив [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Ейнслі та Гулсон (1999) та Міллс (2006) стверджують, що клімат міста повинен бути рутинним питанням у процесах планування землекористування. Наступне обговорення структуровано в рамках макроклімату міста, щоб підкреслити, які аспекти міського клімату слід враховувати при плануванні міста. Слідуючи Бразелю та Мартіну (1997), клімати будуть дуже просто класифіковані як «жаркі клімати» (розділені на «гарячі вологі клімати» та «гарячі посушливі клімати»), «холодні клімати» та «інші». До «інших» кліматів входять приклади регіонів із більш ніж одним типом стресового сезону [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Жаркий клімат. У містах із жарким кліматом УНІ є одним із найбільш негативних факторів не лише для комфорту людини та теплового стресу, а й для здоров'я людини (Oke, 1994; Korpe та ін., 2004; Gill, 2004; Gosling та ін., 2009). Крім того, це має негативний вплив на споживання енергії (більший

попит на кондиціонування повітря), використання води, метеорологію забруднення повітря (посилення ефектів рециркуляції/фумігації), хімічний склад забруднення повітря (вторинна трансформація) і, можливо, на опади (Oke, 1994; Jauregui, 1997). Тому для здоров'я людини та економіки вигідно пом'якшити його вплив.

Жаркий вологий клімат. У цьому розділі ми розглянемо території в смузі широт від 10 до 15° на північ і південь від екватора, де цілий рік зберігаються високі температури (в середньому 27°C), з невеликим діапазоном добових температур і максимальними температурами вище ніж 30 °C і мінімальна від 20 до 24 °C. Високі показники вологості та низька швидкість вітру (наприклад, екваторіальна депресія) є іншими характеристиками, які сприяють максимальному тепловому стресу. Кількість опадів значно відрізняється від місця до місця, але справжнього сухого сезону немає. У деяких районах вищих за 15° широт, розташованих у східних частинах континентів (ПД США, ПД Китаю та Пд Японії, Сх Австралії тощо) дуже спекотне та вологе літо спричиняє сильний тепловий стрес для людини, переважно в нічний час. часу (Моріяма та Мацумото, 1988). У цих областях основними стратегіями з мінімізації теплового стресу є: а) забезпечення або максимізація вентиляції в будівлях і навколо них. Будівлі повинні розташовуватися якомога вільніше. У населених пунктах біля берега слід уникати будь-яких перешкод, які перешкоджають проникненню морського бризу. У таких умовах міські каньйони повинні бути узгоджені з домінуючим напрямком морського бризу (Golany, 1996; Emmanuel and Johansson, 2006); б) для зменшення сонячної радіації. Затінення міських просторів є необхідним за допомогою спеціально побудованих тіньових конструкцій, відповідної комбінації висоти та орієнтації будівель або стратегічно розташованої та вибраної рослинності. “; в) мінімізувати потенційну небезпеку від затоплення (Бразель і Мартін, 1997); д) сприяти охолодженню шляхом випаровування, що може

покращити тепловий комфорт, але лише в приміщеннях, які надійно добре провітрюються в критичні пізні ранкові та післяобідні години (Lin та ін., 2010, Хван та ін., 2011) [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Жаркий посушливий клімат. Сухі регіони зустрічаються не тільки в субтропічних широтах, але також і в континентальних місцях в середніх і високих широтах. Однією з основних кліматичних особливостей є дуже високі добові коливання температури повітря, а також дуже низькі значення вологості повітря. Температура повітря може коливатися від 50 °C протягом дня до 15 °C або нижче протягом ночі (Brazel and Martin, 1997). Сильніші сезонні коливання температури відбуваються у вищих широтах, а взимку температури опускаються до від'ємних значень. Основними заходами щодо мінімізації кліматичного стресу є: а) зменшення сонячного випромінювання. Щоб уникнути кондиціонування повітря, слід застосовувати стратегії мінімізації теплового стресу. Наприклад, дерева (Shaashua-Bar and Hoffman, 2003), аркади та вузькі вулиці (Baker et al., 2002) і різні тіні можуть бути використані для зменшення радіації та, таким чином, зменшення теплового навантаження. Більшість заходів, зазначених у пункті а), спрямовані на створення більш приємних теплових умов у постійно жаркому кліматі, але не спрямовані на зниження зимових низьких температур у пустелях високих широт або континентальних сухих районах середніх широт. Однак, якщо будівельний матеріал і товщину стін вибрано правильно, добові коливання температури всередині будівель можна мінімізувати, використовуючи переваги теплоакумуючої здатності стін (Brazel and Martin, 1997; Offerle et al., 2005); в) збільшити ступінь випаровування. Щоб збалансувати сумарне випромінювання на поверхні землі за рахунок прихованих втрат тепла, необхідно збільшити ступінь випаровування. Цього можна досягти шляхом зменшення непроникних поверхонь і проектування зрошуваних зелених смуг у громадах. У посушливих і напівпосушливих районах США коефіцієнт Боуена зменшується зі збільшенням площі зрошуваних зелених

насаджень (Grimmond and Oke, 1995). В експерименті, проведеному Бонаном (2000) у різних районах спекотної та сухої громади округу Боулдер, важливість зрошення була добре доведена під час порівняння температури поверхні місцевої трави з сильно зволженими житловими або парковими газонами. Перший був на кілька градусів тепліший за другий; d) мінімізувати вплив вітру (Brazel and Martin, 1997; Givoni, 1998), будуючи в межах найменшої можливої оболонки будівлі. Бразел і Мартін (1997) припускають важливість компактної геометрії та коротких відстаней для уникнення екстремальних умов. Перлмуттер та ін. (2007) погоджуються, що «підвищена щільність міської заселеності, сприяючи збільшенню захоплення радіації та зберігання тепла в міській тканині, також зменшує термічний стрес у критичні години доби». Цей ефект пояснюється високою тепловою інерцією будівель і великими добовими амплітудами температури з відносно низькими мінімальними температурами. Однак орієнтація вулиці з півночі на південь є найкращою для досягнення ефекту охолодження в міських каньйонах (Pearlmutter et al., 2007) [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Холодний клімат. Цей розділ стосується клімату високих широт північної півкулі (на північ від 55°), що характеризується низькими температурами цілий рік, включаючи прохолодне літо та сильні вітри.

Існує лише кілька робіт про міський клімат у кліматі високих широт. Наприклад, у Рейк'явіку (64° пн.ш.; Steinecke, 1999) протягом усього дня взимку виникає слабкий тепловий острів, що є наслідком додаткової енергії від геотермічного опалення тротуарів і надземних резервуарів гарячої води та трубопроводів. Однак влітку міська територія прохолодніша (прохолодний острів) вдень через затінення міських ділянок через низьку сонячну висоту, а також через охолоджуючий ефект океану поблизу центру міста. Більшість ділянок на дні долин непридатні для створення нових районів через дренаж і накопичення холодного повітря (Steinecke, 1999). Незважаючи на те, що швидкість вітру різко знижується в густонаселеному

районі Рейк'явіка (від 4 м/с до 1,8 м/с), деякі будівлі спричиняють «характерні пориви» в центральній частині міста, створюючи дуже неприємний мікроклімат, особливо коли діють фактори холодного вітру стурбований.

Бразел і Мартін (1997) описують ескімоський будинок як чудовий приклад дизайну, адаптованого до клімату. Стосовно сучасних будівель основні заходи щодо мінімізації кліматичних навантажень у холодних регіонах такі: а) максимізація сонячного випромінювання шляхом уникнення світлих матеріалів для зниження альбедо (Sailor, 1995); щільна забудова також сприятиме мінімізації відбиття короткохвильового випромінювання (Sailor and Fan, 2002) і мінімізації втрат тепла; б) надавати перевагу УНІ, оскільки його ефект позитивний. Цього можна досягти шляхом мінімізації втрат тепла за допомогою компактних форм і хорошої ізоляції; вікна повинні бути розташовані на стінах, що виходять на сонце, щоб підвищити поглинання $K_{\square}$; с) мінімізувати вплив вітру цілий рік, за винятком районів, де вітряні умови необхідні для покращення якості повітря.

Буллен (2000) обговорює необхідність більш відповідного дизайну в прибережних районах північної та західної Шотландії, що характеризується вітряними умовами та рясними дощами, що вимагає високої ізоляції, повітронепроникності та контрольованої вентиляції для підвищення комфорту мешканців у приміщенні та мінімізації наслідки проливної дощу [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Zrudlo (1988) представляє методологію міського планування в Арктиці, де кожному фахівцю було б доручено розробити план для кожного важливого кліматичного фактора, яким слід керувати в холодному кліматі: сонця, вітру та снігу. Сонячні аспекти, вимоги до захисту від вітру та контроль накопичення снігу будуть нанесені окремо. Наступний крок передбачає визначення суперечливих вимог між планами. Тоді для

досягнення компромісу необхідні консультації та переговори. Кінцевим результатом є синтезований план, який пропонує максимальну сонячну перевагу, захист від вітру та мінімальне занесення снігу, сприяючи загальному благополуччю, як фізичному, так і психологічному, мешканців. Цю ж методологію можна застосувати в інших місцях, за умови, що кліматичні фактори, які необхідно контролювати, вибираються відповідно до макроклімату ділянки.

Клімат з контрастними сезонами. «Регіони з більш ніж одним напруженим сезоном становлять особливий виклик для кліматологів, планувальників і архітекторів, тому що один сезон може часто вимагати суперечливих дизайнерських рішень для інших сезонів» (Бразель і Мартін, 1997, стор. 180). До цієї категорії входять різні типи клімату, як «помірний» клімат із контрастними тепловими сезонами та сезонами опадів (як західна, так і східна частини континентів), сухий клімат із наявністю підвищених температур. Часто потрібен компроміс між різними обговорюваними дизайнерськими рішеннями.

Проблеми виникають, якщо сприятливий і негативний вітри дмуть з одного напрямку. У міських районах східних континентальних частин екстратропічних регіонів холодний вітер і сильні хуртовини, які часто поєднуються з крижаними дощами взимку, створюють досить жалюгідні умови життя. Щоб компенсувати ці погодні явища, у Монреалі був побудований підземний центр міста (Helminen, особисте спілкування). Однак дуже мало міських громад можуть дозволити собі такі рішення. Проте влітку жителі тих самих районів змушені боротися з дуже спекотною та вологою погодою та частими хвилями спеки (як у липні 2005 року) [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

Що стосується «помірного» клімату з контрастними сезонами, ООН сприятливий взимку, але загрожує комфорту та здоров'ю людини влітку. Афіни, Лісабон і Лос-Анджелес є прикладами клімату

«середземноморського типу», де непросто відповісти на наступне запитання: УНІ позитивний чи негативний? Те саме питання можна поставити у випадках, наприклад, південно-східного Китаю та південної Японії. Еттумі та ін. (2003) у дослідженні напівпосушливого регіону Алжиру, де взимку спостерігаються дуже низькі температури, а влітку очікуються дуже високі, повідомляють, що дешеві традиційні матеріали з більшою тепловою інерцією можна ефективно використовувати для будівництва житла. Орал і Йилмаз (2003), спираючись на роботу з Туреччини, дійшли висновку, що для того, щоб задовольнити тепловий комфорт і зменшити споживання енергії на опалення, планування споруд та огорожувальні конструкції необхідно правильно визначити на етапі планування. У численних роботах йдеться про зниження рівня комфорту людини в містах.

Окрім економічних наслідків, все більше уваги приділяється впливу глобального потепління на здоров'я. Ситуація буде ще гіршою в містах зі збільшенням УНІ, і багато муніципальних органів влади так званого «помірного» клімату з контрастними сезонами вирішили вжити заходів для пом'якшення міського теплового острова, навіть якщо ця функція може мати деякі переваги взимку [18; 23; 30; 36; 45; 46; 51; 54].

2.5. Переваги, отримані від вирішення проблеми міського клімату

Економічні вигоди. В деяких роботах вказуються різні можливі варіанти зменшення міського теплового острова та теплового навантаження, порівняно з витратами на опалення. В Афінах, як і в інших середземноморських містах, незважаючи на нижчу енергію, необхідну для опалення взимку (від -30 до -50%), загальне річне споживання енергії в центральній частині вище через дуже високу потребу в енергії для охолодження під час Літо. (Сантамуріс та ін., 2001). Хасід та ін. (2000) підтвердили вплив літнього УНІ Афін на витрати на охолоджуючу енергію

та піковий попит (які збільшуються на 100%). Акбарі та ін. (2001) досліджували Лос-Анджелеський УНІ і оцінили, що потреба в енергії зростає на 2-4% для кожного збільшення інтенсивності УНІ на 1°C. Крім того, за оцінками авторів, 5-10% поточної потреби в електроенергії витрачається на охолодження будівель, щоб компенсувати зростання УНІ з 1940 року (близько 0,5-3°C). Автори також стверджують, що пом'якшення УНІ потенційно може зменшити національне використання енергії для кондиціонування повітря на 20% і заощадити 10 мільярдів доларів (США) на рік на споживанні енергії та покращенні якості міського повітря [3; 21; 27; 31; 36; 48].

Са та ін. (1998) провели польове дослідження в Японії та дійшли висновку, що існування парку покращило теплове середовище в околицях (температура жвавого комерційного району на відстані 1 км за вітром може бути знижена на 1,5°C). Вони підраховали, що на території парку площею близько 0,5 км² можна заощадити 4000 кВт-год електроенергії для охолодження (або 650 доларів США) за 1 годину, між 13:00 і 14:00. спекотного літнього дня; це означає економію приблизно 15 % електроенергії для охолодження повітря. Це значення стосується офіційних будівель і трохи більше, ніж інші, отримані для житлових будинків (Konopacki та ін., 1996; Меєр і Таха, 1997, цитує Са та ін., 1998) [3; 21; 27; 31; 36; 48].

Здоров'я. Вплив УНІ особливо негативний під час хвиль спеки. Їхні наслідки залежать від тривалості та часу події та вражають переважно людей із уже наявними захворюваннями або людей із більшим стресом через вік чи соціальне становище. «Захворюваннями, які можна розпізнати як безпосередній вплив тривалих періодів високої температури навколишнього середовища, є тепловий удар, теплове виснаження, тепловий синкопе та теплові судоми» (Kilbourne et al., 1982, цитується за Dessai, 2002). Під час хвиль спеки, які нещодавно виникли в Європі, зокрема в 2003 році, негативний вплив УНІ на людину здоров'я та смертність було цілком

зрозумілим. Літній стрес для людини сильно залежить від температури, забруднення повітря (зокрема озону) та інших умов навколишнього середовища, змінених містами. Крім того, тепловий комфорт різниться в межах міської тканини, і відповідно різні наслідки для здоров'я людини. У дослідженні, проведеному в Страсбурзі (Matzarakis et al., 2009), у 2003 та 2004 роках було розраховано фізіологічну еквівалентну температуру (PET) для п'яти міських місць, що характеризуються різними факторами огляду неба, і порівняно з контрольною точкою, яка розташована в сільській місцевості. Порівняння значень PET за два роки показує, що PET у 2003 році був приблизно на 5-7K вищим, ніж у 2004 році. Крім того, денний і нічний PET були найвищими в місті (найбільші відмінності вночі (Matzarakis et al, 2009)). Протягом дня PET був вищим у містах з високим коефіцієнтом огляду неба, ніж у країні, хоча місто під деревами мало найнижче значення PET.

Можливість прогнозування теплових хвиль потребує знання термічних біокліматичних умов не лише у просторовому вимірі міського теплового острова, але й вертикального компонента внутрішніх і зовнішніх взаємодій і змін. Розробка спеціальних систем попередження про спеку та здоров'я є ключовим питанням економічного значення. Існує також занепокоєння щодо збільшення попиту на енергію під час екстремальних температурних явищ [3; 21; 27; 31; 36; 48].

3. Вплив урбанізації на вплив м. Чернівці і тенденції його сучасних змін

3.1. Методика оцінки впливу урбанізації на клімат міста та встановлення тенденцій його змін

Внаслідок інтенсивного антропогенного впливу на територіях міст змінюються всі компоненти довкілля, значних змін зазнає приземна частина атмосфери. Внаслідок впливу урбанізації змінюються чинники кліматоутворення, що дає підстави стверджувати, що на території міста формується своєрідний міський (urban) клімат [40].

Основні риси клімату міста відповідають клімату природно-кліматичної зони, в якій воно знаходиться, особливості їх змін визначаються інтенсивністю антропогенного впливу. Як частина глобальної кліматичної системи клімат міста зазнає притаманних їй загальних кліматичних змін. Таким чином, можуть розглядатись два аспекти досліджень клімату міста: вплив урбанізації на формування кліматичних умов; зміни клімату міста як частини загальної кліматичної системи [10].

Очевидно, що розгляд двох аспектів проблеми змін міського клімату потребує застосування різних методик дослідження.

Вплив урбанізації, точніше – ступінь змін зонального клімату на території міста може бути вивченим шляхом порівняння показників метеорологічних елементів, визначених у самому місті і поза зоною його впливу. В ідеальному випадку такі дослідження передбачають наявність результатів паралельних спостережень на метеорологічних станціях, що знаходяться в центральній частині міста з максимальним рівнем техногенного навантаження і даних, одержаних на пункті спостережень, який знаходиться поза містом. Для великих міст зі значною диференціацією ландшафтних умов території таких пунктів спостереження має бути декілька [55].

Сучасна мережа постійних пунктів спостережень метеорологічних станцій Гідрометслужби побудована за принципом репрезентативності, тобто спрямована на оцінку кліматичних умов частини певної природно-

кліматичної зони. Одержані на такій мережі дані характеризують тільки кліматичний «фон» міста. Власне на територіях міст, особливо – в їх центральних частинах метеорологічні спостереження, за рідкими виключеннями не проводяться. В окремих випадках це можуть бути результати спостережень на відомчих метеорологічних станціях і постах навчальних закладів і деяких науково-практичних організацій, зокрема – сільськогосподарського спрямування.

На території Чернівецької області працює лише три метеостанції Гідрометеорологічної служби: с.Селятин (Н=744м), м.Чернівці – Аеропорт (Н=239м) і м.Новодністровськ (Н=230м). Власне на території міста Чернівці метеорологічні спостереження здійснюються ще у на двох пунктах: на метеорологічній станції Чернівці – Університет (Н=249м) і Чернівці – сільськогосподарська дослідна станція. Крім того, в межах міста працюють два опадомірні пости – на аерологічній станції (вул.Бережанська) і гідрологічному посту р.Прут – м.Чернівці (поблизу автодорожнього мосту на вул.Хотинській). Метеорологічна станція Чернівці – Аеропорт знаходиться у південно-східній частині міста. Перший період роботи станції охоплював 1935-1939 роки, другий розпочався у 1944 році і триває дотепер. Протягом 1944-1965 років спостереження проводились 4 рази на добу, з 1966 року – 8 разів на добу. З 1944 року розміщення метеомайданчика не змінювалось. У цілому, ряд спостережень по цій станції може вважатись однорідним. З точки зору вивчення впливу урбанізації на формування клімату Чернівців результати спостережень на цій метеостанції не можуть вважатись абсолютно «фоновими». Так, вже понад 40 років станція, фактично, знаходиться в межах міста, в останні роки район навколо неї, раніше чисто сільськогосподарський, включений в межі міста і зараз інтенсивно забудовується. Це не може не впливати на кліматичні умови району розміщення станції [6-8].

Метеорологічна станція Чернівці – Університет знаходиться, фактично, у дендропарку за 5-м адміністративним корпусом Чернівецького

національного університету. Спостереження за основними метеорологічними елементами виконується на майданчику, територія якого по периметру практично повністю екранована житловою забудовою і деревами дендропарку. Дещо більш відкритим метеомайданчик є з північно-західного напрямку, який відповідає напрямку основних на цій території північно-західних вітрів, рис.3.1.

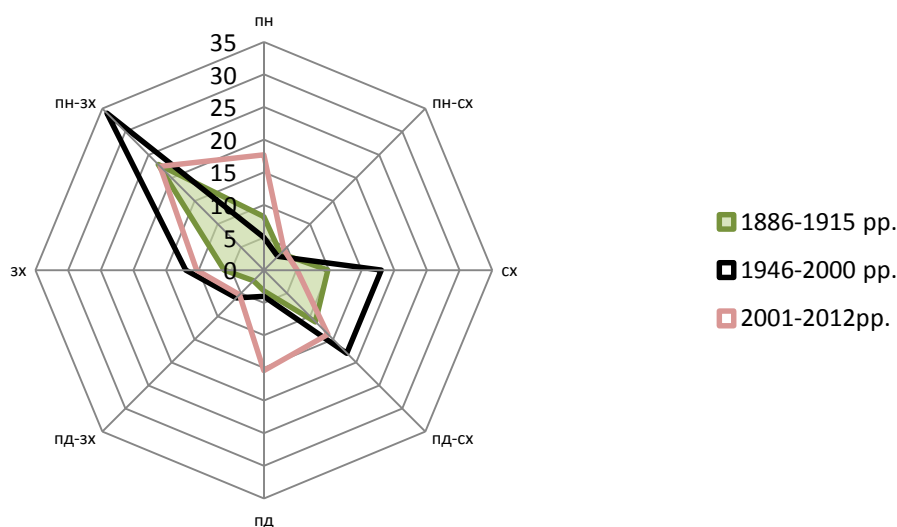


Рис. 3.1. Річні рози вітрів в Чернівцях

Спостереження на метеостанції Чернівці – Університет проводяться 4 рази на добу.

Результати навіть такого короткого і далеко не повного аналізу умов проведення метеорологічних спостережень на території міста Чернівці дають змогу зробити висновки про те, що дані спостережень на метеостанції Чернівці – Аеропорт не в повній мірі є «фоновими», а дані, одержані на метеостанції Чернівці – Університет не зовсім репрезентативні для центральної, найбільш урбанізованої частини міста. За таких умов очевидно не може бути одержана кількісна оцінка антропогенного впливу на клімат міста, проте якісні риси змін можуть бути встановлені.

Методичним підходом до встановлення таких змін є інтерпретація результатів порівняння значень метеорологічних елементів, визначених при паралельних спостереженнях на метеостанціях Чернівці – Аеропорт і Чернівці – Університет.

Другим аспектом дослідження є оцінка змін клімату міста як наслідку глобальних змін клімату, що зараз визначені як чітко виражена тенденція підвищення температур. Встановлення рис таких змін і їх кількісна оцінка можуть виконуватись у наступному порядку:

- встановлення часової межі початку періоду кліматичних змін;
- вибір критерію порівняння;
- порівняння значень метеорологічних елементів за періоди до початку і під час кліматичних змін.

Об'єктивність виявлених змін визначається правильним вибором критерію порівняння – результатами метеорологічних спостережень, виконаних у період до початку сучасних кліматичних змін. В якості критерію порівняння обраний 30-річний період (1961-1990 роки), який, згідно рекомендацій Всесвітньої метеорологічної організації, визначений як кліматична норма [5; 9].

3.2. Зміни клімату Чернівців під впливом урбанізації

Результати чисельних досліджень впливу урбанізації на клімат міст показують, що його наслідком є зміни практично всіх метеорологічних елементів. Цілком очевидно, що інтенсивність такого впливу визначатиметься рівнем антропогенного навантаження на повітряне середовище, тобто розмірами міста і розвиненістю техногенних елементів його інфраструктури. Кількісно такі зміни можуть характеризуватись величинами, одержаними за результатами досліджень змін клімату великих міст, які знаходяться в помірних широтах, табл.3.1.

Таблиця 3.1

**Зміни кліматичних характеристик міст, викликаних урбанізацією [12;
17; 19; 21; 25; 27; 28; 30]**

Елементи клімату	Ступінь зміни порівняно з агроландшафтами
Полютанти: ядра конденсації та частинки газові домішки	У 10 разів більше У 5-25 разів більше
Кількість хмар	На 5-10% більше
Туман: взимку влітку сприяють утворенню смогів	На 100% більше На 30% більше На 10-20%
Опади: загальна кількість число днів з опадами менше 5 мм снігопади:	На 5-10% більше На 10% більше На 5% більше
Відносна вологість взимку влітку	На 2% менше На 8% менше
Радіація: загальна ультрафіолетова взимку ультрафіолетова влітку	На 15-20% менше На 30% менше На 5% менше
Тривалість сонячного потоку	На 5-15% менше
Температура: середня річна зимовий мінімум (середнє) градусо-дні опалювального сезону	На 0,5-1,0° С вище На 1,0-2,0 ° С вище На 10% менше
Швидкість вітру: середня річна екстремальні пориви штилі	На 20-30% менше На 10-20% менше На 5-20% більше

Спостереженнями на метеорологічних станціях в межах міста Чернівці охоплений менший перелік метеорологічних елементів, зокрема, не вимірюються параметри сонячної радіації і вміст у повітрі забруднюючих речовин.

Зазвичай при оцінках змін клімату обмежуються аналізом змін основних метеорологічних елементів – температури повітря і кількості атмосферних опадів.

Зміни температури повітря в Чернівцях. Зміни температур повітря, які виникли внаслідок антропогенного впливу, можуть бути простежені в розрізі різних часових проміжків. У найбільш загальному випадку це будуть зміни середніх річних температур повітря. В таблиці 3.2 наведені дані по середніх річних температурах повітря, виміряних у 2000-2023 роках на метеорологічних станціях Чернівці – Аеропорт і Чернівці – Університет.

Таблиця 3.2

Середні річні температури повітря в м.Чернівці за даними метеорологічних станцій Чернівці – Аеропорт і Чернівці - Університет

Рік	Середня річна температура повітря за даними метеостанції, °С		Різниця, °С
	Чернівці - Аеропорт	Чернівці - Університет	
2000	9,8	9,8	0,0
2001	8,7	8,7	0,0
2002	9,2	9,3	0,1
2003	8,4	8,7	0,3
2004	8,8	9,1	0,3
2005	8,5	8,8	0,3
2006	8,4	8,8	0,4
2007	10,0	10,1	0,1
2008	9,8	9,9	0,1
2009	9,5	9,7	0,2
2010	8,6	8,9	0,3
2011	9,2	9,4	0,2
2012	9,3	9,4	0,1
2013	9,3	9,6	0,3
2014	9,4	9,7	0,3
2015	10,5	10,8	0,3
2016	10,1	10,4	0,3
2017	9,9	10,2	0,3
2018	9,8	10,1	0,3
2019	10,8	11,0	0,2
2020	10,7	10,8	0,1
2021	9,1	9,4	0,3
2022	10,4	10,5	0,1
2023	11,0	11,2	0,2

Інтерпретація наведених в таблиці 3.2 даних дає можливість зробити наступні висновки:

- урбанізація впливає на термічний режим клімату міста, у даному випадку можна стверджувати про наявність «острова тепла» над центральною частиною Чернівців. Свідченням цього є позитивний знак відхилень «міських температур» від «фонових». Дійсно, у 22 з 24 років у центральній частині міста спостерігались більш високі середні річні температури повітря;
- інтенсивність антропогенного впливу є незначною, про що свідчить мала величина одержаного відхилення температур, яке, в середньому, становить 0,2 С. Найчастіше (в 11 випадках з 24) спостерігалась величина відхилення 0,3С;
- сумарне значення відхилення, що характеризує інтенсивність антропогенного впливу, не може вважатись статистично значимим. Складовою відхилення, крім частки власне антропогенного впливу, є частка систематичних похибок. Основна складова відхилення, що сформувалась за рахунок систематичної похибки є різниця у кількості випадків спостережень за температурою. Так, якщо кількість вимірювань температури повітря за рік на метеостанції Чернівці – Аеропорт становить 2920 випадків, то на метеостанції Чернівці – Університет лише 1460. Різниця також могла виникнути за рахунок різниці метрологічних характеристик приладів, які використовуються для вимірювання температур повітря на вищезгаданих станціях.

Рядом дослідників клімату міст були зроблені спроби кількісної оцінки впливу міста на термічний режим і розробки аналітичного виразу для розрахунку величини відхилення. Концептуально вважалось, що інтенсивність впливу міста на термічний режим визначається рівнем антропогенного навантаження. За інтегральну характеристику рівня урбанізованості території найчастіше умовно приймалась чисельність міського населення. Одна з перших таких спроб була зроблена відомим дослідником урбанізованих кліматів Т.Оке (Т.Р.Оке), який запропонував для підрахунку підвищення температури повітря в місті вираз:

$$\Delta T = a \cdot \lg N - b, \quad (3.1)$$

де ΔT – величина підвищення температури в місті у порівнянні з її фоновим значенням; N – чисельність населення; a і b – параметри, які характеризують особливості території міста [39].

Зміни температур повітря в містах України під впливом урбанізації були досліджені, зокрема, Н.Гребенюк і м.Барабаш [1]. Дослідниками для кількісної оцінки рівня антропогенного підвищення температури повітря в містах був запропонований вираз, аналогічний (3.1):

$$\Delta T = 0,5 \cdot \lg N - 2,77 \quad (3.2)$$

Вираз, згідно рекомендацій його авторів, може застосовуватись для міст помірної кліматичної зони з чисельністю населення понад 300 тис.чол. Наші спроби використання цього виразу для оцінки техногенного впливу на температури м.Чернівці з чисельністю населення 264,3 тис.чол. дали негативні результати. Скоріш за все, вираз доцільно застосовувати для території міст з населенням понад 400 тис.чол.

Разом з тим, для коротких часових проміжків: доба – декілька годин різниця температур повітря в місті і на фоновій ділянці може бути значно більшою, за результатами спостережень на метеостанції Чернівці – Університет – в межах 1-2 °C. Найпомітнішою така різниця є за умов антициклональної погоди, коли на околицях міста відбувається інтенсивне охолодження повітря. В центральній частині міста в цей час зберігаються досить високі температури за рахунок тепловіддачі сильно нагрітих за день кам'яних споруд і дорожніх покриттів.

Вираз для кількісної оцінки максимально можливого підвищення температури повітря в місті у порівнянні з фоновією місцевістю було запропоновано В.Логіновим (В.Ф.Логінов, 1996). Вираз, рекомендований для застосування для міст помірної кліматичної зони, має вигляд:

$$\Delta T_{\max} = 2,01 \cdot \lg N - 4,06 \quad (3.3).$$

Для території м.Чернівці величина можливого максимального підвищення температури, одержана за цим виразом, становить 6,8 °C, що

значно перевищує результати фактичних спостережень.

Зміни кількості атмосферних опадів. Досить помітно і часто – неоднозначно під впливом урбанізації змінюється режим атмосферних опадів. Особливості таких змін для території конкретно взятого міста можуть бути простежені шляхом порівняння кількостей атмосферних опадів, виміряних на його території і фоновій місцевості. Для міста Чернівці таке порівняння може бути виконаним за результатами спостережень на двох опадомірних пунктах, табл.3.3.

Таблиця 3.3

Річні суми атмосферних опадів, виміряні на різних опадомірних пунктах м.Чернівці, 2000-2003рр.

Рік	Річна сума атмосферних опадів, виміряна на опадомірному пункті, мм			Різниця річних сум опадів на м/с Чернівці – Аеропорт і Чернівці – Університет, мм
	Чернівці - Університет	Чернівці - Аеропорт	Водомірний пост р.Прут – м.Чернівці	
2000	569	476		93
2001	870	765		105
2002	708	560		148
2003	592	487		105
2004	585	498		87
2005	936	831		105
2006	846	757		89
2007	712	626		86
2008	856	730		126
2009	602	500		102
2010	1000	850		150
2011	505	442		63
2012	681	642		39
2013	732	587		145
2014	654	568		86
2015	458	375	429	83
2016	754	689	630	65
2017	643	520	598	123
2018	788	696	709	92
2019	721	593	706	128
2020	798	692	805	106
2021	765	644	711	121
2022	548	440	560	108
2023	617	567	590	50
2000-2023	706	606	-	100

Наведені в табл.3.3 дані свідчать про помітну нерівномірність розподілу річних сум атмосферних опадів по території м.Чернівці. Нажаль, ряд спостережень по опадомірному посту, що знаходиться на водомірному пості р.Прут – м.Чернівці є дуже коротким. Ці дані не враховувались в оцінці впливу міста на режим опадів. Результати багаторічних паралельних спостережень за атмосферними опадами показують, що в районі Національного університету в середньому за рік випадає на 100мм більше опадів, ніж в районі аеропорту. Величини річних різниць у кількості опадів становлять від 39 до 148мм. При помітній різниці річних сум характер їх багаторічного ходу є синхронним, рис.3.2.

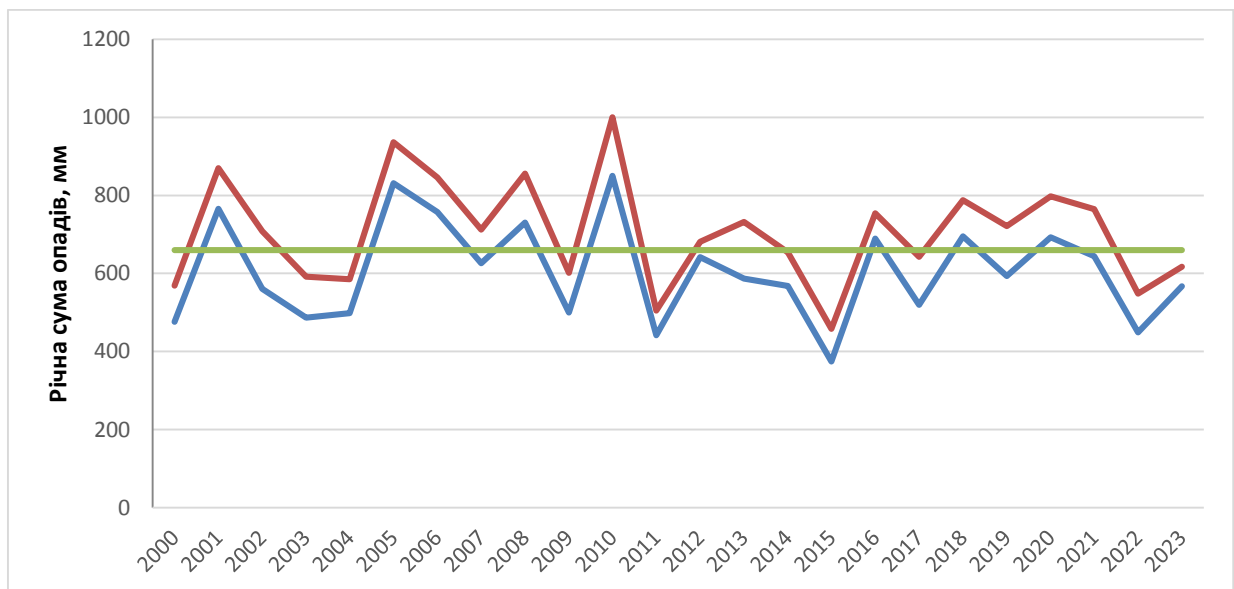


Рис.3.2. Хід річних сум атмосферних опадів у Чернівцях за даними метеостанцій Чернівці – Університет і Чернівці – Аеропорт протягом 2000-2023рр.

Величини річних різниць у кількостях опадів, виміряних на двох вищевказаних опадомірних пунктах сумарно формуються різницями у місячних сумах опадів, табл.3.4.

Таблиця 3.4

Середні місячні суми атмосферних опадів, виміряні на опадомірних пунктах м.Чернівці, 2000-2020рр., мм.

Опадомірний пункт	2000-2010											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Чернівці – Університет	41,7	44,9	46,4	49,6	70,9	10,2	122,1	92,5	57,8	49,9	39,1	36,6
Чернівці – Аеропорт	27,1	32,8	36,7	41,6	64,7	93,0	103,2	94,7	58,8	39,6	30,3	27,4
Δh	14,6	12,1	9,7	8,1	6,2	7,2	18,9	-2,2	5,0	10,3	8,8	9,2
	2011-2023											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Чернівці – Університет	34,0	39,5	57,6	45,9	77,7	120,7	74,8	46,9	46,6	45,8	36,0	50,3
Чернівці – Аеропорт	26,3	30,8	44,2	38,6	78,4	102,3	66,2	41,5	49,2	43,3	28,1	37,3
Δh	7,7	8,7	13,4	7,3	-0,7	18,4	8,6	5,4	-2,6	2,5	7,9	13,0

Згідно наведених в табл.3.4. даних, максимально можлива різниця між виміряними на двох опадомірних пунктах місячні суми атмосферних опадів може становити близько 20мм при синхронному ході їх річного ходу, рис.3.3.

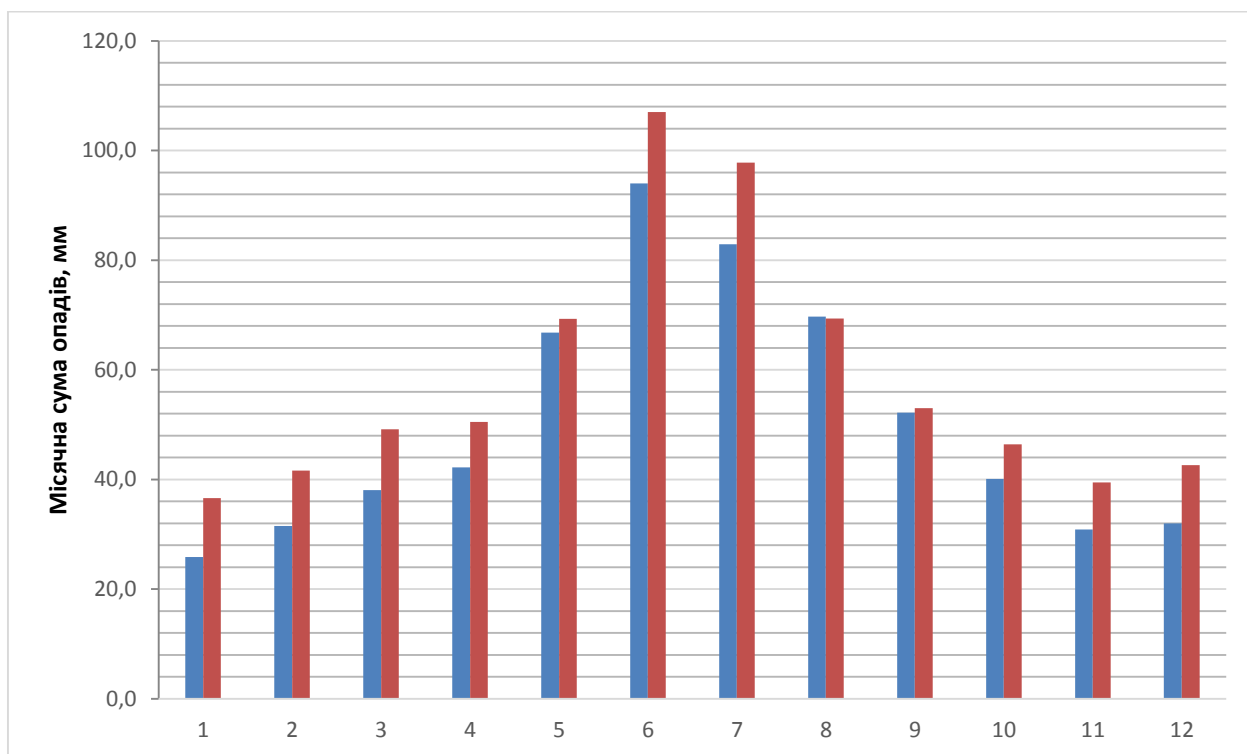


Рис.3.3 Хід середніх місячних сум атмосферних опадів у Чернівцях в 2000-2023рр.

Максимальні різниці між місячними сумами атмосферних опадів, виміряними на різних опадомірних пунктах Чернівців найчастіше спостерігають у літній сезон, рис.3.4.

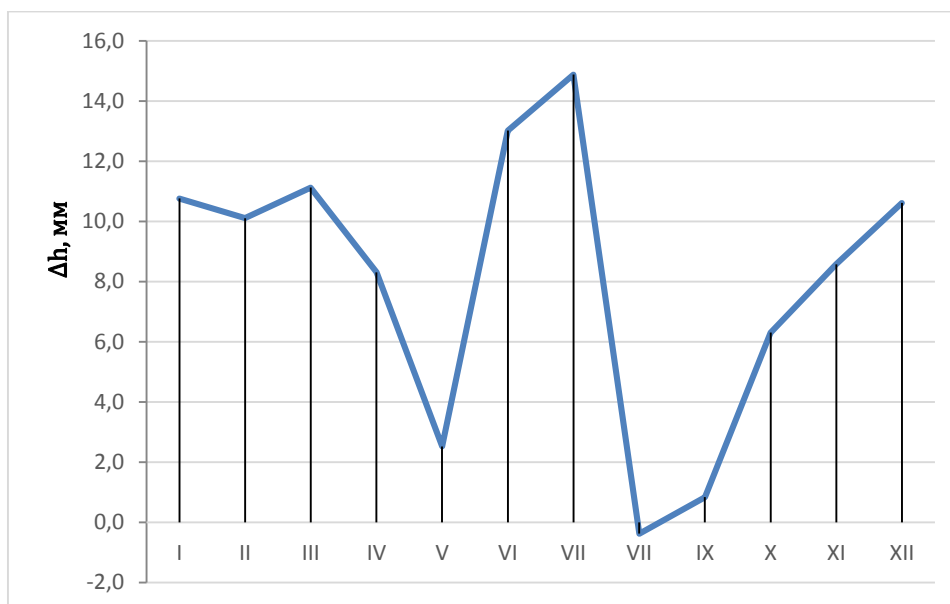


Рис.3.4. Різниці між місячними сумами атмосферних опадів, виміряними на опадомірних пунктах Чернівці – Університет і Чернівці – Аеропорт в 2000-2023рр., мм

Влітку основна кількість атмосферних опадів у Чернівцях випадає у вигляді злив (53,7%), при цьому повторюваність облогових опадів знижується до 45,4%, а мжичка зустрічається дуже рідко, 0,6%.

Значні різниці спостерігаються і в добових сумах опадів, сформованих, переважно, інтенсивними зливами, табл.3.5, 3.6.

Так, 28.06 2015 року різниця у кількостях опадів, вимірянних на метеостанціях Чернівці – Університет і Чернівці – Аеропорт, становила 14,7мм, а в 8 липня 2015 року – 26,5мм.

В окремих випадках помітні різниці у виміряних на опадомірних пунктах Чернівців добових сумах опадів спостерігаються і у зимовий сезон. Зокрема, 25.12.2015р. при випадінні зливогого снігу різниця у виміряних сумах опадів становило, 11,0мм, табл.3.7.

Таблиця 3.5

Шари атмосферних опадів, виміряні на метеостанціях Чернівці – Університет і Чернівці - Аеропорту червні 2015 року, мм.

Число	Шар опадів, мм по метеостанції	
	Чернівці-Університет	Чернівці-Аеропорт
1	6,2	1,0
2	8,1	8,0
3	24,5	18,0
4	0,7	0,3
5	1,0	0,9
13	1,5	3,0
14	1,9	0,6
15	0,0	6,0
16	6,0	4,0
17	4,6	0,6
18	5,2	7,0
19	0,0	0,6
20	1,8	0,4
21	0,0	0,2
22	30,9	25,0
23	56,8	42,0
24	1,3	1,3
25	5,5	6,0
26	45,0	38,0
27	3,2	0,5
28	33,4	18,7
29	29,5	22,0
30	18,2	15,0

Таблиця 3.6

Шари атмосферних опадів, виміряні на метеостанціях Чернівці – Університет і Чернівці - Аеропорту липні 2015 року, мм.

Число	Шар опадів, мм по метеостанції	
	Чернівці-Університет	Чернівці-Аеропорт
6	18,1	22,0
7	15,3	15,0
8	37,8	11,3
10	0,0	0,5
11	11,9	4,0
14	8,3	4,0
19	0,6	0,3
20	0,5	0,3
25	0,0	0,0
27	32,0	25,0
28	0,4	0,5

Таблиця 3.7

Шари атмосферних опадів, виміряні на метеостанціях Чернівці – Університет і Чернівці - Аеропорту грудні 2015 року, мм.

Число	Шар опадів, мм по метеостанції	
	Чернівці-Університет	Чернівці-Аеропорт
1	7,0	4,0
2	11,7	14,0
9	4,9	1,0
10	2,1	2,3
11	0,0	0,0
12	0,6	0,8
13	1,3	1,4
14	1,5	1,1
15	5,9	5,0
16	3,4	4,3
17	1,4	1,0
18	4,1	3,2
19	0,0	0,0
25	25,0	14,0
26	13,9	9,0
27	5,2	4,0
28	2,2	2,6

Нашими дослідженнями встановлено нерівномірність розподілу атмосферних опадів по території м.Чернівці. Різниця у річній сумі опадів, виміряній на території міста і фоновій місцевості, може перевищувати 100мм, що співмірно з місячними сумами опадів вологих літніх місяців і є статистично значимою. Водночас, визнати єдиною причиною виникнення такої різниці тільки впливом урбанізації було би некоректно. На територіях великих міст істотні відмінності у кількостях опадів можуть викликатись, у першу чергу, природними причинами – рельєфом місцевості і шорсткістю підстильної поверхні. З іншого боку, саме у містах внаслідок змін термічного режиму, випаровування і насичення атмосферного повітря ядрами конденсації техногенного походження, можуть відбуватися помітні зміни режиму зволоження. На територіях міст змінюються всі характеристики атмосферних опадів: їх кількість, тривалість, інтенсивність, число днів з різними сумами опадів.

Наразі, при проведенні наших досліджень не вдалось кількісно оцінити вплив урбанізації на режим зволоження м.Чернівці. Для відділення впливу міста від особливостей природної територіальної мінливості опадів необхідне проведення спеціальних досліджень. Насамперед, на території міста повинна бути обладнана більш щільна мережа опадомірних пунктів. Згідно існуючих рекомендацій ВМО (Всесвітньої метеорологічної організації) для 100% ймовірності реєстрації кількості опадів необхідне створення опадомірної мережі зі щільністю 1 пункт на 10км² [55]. Мережа опадомірних спостережень в м.Чернівці з площею 153км², в межах якої можуть бути виділені, як мінімум, чотири кліматично однорідні райони [6], повинна складатись з 10-12 пунктів.

3.3. Сучасні тенденції змін клімату міста

Як було зазначено вище, клімат міста, особливо – великого зазнає змін внаслідок впливу урбанізації. Глибина таких змін може бути різною, вона диференціюється рівнем техногенного навантаження на міське середовище. З іншого боку, клімат міста, як антропогенно модифікований клімат природно-кліматичної зони, в межах якої воно знаходиться, зазнає змін, притаманних усій кліматичній системі в цілому [10; 40].

Оцінка змін клімату Чернівців з таких позицій передбачає, по-перше, встановлення часових меж природного і антропогенно зміненого кліматичних періодів. Це питання, на перший погляд, здається простим, проте потребує вибору і обґрунтування підходу до свого практичного розв'язання. У практичній площині часова межа будь-якого періоду може бути визначена за тенденціями змін певного метеорологічного елемента в часі. Періодизація змін кліматичних умов може бути зроблена за характером змін двох основних елементів клімату – температури повітря і кількості атмосферних опадів. Принципово важливим є вибір елемента клімату, за яким виконуватиметься його періодизація. В Україні зміни клімату окремих географічних районів, в тому числі і великих міст, прийнято характеризувати

за варіаціями температур повітря. В Україні багаторічний хід температур повітря, в цілому, повторює зміни глобальної температури.

«Опубліковані результати досліджень кліматологів не дають чіткої відповіді на це питання. У кращому випадку мова йде про середину-кінець 70-х років минулого століття, коли відбувся перехід аномалії (відносно 1961-1990 рр.) глобальної температури повітря біля поверхні Землі від від'ємних до додатних значень. Більшість гідрологів також обирають ці терміни в якості відправної точки при проведенні власних досліджень. У багатьох випадках умовною межею початку періоду сучасних змін водного режиму обирається 1975 або 1980 рр. Між тим, проведені нами дослідження ходу аномалії середньорічної температури повітря для території України в цілому та для окремих її регіонів, зокрема, дають підставу стверджувати про певну помилковість такого вибору.» [2]

Осереднена різницева інтегральна крива відхилень від багаторічного значення середньої річної температури повітря для території України наведена на рис.3.8.

«Аналіз побудованого графіку дає підставу виділити конкретний рік, від якого можна вести початок періоду сучасного потепління в межах України. Таким є 1989 рік, якому передував мінімум кривої, що припав на 1988 р. Останній завершив п'ятирічку з від'ємними відхиленнями середньої річної температури повітря в Україні від кліматичної норми (1984-1988 рр.), яка включала досить холодні 1985 та 1987 роки з відхиленнями середньорічної температури від норми до $-1,5^{\circ}\text{C}$. Починаючи з 1989 р. і до сьогодні тільки три роки – 1993, 1996 та 1997 на території України характеризувались від'ємним відхиленням середньої річної температури повітря від кліматичної норми, яке не перевищувало 0,6 градуса. Важливим аргументом щодо вибору початку періоду сучасного потепління є те, що він чітко проявляється для всієї території країни.» [2]

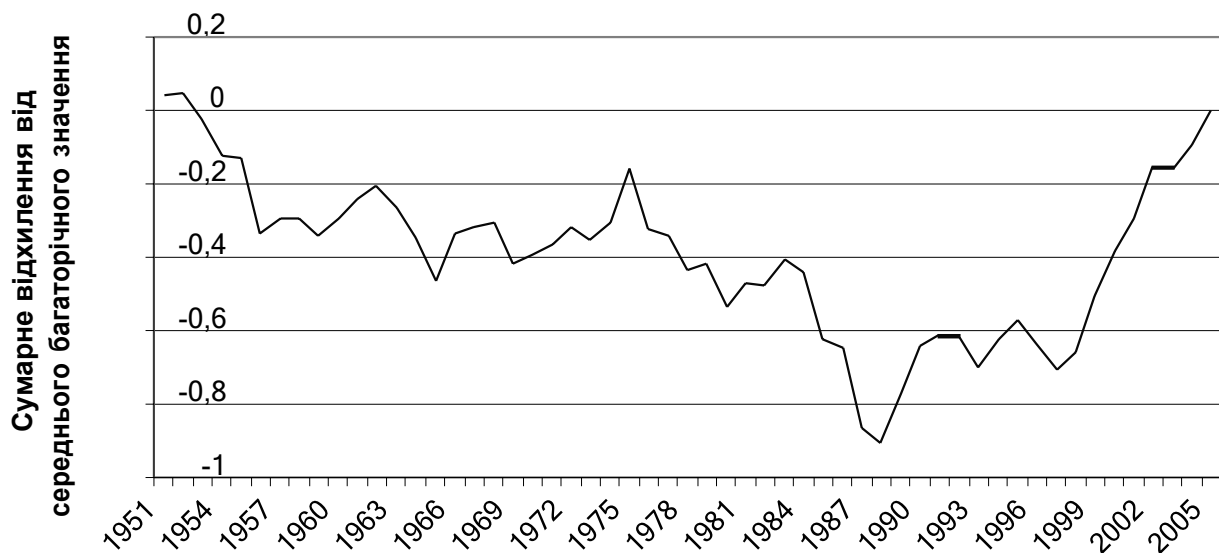


Рис.3.8. Різницева інтегральна крива відхилень від середнього багаторічного значення середньої річної температури повітря в межах України [2]

Зроблений для всієї території України висновок про час початку прояву глобального потепління підтверджується результатами аналізу різницевої інтегральної кривої річних температур повітря в м.Чернівці, рис.3.9.

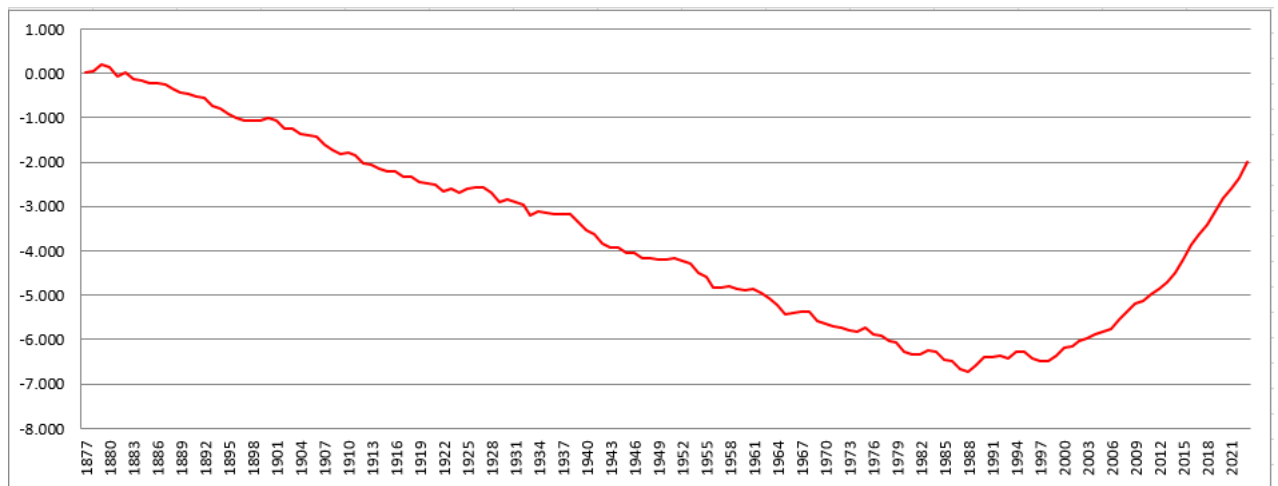


Рис.3.9. Різницева інтегральна крива середніх річних температур повітря в Чернівцях 1877-2023 рр.

З рис.3.9 видно, що у 1877-1988 роках термічний режим Чернівців був однорідним, температури повітря незначно коливались відносно кліматичної норми і були близькими до 7,8°C. Чітко встановлено, що період потепління розпочався у 1989 році і триває дотепер.

Кількісно варіації температур повітря в Чернівцях і темпи потепління характеризуються даними, наведеними в табл.3.8.

Таблиця 3.8

Середні за десятирічні проміжки часу річні температури повітря в м.Чернівці, 1977-2023рр.

Десятиріччя	Середня температура повітря, °С	Відхилення від норми, °С
1881-1890	7,8	-0,1
1891-1900	7,9	0,0
1901-1910	7,6	-0,3
1911-1920	7,7	-0,2
1921-1930	8,0	0,2
1931-1940	7,7	-0,2
1941-1950	7,8	-0,1
1951-1960	7,8	-0,2
1961-1970	7,7	-0,2
1971-1980	7,8	-0,1
1981-1990	8,2	0,2
1991-2000	8,5	0,6
2001-2010	9,2	1,2
2011-2023	10,3	2,4

Дані табл.3.8 показують, що протягом 110 років у Чернівцях середні річні температури повітря змінювались дуже мало, діапазон їх варіацій складав, у середньому, 0,2°C. Стрімке підвищення температур почалось після 1990 року, з кожним наступним десятиріччям відхилення від кліматичної норми подвоювалось. Середні значення температур повітря крайніх років періоду спостережень 2022 і 2023 перевищують 10°C і становлять, відповідно, 10,5 і 11,2°C. Очікується, що середня річна температура 2024 року, з огляду на аномально спекотний літній сезон, буде ще вищою.

Більш детально підвищення температур повітря в Чернівцях характеризується варіаціями значень середніх місячних і, відповідно, середніх сезонних температур повітря, табл.3.9.

Таблиця 3.9

Відхилення середніх місячних температур повітря в Чернівцях від кліматичної норми, 2000-2023рр.

Період осереднення температур	Середня місячна температура повітря, °C											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1961-1990	-4,9	-2,9	1,7	8,7	14,3	17,4	18,7	18,0	14,3	8,6	2,9	-1,9
2000-2010	-2,7	-0,8	3,8	10,7	15,9	18,4	20,8	20,0	14,3	9,1	4,6	-1,6
Δt , °C	+2,2	+2,1	+2,1	+2,0	+1,6	+1,0	+2,1	+2,0	0,0	+0,5	+1,9	+0,3
2011-2023	-2,2	-0,8	4,3	10,8	15,6	19,8	21,4	20,9	16,1	9,8	4,6	0,3
Δt , °C	2,7	2,1	2,6	2,1	1,3	2,4	2,7	2,9	1,8	1,2	1,7	2,2
2000-2023	-2,4	-0,8	4,1	10,8	15,7	19,1	21,1	20,4	15,2	9,4	4,6	-0,6
Δt , °C	2,5	2,1	2,4	2,1	1,4	1,7	2,4	2,4	0,9	0,8	1,7	1,3

Результати порівняння, наведені в табл.3.9 показують, що теплішими стали всі місяці року, проте підвищення температур було нерівномірним. Найбільше – на 2,4-2,5°C підвищились температури січня, березня, липня і серпня. На 2,1°C потеплішали лютий і квітень. Середні температури решти місяців підвищились на 0,8-1,7°C.

Відхилення від кліматичної норми середніх сезонних температур демонструють дані, наведені в табл.3.10.

Таблиця 3.10

Відхилення від кліматичної норми середніх сезонних температур в Чернівцях, 2000-2023рр.

Період осереднення	Зима XII-II	Весна III-V	Літо VI-VIII	Осінь IX-XI
1961-1990	-3,2	8,2	18,0	8,6
2000-2010	-1,7	10,1	19,7	9,3
Δt , °C	+1,5	+1,9	+1,7	+0,7
2011-2023	-0,9	10,2	20,7	10,2
Δt , °C	+2,3	+2,0	+2,7	+1,6
2000-2023	-1,3	10,2	20,2	9,7
Δt , °C	+1,9	+2,0	+2,2	+1,1

Як і середні місячні, підвищились температури всіх сезонів року. Зимовий, весняний і літній сезони стали теплішими на 1,9, 2,0 і 2,2°C відповідно. Середні температури осіннього сезону підвищились незначно.

Загальноприйнятим стереотипом є думка про те, що підвищення температур повітря завжди повинно супроводжуватись зменшенням кількості атмосферних опадів, тобто повинна спостерігатись прогресуюча аридизація клімату. В дійсності ситуація є зовсім іншою: підвищення середніх річних температур повітря в Чернівцях не супроводжується зменшенням кількості атмосферних опадів. Загальне уявлення про режим атмосферних опадів у Чернівцях дає графік, наведений на рис.3.10.

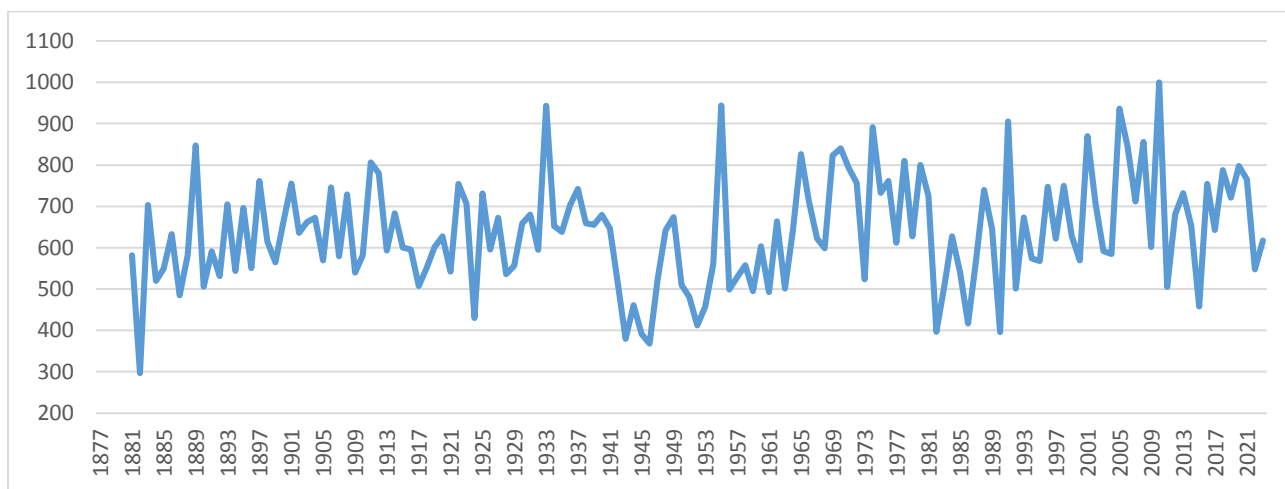


Рис.3.10 Зміни річних сум атмосферних опадів в Чернівцях, 1881-2023 рр.

Протягом досліджуваного періоду в Чернівцях було зареєстровано кілька випадків малих річних сум опадів, в одному з них – з аномально малою їх річною кількістю, табл.3.11.

Таблиця 3.11

Посушливі роки в Чернівцях, 1877-2023рр.

Рік	Середня річна температура, °С	Річна сума опадів, мм	Частка від норми, %
1882	9.0	297	47
1924	7.6	430	68
1946	8.4	368	58
1952	7.8	412	62
1982	8.3	397	60
1986	8.1	417	63
1990	9.9	396	60

Аномально низькою є річна кількість опадів у 1882 – 297мм. Наразі нам не вдалось перевірити коректність цього значення, проте більш обґрунтованими для Чернівців є мінімальні річні суми опадів, близькі до 400мм. Найбільшими, протягом періоду спостережень, були суми атмосферних опадів, які перевищували 900мм: 943, 944 та 1000мм у 1933, 1955 та 2010 роках відповідно.

Тенденції змін режиму зволоження можуть бути встановленими за різницевою кривою річних сум опадів, рис.3.11.

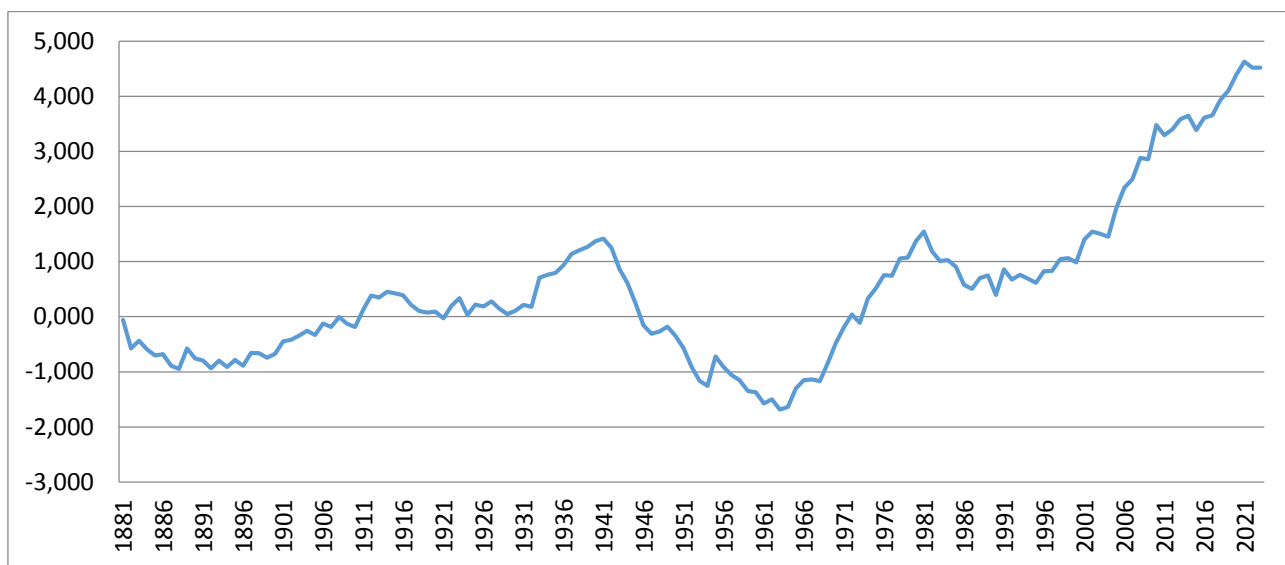


Рис.3.11. Різницева інтегральна крива річних сум опадів в Чернівцях, 1881-2023 рр.

Найважливішою сучасною тенденцією змін режиму зволоження в Чернівцях є збільшення річних сум опадів, яке почалось у 1962 році і, наразі, триває дотепер. Слід зазначити, що при збереженні загальної тенденції до зростання кількості опадів їх річні суми у 2022 і 2023 роках були меншими за кліматичну норму.

Загальні тенденції змін термічного режиму і режиму зволоження можуть бути простеженими за варіаціями показника аридності клімату, зокрема – індексу аридності Де-Мартонна. Багаторічний характер змін температур повітря, сум атмосферних опадів і індексу аридності в Чернівцях демонструють різницеві інтегральні криві, рис.3.12

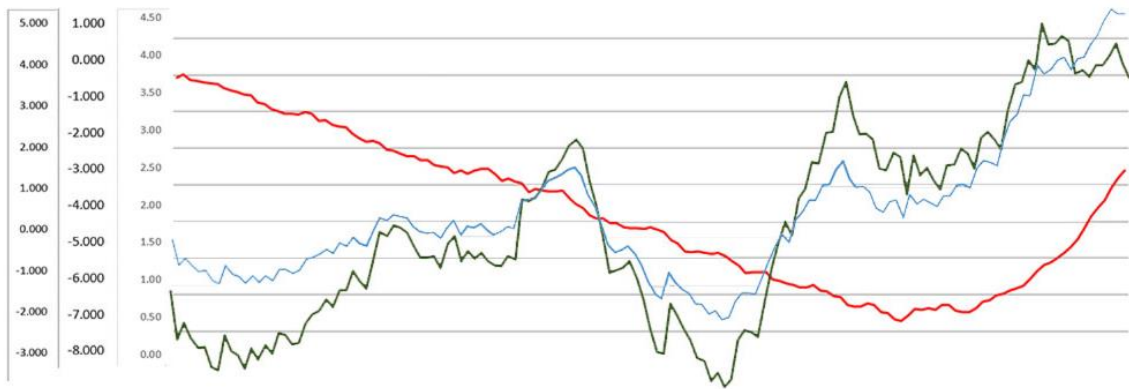


Рис.3.12. Зміни середніх річних температур повітря, річних сум опадів і індексу аридності в Чернівцях, 1881-2023 рр.

Хід індексу аридності з 1962 по 2023 рік показує наявність досить чітко вираженого позитивного тренду, який свідчить про відсутність тенденції аридизації клімату Чернівців.

Висновки

1. Внаслідок інтенсивного антропогенного впливу на території міста формується своєрідний міський клімат, який є техногенною модифікацією клімату природної зони, в межах якої знаходиться місто.
2. На території міста змінюються всі елементи клімату, у першу чергу – підвищуються температури повітря, формується «острів тепла». Зміненість фонових кліматичних характеристик на території міста визначається рівнем антропогенного навантаження, інтегральною характеристикою якого виступає чисельність населення.
3. Антропогенні зміни середніх річних температур повітря в Чернівцях є незначними, їх середнє багаторічне значення становить $0,2^{\circ}\text{C}$, що дозволяє стверджувати про наявність «острова тепла» над центральною частиною міста. Зміни температур повітря за коротші проміжки часу (доба – кілька годин) є помітно більшими і становлять $1-2^{\circ}\text{C}$. Такі зміни температурного режиму є характерними для міст України з населенням близько 300тис.
4. На території Чернівців спостерігається помітна нерівномірність у розподілі атмосферних опадів. Для двох опадомірних пунктів – метеостанцій Чернівці-Університет і Чернівці-Аеропорт вони, в середньому, за 20-ти річний період становлять 100мм, що співмірно з кількістю опадів вологого літнього місяця. Складовими такої різниці є як вплив урбанізації, так і природні фізико-географічні чинники. Для відділення впливу міста від особливостей природної територіальної мінливості опадів необхідне проведення спеціальних досліджень.
5. Часовою межею змін термічного режиму в Чернівцях може вважатись 1989рік. Середні річні температури повітря помітно зростають. При значенні кліматичної норми у $7,8^{\circ}\text{C}$ межа у $8,5^{\circ}\text{C}$ була перевищена у 1999 році, після 2013 року середні річні температури

стали вищими за 10°C. Теплішими стали всі місяці і сезони року, найбільше – на 2,3 і 2,7°C, стали, відповідно, зима і літо.

6. Підвищення температур повітря не призвело до зменшення кількості атмосферних опадів. У багаторічному ході їх річних сум, починаючи з 1963 року, простежується тенденція до зростання. Чіткий позитивний тренд у ході індексу Де-Мартона свідчить про відсутність про, наразі, тенденції до аридизації клімату Чернівців.

Література

1. Гребенюк Н.П. Про зміни температури повітря в містах України у процесі урбанізації / Н.П. Гребенюк, М.Б. Барабаш // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 148-154.
2. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) / В.В. Гребінь. – К.: Ніка-Центр, 2010. – 316 с.
3. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь/ [С.П. Іванюта, О.О. Коломієць, О.А. Маліновська, Л.М. Якушенко]: за ред. С.П. Іванюти. – К.: НІСД, 2020. – 110 с.
4. Клімат України / За ред.. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
5. Кліматичний кадастр України (електронна версія) Державна гідрометеорологічна служба; УкрНДГМІ; Центральна геофізична обсерваторія. – К., 2006.
6. Ландшафти міста Чернівці: Монографія / За ред.. В.М. Гуцуляка. – Чернівці: Рута, 2006. – 168 с.
7. Николаєв А. Зміни клімату міста Чернівці у період глобального потепління/ А. Николаєв, С. Гуцул, Ю. Тимофеева// Наук. вісник Чернівецького університету: Зб. наук. праць. – Вип. 847: Географія. – Чернівці: Чернівецький нац.. ун-т, 2024. – С. 108-124.
8. Николаєв А.М. Зміни елементів клімату Чернівців під впливом глобального потепління/ А.М. Николаєв, Ю.Ф. Шевчук// Наук. вісник Чернівецького університету: Зб. наук. праць. – Вип. 724-725: Географія. – Чернівці: Чернівецький нац.. ун-т, 2014. – С. 43-49.
9. Осадчий В.І. Динаміка температур повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень / В.І. Осадчий та ін. – К.: Ніка-Цент, 2013. – 308 с.
10. Шевченко О. Зміна клімату та українські міста: прояви та проєкції до кінця ХХІ століття на основі RCP – сценаріїв / О.В. Шевченко, С.С. Сніжко //

- Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Географія. – Вип. 2(75). – 2019. – С. 11-18.
11. Школьний Є.П. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації / Є.П. Школьний, І.Д. Лосєва, Л.Д. Гончарова. – К.: Міносвіти України, 1989. – 600 с.
 12. Bastin J, Clark E, Elliott T, Hart S, van den Hoogen J, et al. 2019. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. PLOS ONE 14(7):e0217592
 13. Bechtel B, Alexander PJ, Böhner J, Ching J, Conrad O, et al. 2015. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 4:199–219
 14. Bokwa A, Hajto MJ, Walawender JP, Szymanowski M. 2015. Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. Theor. Appl. Climatol. 122:365–82
 15. Chen, F., Bornstein, R., Grimmond, S., Li, J., Liang, X., Martilli, A., Miao, S., Voogt, J., and Wang, Y. (2012). Research priorities in observing and modeling urban weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**(11), 1725–1728.
 16. Connors, J., Galletti, C., and Chow, W. L. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona *Landscape Ecology* **28**(2), 271–283.
 17. de Vos L, Leijnse H, Overeem A, Uijlenhoet R. 2017. The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam. Hydrol. Earth Syst. Sci. 21:765–77
 18. Demuzere M, Bechtel B, Middel A, Mills G. 2019. Mapping Europe into local climate zones. PLOS ONE 14(4):e0214474
 19. Depietri Y, McPhearson T. 2018. Changing urban risk: 140 years of climatic hazards in New York City. Clim. Change 148:95–108

20. Dobrovolný, P. (2013). The surface urban heat island in the city of Brno (Czech Republic) derived from land surface temperatures and selected reasons for its spatial variability. *Theoretical and Applied Climatology* **112**(1–2), 89–98.
21. Emmanuel, R., and Krüger, E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment* **53**(0), 137–149.
22. Hamdi, R., and Schayes, G. (2008). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology* **28**(7), 973–982.
23. Han, J. -Y., Baik, J. -J., and Lee, H. (2014). Urban impacts on precipitation, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **50**(1), 17–30.
24. Holmer, B., and Eliasson, I. (1999). Urban–rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology* **19**(9), 989–1009.
25. Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment* **31**(22), 3821–3831.
26. Kalnay, E., and Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* **423**(6939), 528–531.
27. Katsoulis, B. D., and Theoharatos, G. A. (1985). Indications of the urban heat island in Athens, Greece. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **24**(12), 1296–1302.
28. Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., and Mauri, E. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics *Resources, Conservation and Recycling* **64**, 23–29.
29. Langendijk G, Rechid D, Jacob D. 2019. Urban areas and urban–rural contrasts under climate change: What does the EURO-CORDEX ensemble tell us?—Investigating near surface humidity in Berlin and its surroundings. *Atmosphere* **10**(12):730

30. Lee K, Kim Y, Sung HC, Ryu J, Jeon SW. 2020. Trend analysis of urban heat island intensity according to urban area change in Asian mega cities. *Sustainability* 12:112
31. Lindberg F, Thorsson S, Rayner D, Lau K. 2016. The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustain. Cities Soc.* 25:1–12
32. Matsumoto J, Fujibe F, Takahashi H. 2017. Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan. *J. Environ. Sci.* 59:54–62
33. Meier F, Fenner D, Grassmann T, Otto M, Scherer D. 2017. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Clim.* 19:170–91
34. Middel A, Lukasczyk J, Zakrzewski S, Arnold M, Maciejewski R. 2019. Urban form and composition of street canyons: a human-centric big data and deep learning approach. *Landscape Urban Plan.* 183:122–32
35. Mikami, T., Ando, H., Morishima, W., Izumi, T., and Shioda, T. (2003). A new urban heat island monitoring system in Tokyo. In *Fifth International Conference on Urban Climate*, Lodz, Poland.
36. Mishra, V., Ganguly, A. R., Nijssen, B., and Lettenmaier, D. P. (2015). Changes in observed climate extremes in global urban areas. *Environmental Research Letters* **10**(2), 024005.
37. Muller CL, Chapman L, Grimmond CSB, Young DT, Cai X. 2013. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *Int. J. Climatol.* 33(1):585–600
38. Oke, T. R. (1978). *Boundary Layer Climate*. Routledge.
39. Oke, T. R. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* **84**(1–3), 179–190.
40. Oke, T. R. Urban climates / Timothy R. Oke, University of British Columbia [and three others]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
41. Oleson KW, Bonan GB, Feddema J, Jackson T. 2011. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *Int. J. Climatol.* 31:1848–65

42. Phelan PE, Kaloush K, Miner M, Golden J, Phelan B, et al. 2015. Urban heat island: mechanisms, im- plications, and possible remedies. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40:285–307
43. Ramamurthy P. 2017. Heatwaves and urban heat islands: a comparative analysis of multiple cities. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 122:168–78
44. Richards, K. (2005). Urban and rural dewfall, surface moisture, and asso- ciated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada. *Boundary-Layer Meteorology* **114**(1), 143–163.
45. Rinner, C., and Hussain, M. (2011). Toronto’s urban heat island—Explor- ing the relationship between land use and surface temperature *Remote Sensing* **3**(6), 1251–1265.
46. Robaa, S. M. (2003). Urban-suburban/rural differences over greater Cairo, Egypt. *Atmosfera* **16**(3), 157–171.
47. Schatz J, Kucharik CJ. 2014. Seasonality of the urban heat island effect in Madison, Wisconsin. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 53:2371–86
48. Sfîca L, Ichim P, Apostol L, Ursu A. 2018. The extent and intensity of the urban heat island in Iași city, Romania. *Theor. Appl. Climatol.* 134:777–91
49. Sismanidis, P., Keramitsoglou, I., and Kiranoudis, C. T. (2015). A satel- lite-based system for continuous monitoring of Surface Urban Heat Islands. *Urban Climate* **14**(Part 2), 141–153.
50. Sobral, H. R. (2005). Heat island in São Paulo, Brazil: Effects on health. *Critical Public Health* **15**(2), 147–156.
51. Stone, B. (2007). Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities: 1951–2000. *International Journal of Climatology* **27**(13), 1801–1807.
52. Streutker, D. R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment* **85**(3), 282–289.
53. Tam, B. Y., Gough, W. A., and Mohsin, T. (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day-to-day temperature variation. *Urban Climate* **12**(0), 1–10.

54. Tayanc, M., and Toros, H. (1997). Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey. *Climatic Change* 35(4), 501–524.
55. World Meteorol. Organ. (WMO). 2018. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Geneva: WMO.
<http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-Guide.html>