

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Кафедра екології та біомоніторингу

Оцінка якості атмосферного повітря міста Чернівці
за даними станцій громадського моніторингу

Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Виконала:
студентка 2 курсу 203-М групи
спеціальності 101 Екологія
Ангеліни КІНАЩУК
Науковий керівник:
к.б.н., асист. Оксана ЗАРОЧЕНЦЕВА
Рецензент:

До захисту допущено:
Протокол засідання кафедри № 6
від « 27 » листопада 2025 р.
зав. кафедри _____ проф. Марія ФЕДОРЯК

Чернівці – 2025

АНОТАЦІЯ

Кінашук А.В. Оцінка якості атмосферного повітря за даними станцій громадського моніторингу міста Чернівці. *Кваліфікаційна робота другого (магістерського) рівня вищої освіти. Спеціальність 101 Екологія. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. Чернівці, 2025.*

У роботі проаналізовано багаторічні дані шести автоматизованих станцій громадського моніторингу атмосферного повітря м. Чернівці щодо концентрацій дрібнодисперсних частинок PM_{2,5} та PM₁₀. Встановлено середньодобові рівні, просторово-часові закономірності та сезонні коливання аерозольного навантаження. Показано переважно «добрий» та «допустимий» рівень індексу якості повітря за класифікацією ЕЕА, водночас зафіксовано перевищення рекомендацій ВООЗ у холодний період року. Виявлено слабкий та помірний вплив метеорологічних чинників на варіації концентрацій частинок.

Ключові слова: дрібнодисперсні тверді частинки PM_{2.5}, PM₁₀, якість атмосферного повітря, забруднюючі речовини, громадський моніторинг

ABSTRACT

Kinashchuk A.V. Assessment of Air Quality Based on Data from Public Air-Monitoring Stations in Chernivtsi. *Qualification work of the second (master) level of higher education. Specialty 101 Ecology. Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University. Chernivtsi, 2025.*

The paper analyzes long-term data from six automated civic air quality monitoring stations in Chernivtsi on concentrations of fine particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀. Average daily levels, spatial-temporal patterns, and seasonal variations of aerosol load were identified. Air quality index was found to be predominantly “good” and “fair” according to the EEA classification; however, exceedances of WHO guideline values were recorded during the cold season. A weak to moderate influence of meteorological factors on particulate matter concentration variability was revealed.

Key words: particulate matter PM_{2.5}, PM₁₀, atmospheric air quality, air pollutants, public monitoring

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

_____ **Ангеліна КІНАЩУК**

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	5
1.1.....Екологічні та нормативні аспекти вивчення основних забруднювачів атмосферного повітря	5
1.2. Системи моніторингу якості атмосферного повітря: міжнародний та український підходи	11
1.3. Можливості та обмеження систем громадського моніторингу якості атмосферного повітря	25
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	31
2.1. Об'єкт, предмет та матеріали дослідження.....	31
2.2. Опис регіону дослідження	32
2.3. Методологія проведення дослідження	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	37
3.1. Аналіз якості повітря м. Чернівці за даними станцій моніторингу SaveEcoSensor	37
3.2. Оцінка впливу погодних умов на вміст PM _{2,5} та PM ₁₀ за допомогою регресійного аналізу	54
ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	61
ДОДАТКИ	69
ДОДАТОК А. Теплограми для PM _{2,5} та PM ₁₀ на основі парного t-тесту за критерієм Стюдента.....	70
ДОДАТОК Б. Техніка безпеки	75

ВСТУП

Актуальність роботи. Інтенсивний розвиток транспорту, промисловості та урбанізованих територій в усьому світі призвів до кількісної та якісної зміни атмосферних викидів. За даними міжнародних організацій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я (World Health Organization, WHO), велика частина населення планети дихає повітрям, у якому концентрації основних забруднювачів перевищують рекомендовані рівні (WHO, 2021). У звіті Європейського агентства з охорони навколишнього середовища (European Environment Agency) зазначається, що забруднення повітря стабільно входить до переліку ключових глобальних екологічних загроз, впливаючи як на здоров'я населення, так і на стан екосистем (EEA, 2023). В Україні ситуація не є винятком: якість атмосферного повітря в багатьох регіонах характеризується незадовільними показниками, що підтверджується результатами спостережень національних та регіональних моніторингових служб (Гринчишин, 2023; Ломазов і Павличенко, 2023).

У відповідь на ці виклики останніми роками спостерігається активне впровадження сучасних автоматизованих систем моніторингу атмосферного повітря. До таких систем входять і мережі громадського моніторингу, які ґрунтуються на використанні доступних датчиків, здатних забезпечувати оперативний збір та передачу даних. Перевагою цих станцій є безперервний режим роботи, що дозволяє отримувати актуальну інформацію про стан повітря у будь-який момент часу. Крім того, дані від громадських станцій часто транслиуються в режимі реального часу на відкритих онлайн-платформах, що дає можливість миттєво відстежувати індекс забруднення атмосфери та динаміку його змін (Орлова, 2024; Васенко та ін., 2023).

В умовах урбанізації, збільшення транспорту та промислових викидів, офіційні станції часто розміщують недостатньо щільно, а їх мережа не охоплює всю територію; low-cost та громадські системи дають змогу більш гнучко реагувати на локальні зміни якості повітря. Міжнародний досвід показує, що мережі низькозатратних (low-cost) сенсорів у громадському

моніторингу – корисні: вони здатні забезпечувати високу щільність покриття, виявляти «гарячі точки» забруднення, доповнювати офіційні станції, особливо в зонах з недостатньою інфраструктурою (Cassard et al., 2020)

Особливої актуальності громадський моніторинг набуває в українських реаліях. Значна частина стаціонарних постів державної системи спостережень є технічно застарілою, потребує модернізації, а їхня кількість є недостатньою для забезпечення репрезентативного покриття території країни. У містах середнього розміру, зокрема Чернівцях, це створює інформаційні прогалини, що ускладнює своєчасну оцінку стану атмосферного повітря, аналіз ризиків для здоров'я населення та прийняття ефективних управлінських рішень.

Таким чином, громадський моніторинг якості атмосферного повітря відіграє значущу роль у формуванні сучасної системи екологічного контролю, доповнюючи офіційні мережі спостереження та забезпечуючи доступність даних для населення, органів влади й дослідників. Отже, дослідження ефективності, можливостей та обмежень громадських моніторингових мереж є своєчасним і необхідним для підвищення якості екологічних оцінок та прийняття управлінських рішень у сфері охорони атмосферного повітря.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз якості атмосферного повітря в м. Чернівці за вмістом дрібнодисперсних твердих частинок на основі даних 6 станцій громадського моніторингу.

Відповідно до мети поставлені такі **завдання**:

- проаналізувати добову, тижневу та сезонну динаміку просторово-часових варіацій дрібнодисперсних частинок PM_{2,5} і PM₁₀ 6 станцій SaveEcoSensor м. Чернівці за грудень 2023 – жовтень 2025 рр.;
- порівняти середньодобові концентрації дрібнодисперсних частинок PM_{2,5} і PM₁₀ з вимогами національних і міжнародних стандартів;
- визначити вплив температури повітря, вологості та атмосферного тиску на коливання вмісту дрібнодисперсних частинок PM_{2,5} і PM₁₀ в повітрі м. Чернівці.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Екологічні та нормативні аспекти вивчення основних забруднювачів атмосферного повітря

Забруднення атмосферного повітря вважається екологічним фактором ризику світового масштабу (WHO, 2021; European Council Directive, 2008). Небажані умови якості повітря сьогодні є однією з найважливіших екологічних проблем, особливо в промислових містах, країнах, що розвиваються та мегаполісах (ЕЕА, 2023). Sicard зі співавторами зазначає що саме даний чинник зумовив зростання передчасної смертності не лише в містах, але і в сільській місцевості (Sicard et al., 2023). Разом з тим, забруднення повітря чинить негативний вплив й на інші живі організми, біорізноманіття екосистем та екосистемні послуги в цілому.

Забруднення атмосферного повітря – це будь-яка зміна властивостей чи газового складу повітря, які можуть спричинити негативний вплив на здоров'я живих організмів та екосистем в цілому. Ступінь забруднення атмосферного повітря і характер його розповсюдження залежить від кількісних характеристик забруднювачів, що потрапляють в атмосферу (Коваленко, Фоменко, 2019).

За класифікацією забруднення атмосферного повітря поділяються на природні та штучні. До першого типу належить забруднення спричинене вулканічною діяльністю, вітровою ерозією, вивітрюванням гірських порід, димом від лісових чи степових пожеж, пилок квіткових рослин. До другого типу відносять викиди різних полютантів в основному утворені від антропогенної діяльності. Поширеною є також класифікація шкідливих речовин за агрегатним складом, яка виділяє: газоподібні (наприклад, діоксид сульфуру SO_2 , оксид нітрогену NO , діоксид карбону CO_2 , озон O_3), тверді (наприклад, важкі метали, такі як свинець (Pb) і його сполуки, ртуть (Hg), кадмій (Cd); канцерогенні речовини, смолянисті речовини, пил органічний і

неорганічний, сажа й ін.) та рідкі (наприклад, розчини солей, кислоти, луги та тощо) (Karri et al., 2024).

Наукова стаття Гельмута Маєра присвячена аналізу складного процесу забруднення повітря у містах, яке виникає внаслідок взаємодії природних та антропогенних факторів. Автор детально описує шлях забруднення, що включає викиди від основних джерел, таких як автотранспорт, а також атмосферну передачу, під час якої відбувається розсіювання, розчинення та фотохімічні реакції забруднюючих речовин (Рис. 1.1).



Рис. 1.1. Схема шляхів забруднення атмосферного повітря (Mayer, 1999)

Його дослідження підтверджує часову мінливість рівня забруднювачів (зокрема, NO і O_3), демонструючи типові річні, тижневі та добові цикли на прикладі даних в м. Штутгарта. Зважаючи на те, що багато мегаполісів, особливо у країнах, що розвиваються, перевищують норми ВООЗ, Майєр наголошує на нагальній потребі у впровадженні комплексних і обов'язкових до виконання планів управління якістю повітря (Mayer, 1999).

На сьогодні основними антропогенними джерелами поллютантів, що забруднюють атмосферне повітря є автомобільний транспорт, теплова енергетика, металургійні підприємства, виробництво будматеріалів нафтовидобувна та нафтохімічна промисловість (Karri et al., 2024).

Значна частка щоденних і повсюдних поллютантів в будь-якій місцевості відводиться викидам автотранспорту. Їх шкідливість, перш за все, обумовлена тим, що з вихлопними газами двигунів внутрішнього згорання у навколишнє повітря потрапляє велика кількість токсичних сполук, таких як бензапірен, альдегіди, сполуки свинцю, оксиди нітрогену і вуглецю тощо. Найбільша кількість забруднюючих речовин надходить до атмосфери при розгонці автомобіля, рухові з малою швидкістю, гальмуванні та під час роботи двигуна на холостому ходу (Singh, 2023).

За складом всі забруднювачі можна розділити на механічні забруднювачі та хімічні забруднювачі. Механічне забруднення складається з дрібнодисперсних частинок, що відокремлюються при механічному впливі на предмети. Наприклад, відділення дрібнодисперсних частинок гуми від автомобільних шин внаслідок поверхневого тертя; утворення пилу внаслідок переміщення або скидання сипучих матеріалів (таких як пісок, цемент, тощо); через подрібнення металеві поверхні тощо, що призводить до відділення частинок шліфувального пилу. Хімічні забруднювачі включають речовини органічного та неорганічного походження, що вступають в хімічні реакції з іншими речовинами. Наприклад, продукти повного і неповного окиснення (NO_x , CO , CO_2 , CH_4), випаровування паливно-мастильних матеріалів (бензин, дизельне паливо, нафта та ін.) (Karri et al., 2024).

З точки зору впливу на здоров'я людини найбільш шкідливими забруднювачами повітря є приземний озон (O_3), дрібні частинки ($PM_{2,5}$) і діоксид азоту (NO_2) (Sicard et al., 2023; Anenberg et al., 2022). Останнім часом все більшу увагу привертають тверді частинки (ТЧ, *Particulate Matter* (PM) – це суміш дрібнодисперсних твердих та рідких частинок в повітрі, які є достатньо малими, щоб не осідати на поверхню Землі під дією гравітації (Salami, Poroola, 2023; Guo et al., 2023).

Класифікуються тверді частинки за їхнім аеродинамічним діаметром. За походженням поділяють на *первинні* – ті, що викидаються в атмосферу безпосередньо внаслідок антропогенної діяльності, процесів горіння або вітру, та *вторинні* – ті, що утворюються в атмосфері в результаті перетворення газоподібних забруднюючих речовин (Salami, Poroola, 2023; Parvez et al., 2017; Poroola et al., 2018). Ці атмосферні домішки можуть зберігатися у повітрі протягом тривалого часу, легко переноситися потоками на значні відстані та проникати у глибокі відділи дихальної системи, минаючи природні захисні механізми організму. Крім того, ультрадисперсні частинки здатні утримувати на своїй поверхні високотоксичні органічні й неорганічні речовини, що сприяє формуванню ще більш небезпечних для здоров'я комплексів (Karri et al., 2024).

Нижче узагальнено інформацію з наукових джерел (Guo et al., 2023; Salami, Poroola, 2023; Karri et al., 2024) та складено порівняльну таблицю фракцій твердих частинок (табл. 1.1)

Таблиця 1.1

Узагальнена інформація щодо фракцій твердих частинок

Тип фракції / Розмір	Основні джерела надходження	Вплив на здоров'я людини (довгострокова експозиція)
PM10 (≤ 10 мкм)	Викиди, пов'язані з дорожнім рухом (через ресуспензію пилу). Також включають природні частинки, такі як пісок і пилові бурі (SDS).	Збільшення смертності від усіх причин, серцево-судинних (ССЗ) та респіраторних захворювань.

PM2.5 ($\leq 2,5$ мкм)	Є головним забруднювачем. Утворюються внаслідок спалювання. Викиди від дизельних транспортних засобів (через чорний вуглець). Частинки із зовнішнього повітря, які проникають у приміщення.	Вважається, що довготривалий вплив має суттєвий і глибокий вплив на здоров'я. Збільшення смертності від усіх причин, ССЗ (включаючи ішемічну хворобу серця), раку легень та респіраторної смертності.
PM1 (≤ 1 мкм)	Може містити шкідливі та токсичні речовини, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні.	Вплив на здоров'я є значним, але досліджень, зосереджених саме на цій фракції, мало.
Чорний вуглець (BC) / Елементарний вуглець (EC)	Сажоподібний вуглець, продукт згоряння. Основним джерелом є дорожній рух, особливо дизельні транспортні засоби.	Підвищений ризик серцево-судинної та респіраторної смертності. Для BC AQG не сформульовані, замість них надаються рекомендації щодо доброї практики. На придорожніх станціях може становити 17–32% від PM2.5.
Ультратонкі частинки (UFP) ($\leq 0,1$ мкм)	Частинки з діаметром $\leq 0,1$ мкм. Основним джерелом є спалювання та транспортні засоби.	Викликають занепокоєння через потенційний вплив на здоров'я. AQG для UFP не були сформульовані через брак кількісних доказів незалежного впливу.
Пісок і пилові бурі (SDS) (Природні частинки)	Природні явища, що піднімають частинки вітром з пустельних або сухих територій. Джерела: вітрова ерозія ґрунту, сільськогосподарська діяльність, опустелювання.	ВООЗ не формулювала числових AQG для SDS. Можуть спричиняти порушення здоров'я.

Колектив авторів на чолі з Венхуа вперше оцінили глобальний тягар смертності, пов'язаний із короткостроковим впливом дрібнодисперсних частинок (PM2.5), охоплюючи два десятиліття з 2000 по 2019 рік. Дослідження виявило, що в середньому близько 1 млн передчасних смертей щороку у світі були спричинені цим гострим забрудненням повітря, що становить понад 2% від загальної кількості смертей. Географічно цей летальний тягар є найвищим

в Азії та Африці, причому значна частина випадків (понад 22%) припадає на густонаселені міські райони (Wenhua et al., 2024).

Барзегар зі співавторами вивчав довгострокові тенденції концентрацій основних забруднювачів повітря – PM₁₀, PM_{2.5} та O₃ – у місті Тебріз, Іран, протягом періоду 2006–2017 рр. Автори використали статистичні методи та програму AirQ+ ВООЗ для оцінки впливу на здоров'я мешканців. Хоча спостерігалось невелике зниження концентрації твердих частинок (PM), рівень озону залишався майже незмінним, що призводило до значної кількості випадків захворювань та смертей, особливо через ішемічну хворобу серця та хронічний бронхіт. Зрештою, дослідження робить висновок про брак ефективних стратегій управління та контролю забруднення повітря у місті протягом досліджуваного періоду (Barzeghar et al., 2020).

Зменшення запиленості атмосферного повітря забезпечують шляхом регулярного прибирання вулиць, їх миття спеціалізованою технікою, а також завдяки розширенню площ зелених насаджень, парків і скверів. Проте багато українських міст через обмежені фінансові ресурси не можуть систематично проводити такі заходи, що негативно позначається на рівні якості повітря.

Окремим суттєвим чинником погіршення стану атмосферного повітря є стрімке зростання кількості автомобільного транспорту, частка якого сьогодні становить близько двох третин загального обсягу міських викидів. Для регулювання та зменшення шкідливих викидів у світі застосовують екологічні стандарти для транспортних засобів, серед яких найпоширенішими в Європі є EURO 1–EURO 6. Кожен наступний стандарт передбачає нижчі допустимі концентрації забруднювальних речовин. Для зниження негативного впливу транспорту дедалі активніше впроваджують екологічніші альтернативи – електромобілі та гібридні автомобілі, що характеризуються значно меншими викидами (Singh, 2023).

Директива ЄС 2008/50/ЄС була розроблена для встановлення уніфікованих цілей щодо якості атмосферного повітря в Європі, консолідуючи та замінюючи попередні розрізнені нормативні акти для підвищення прозорості та

адміністративної ефективності. Її основна мета полягає у запобіганні та зменшенні шкідливого впливу забруднення на здоров'я людини та навколишнє середовище, зокрема шляхом встановлення обов'язкових граничних значень і цільових показників для ключових забруднювачів, таких як дрібні частинки (PM_{2,5}) та озон. Документ вимагає від держав-членів проводити постійний моніторинг та оцінку повітря в спеціально визначених зонах, використовуючи стандартизовані методи вимірювання. У випадках, коли ці ліміти перевищені, Директива зобов'язує розробляти комплексні плани покращення якості повітря та запроваджувати механізми співпраці для боротьби з транскордонним забрудненням (European Commission Directive, 2008).

Після встановлення стандартів якості повітря та прийняття політики контролю викидів (European Council Directive, 2008; European Council Directive 2016/2284/EC, 2016) в усьому світі стрімко зросла кількість станцій моніторингу якості повітря. Наприклад, ініційовано збір даних та подання звітів по замірах O₃ в атмосферному повітрі зі станцій моніторингу по всій планеті (Schultz et al., 2017). Крім того, до уваги беруться і супутникові спостереження, які дозволяють отримати моделі переносу хімічних речовин і дані з мереж наземного моніторингу для покращення прогнозів їх динаміки і оцінки впливу на населення (Hammer et al., 2020; Anenberg et al., 2022; Southerland et al., 2022).

1.2. Системи моніторингу якості атмосферного повітря: міжнародний та український підходи

Забруднення атмосферного повітря є не лише локальним чи регіональним, а світовим викликом, що потребує термінових і комплексних заходів для його подолання. Організація системи моніторингу якості атмосферного повітря є базовим елементом екологічної політики більшості країн світу, оскільки дозволяє оперативно відстежувати рівні забруднення, оцінювати ризики для здоров'я населення та формувати ефективні

управлінські рішення. У європейських державах такі системи функціонують відповідно до вимог директив ЄС, що встановлюють єдині стандарти вимірювання, типи моніторингових постів, методики відбору проб та критерії якості даних.

Система контролю якості атмосферного повітря в країнах Європейського Союзу регулюється низкою нормативних актів, що встановлюють вимоги до допустимих рівнів забруднювачів та методів їх вимірювання. До ключових документів належать: Директива 1999/32/ЄС, яка обмежує вміст сірки в рідкому паливі; Директива 98/70/ЄС щодо стандартів якості бензину та дизельного палива; Директива 2004/42/ЄС, спрямована на зменшення викидів летких органічних сполук із фарб і лаків; Директива 94/63/ЄС, що регламентує контроль ЛОС під час зберігання та транспортування бензину; Директива 2008/50/ЄС, яка визначає загальні вимоги до моніторингу та оцінювання стану атмосферного повітря; а також Директива 2004/107/ЄС, що встановлює нормативи для As, Cd, Hg, Ni та поліциклічних ароматичних вуглеводнів у повітрі.

У ЄС вимірювання поллютантів здійснюється за такими показниками: діоксид та оксид азоту, діоксид сірки, тверді частинки PM₁₀ та PM_{2,5}, бензол, оксид вуглецю, свинець, озон. Втім останній здійснюється за певних умов і нормується окремими вимогами. При цьому, всі європейські стандарти передбачають рекомендовані вимоги щодо встановлення небезпечних граничних рівнів не лише для здоров'я людини (поріг небезпеки), але й для екосистем (критичний рівень) (European Commission Directive, 2008).

Система глобального моніторингу якості атмосферного повітря включає:

- функціонування розгалуженої мережі станцій моніторингу;
- інтеграцію вимірювань показників якості повітря з метеорологічними спостереженнями;
- використання автоматизованих платформ для збору, обробки та передачі даних;

- наявність стратегій розвитку, технічної підтримки та модернізації моніторингової інфраструктури;
- застосування ефективних комунікаційних інструментів для інформування про стан атмосферного повітря.

Загалом якісно організацію системи моніторингу стану атмосферного повітря, що проводиться у європейських країнах можна відобразити наступним чином (рис. 1.2)



Джерело: Guidance on Assessment under the EU Air Quality Directives (European Commission), адаптовано.

Рис. 1.2. Демонстрування вибору методу вимірювання полютантів у повітрі при проведенні системи моніторингу у європейських країнах

На даний момент країни Європейського Союзу ініціювали програму PMP (Particle Measurement Program) для розробки нової системи вимірювання UFP, що викидається транспортними засобами. Крім того, система пройшла розвиток від стендових випробувань до високоточної, портативної, швидкої, онлайнової та на місці технології вимірювання та створила відповідні методи моніторингу, технології та стандартні системи (Wang et al., 2023).

Моніторинг викидів від стаціонарних джерел також дуже важливий, оскільки більшість забруднювачів повітря викидається саме з них. В останні роки система постійного моніторингу викидів (CEMS) стала дійсним засобом

моніторингу викидів зі стаціонарних джерел.

У зарубіжних країнах, таких як Сполучені Штати, Європейський Союз і Японія, CEMS повністю замінює ручний моніторинг і широко застосовується для нагляду за стаціонарними джерелами. На даний момент широко використовуються існуючі технології моніторингу викидів та деякі оптичні методи, наприклад GRIMM Mini-WRAS або Differential Mobility Analyzer (DMA). Деякі з таких автоматичних пристроїв, що використовуються при проведенні мобільного та стаціонарного моніторингу якості повітря наведені на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Приклади різноманітності сучасних технологій, що використовуються при проведенні мобільного та стаціонарного моніторингу у світі (Wang et al., 2023)

В останні роки науковцями фахівцями, дослідниками тощо надається низка повідомлень про створення системи моніторингу повітря на основі безпроводних сенсорних мереж, які, зазвичай, являють собою мініатюрні обчислювальні пристрої, так звані моти, оснащені сенсорами-фіксаторами не лише метеоданих, але й концентрацій шкідливих речовин у повітрі, що надають отриману інформації в режимі реального часу. Так, наприклад, у м. Кембридж (Велика Британія) фахівцями Гарвардського університету встановлена одна з таких мереж – CitySense, яка складається зі 100 мотів (сенсорних вузлів) і збирає дані показників повітря (температури, вологості, концентрації поллютантів). Така ж безпроводна сенсорна мережа у м. Лондон в режимі реального часу реєструє шкідливі речовини, що викидаються автотранспортом. Система моніторингу атмосферного повітря о. Маврикій (Індонезія) здійснюється підрозділом моніторингу забруднення повітря (The Air Pollution Monitoring Unit – APMU) та представлена бездротовою сенсорною мережею, яка охоплює усю територію острова і щодня збирає дані про якість повітря, у режимі реального часу, зазначаючи про підвищення чи пониження рівнів поллютантів (Некос, Молодан, 2021).

Європейська агенція з охорони навколишнього середовища запровадила Європейський Індекс якості повітря, який включає дані з >2 тис. станцій по всій Європі, що включені до глобальної сітки моніторингу атмосферного повітря «Copernicus» (Рис. 1.4). При цьому розрахунок даного Індексу здійснюється за такими основними показниками: вміст аерозольних твердих частинок пилу різних фракцій (PM_{2,5} та PM₁₀), озону, діоксиду азоту та діоксиду сірки. Також кожен параметр оцінюється відповідно до вимог Директиви Європейського Союзу.

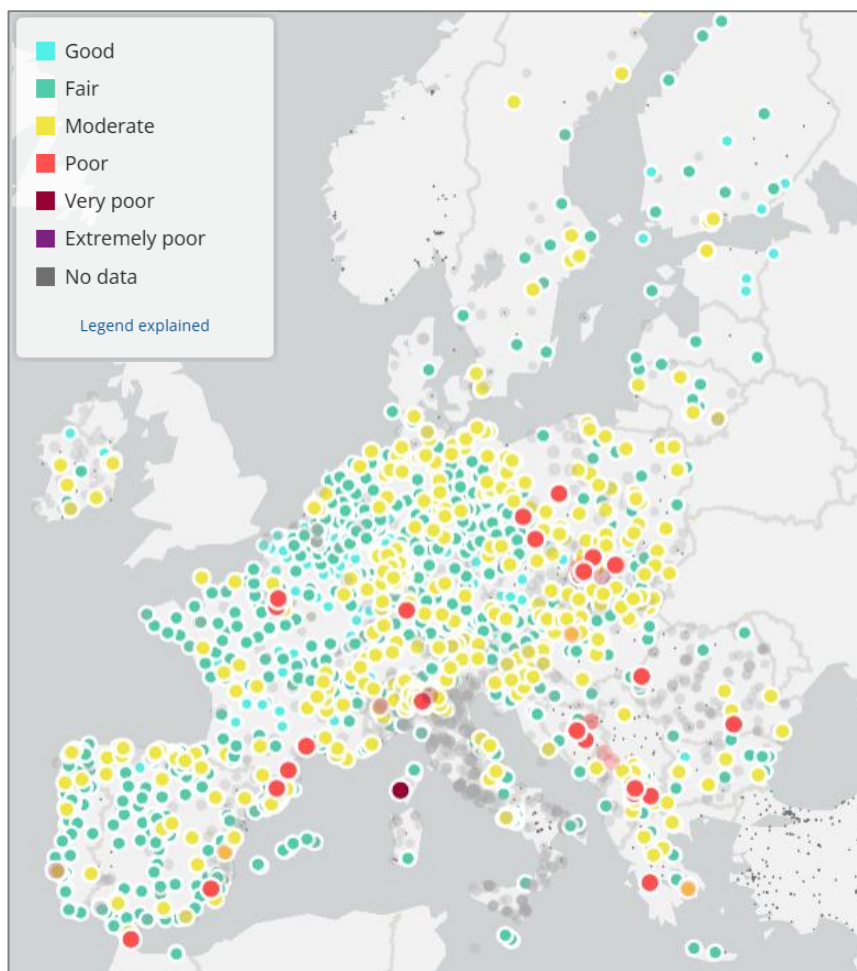


Рис. 1.4. Мапа станцій моніторингу за якістю атмосферного повітря в Європі

Служба моніторингу атмосфери Copernicus (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS) є частиною програми спостереження Землі Європейського Союзу Copernicus, розпочала роботу в липні 2015 року. Її головна мета – моніторинг нашої планети та її довкілля для забезпечення суспільних потреб. CAMS є однією з шести тематичних інформаційних служб Програми спостереження Землі «Copernicus», впроваджена Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) як справді європейська ініціатива. Станом на березень 2022 року охоплює понад 23 500 прямих користувачів даних та понад 200 мільйонів кінцевих користувачів у всьому світі. CAMS надає численні глобальні та регіональні інформаційні продукти про якість повітря, викиди на основі кадастрів та потоки парникових газів на поверхні, що виникають внаслідок спалювання біомаси, сонячної

енергії, озону та ультрафіолетового випромінювання, а також кліматичні впливи, що базуються на спостереженнях (Peuch et al., 2022).

На рис. 1.5 показано впровадження виробничих систем CAMS та потоків даних. Він включає чотири основні елементи: отримання та попередню обробку вхідних даних спостережень із супутників та приладів *in situ*, а також допоміжних даних, необхідних для оцінки викидів забруднюючих речовин та парникових газів; моделювання та асиміляція даних для глобальних продуктів; ансамблеве моделювання та асиміляція даних для регіональних європейських продуктів; та створення різних додаткових продуктів та послуг.

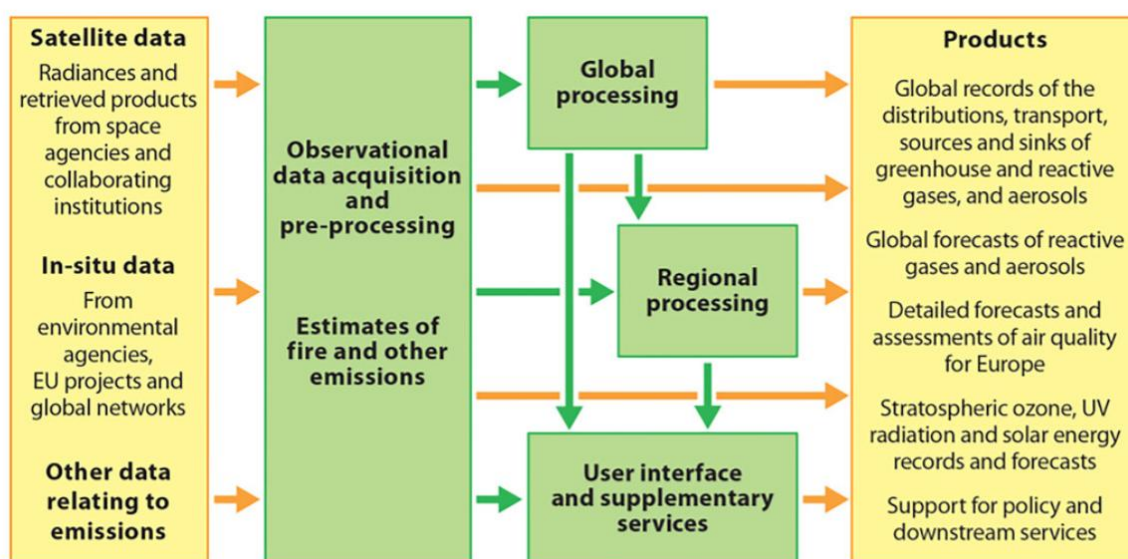


Рис. 1.5. Схема основних внутрішніх потоків даних та інформації CAMS (зелений колір), помаранчеві стрілки вказують на потік даних у сервіс та потік продуктів до постачальників послуг нижче за течією та кінцевих користувачів

Доступ до продуктів CAMS є відкритим та безкоштовним через сховище даних про атмосферу. Глобальні аналізи, прогнози та повторні аналізи складу атмосфери CAMS базуються на Інтегрованій системі прогнозування (IFS) ECMWF та використовують понад 90 різних потоків супутникових даних (Peuch et al., 2022).

Для організації системи моніторингу атмосферного повітря та кращого його розуміння часто створюються моделі якості повітря, які використовуються для прогнозування зміни атмосферного повітря, аналізу

спостережень і реконструкції хімічного складу атмосфери за попередні та на майбутні десятиліття. CAMS-GLOB-TEMPO – база даних реєстру, що містить набір даних глобальних і європейських часових профілів викидів, і надає місячні, щоденні, щотижневі та погодинні вагові коефіцієнти для моделювання хімії атмосфери. Включає часові профілі (TEMPOral-профілі) для пріоритетних забруднювачів повітря (NO_x ; SO_x ; NMVOC, неметанові леткі органічні сполуки; NH_3 ; CO ; PM_{10} і $\text{PM}_{2,5}$) і парникових газів (CO_2 і CH_4) для окремих категорій антропогенних джерел: енергетична промисловість, житлове спалювання, обробна промисловість, транспорт і сільськогосподарська діяльність (рис. 1.6) (Guevara et al., 2020).

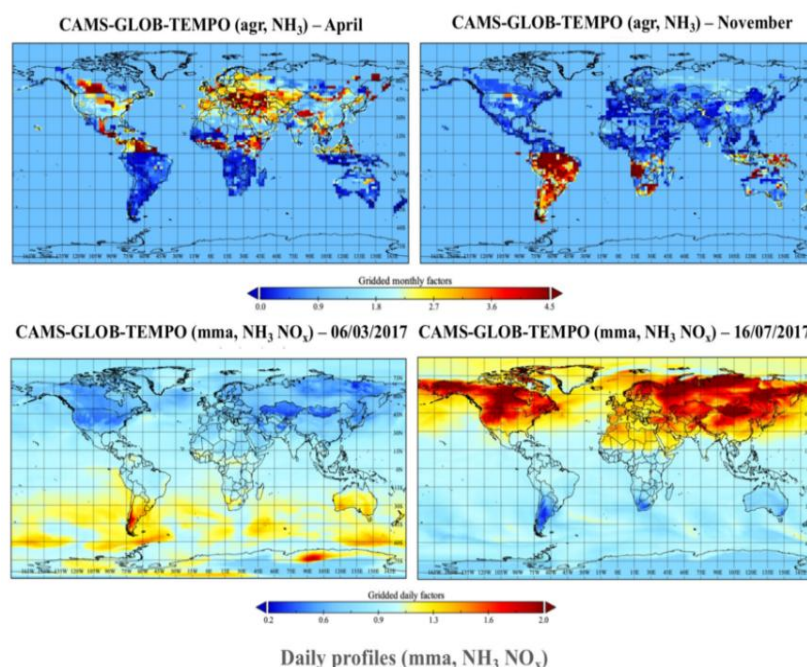


Рис. 1.6. Приклад TEMPOral-профілів, побудованих на основі бази даних CAMS-GLOB- для сільського господарства (agr), викидів NH_3 і тваринництва (mma) для Іспанії та Аргентини за 2010 та 2017 роки відповідно

Система CEDS (Community Emissions Data System) – це глобальна база даних про викиди, створена в Об'єднаному глобальному дослідницькому інституті (Joint Global Change Research Institute, JGCRI) у Меріленді (США) та підтримувана Національною лабораторією імені Пацифік Нортвест. CEDS є відкритою платформою, яка використовує прозорі алгоритми оброблення даних для побудови щорічних оцінок викидів різних атмосферних поллютантів. Система

формує глобальні карти викидів із просторовою роздільною здатністю $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ та надає часові ряди на місячному рівні, що робить її однією з найповніших баз для кліматичних і атмосферних досліджень (Hoesly et al., 2018).

CEDS акумулює показники викидів у понад 57 економічних секторах і охоплює період від 1750 до 2019 р., що дозволяє аналізувати довгострокову динаміку антропогенних джерел забруднення. Серед ключових речовин, за якими ведеться облік, – такі гази й частинки, як SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC, CO, CO_2 , CH_4 , N_2O , BC (чорний вуглець), OC (органічний вуглець). Такий набір охоплює основні коротко- і довгоживучі кліматичні полютанти, а також речовини, важливі для оцінки якості повітря (рис. 1.7).

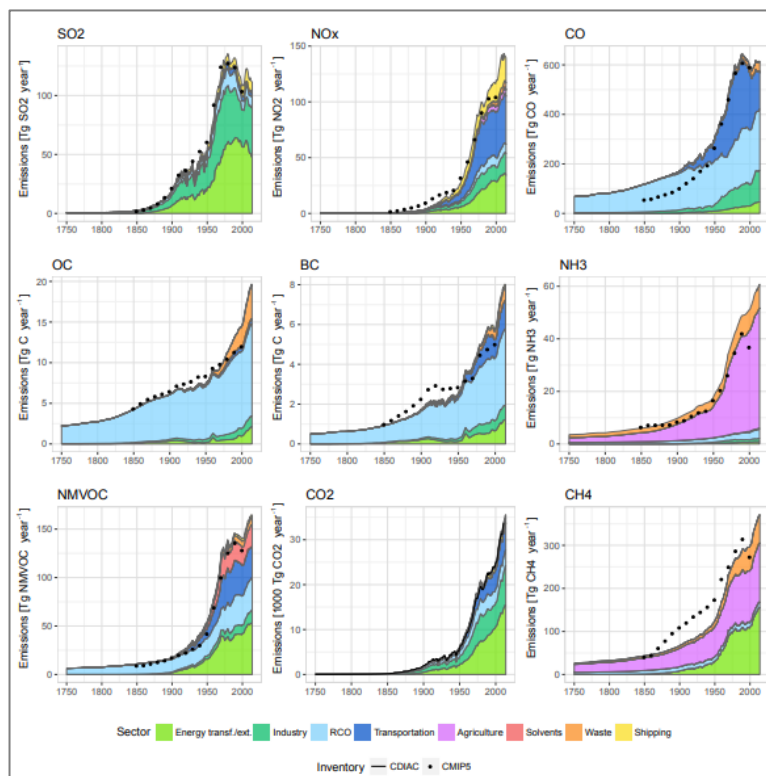


Рис. 1.7. Приклад візуалізації даних антропогенних викидів та аерозолів за сукупними секторами, отриманих за допомогою бази даних CEDS

NASA GIOVANNI (GES-DISC Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure) – це інтерактивна онлайн-платформа, яка забезпечує доступ до обширних глобальних даних NASA, отриманих з мережі супутникових інструментів та наземних спостережень. Система розроблена для того, щоб користувачі могли швидко переглядати, аналізувати та

завантажувати атмосферні, кліматичні й океанологічні дані без потреби працювати зі складними сирими файлами.

За допомогою GIOVANNI можна отримати інформацію про концентрації хімічних компонентів атмосфери (озон, NO₂, SO₂, CO та ін.), показники температури та вологості повітря, вміст водяної пари, аерозольні властивості, кількість опадів, вміст хлорофілу в океані та параметри температури поверхні моря (рис. 1.8). Інтерфейс дозволяє будувати різні типи графіки – двовимірні карти, часопросторові діаграми, профілі, графіки Гаульмеллера (Hovmöller), а також створювати анімації. Дані завантажуються із кількох віддалених серверів NASA, що забезпечує актуальність і широкий спектр доступної інформації (Malings, 2023)

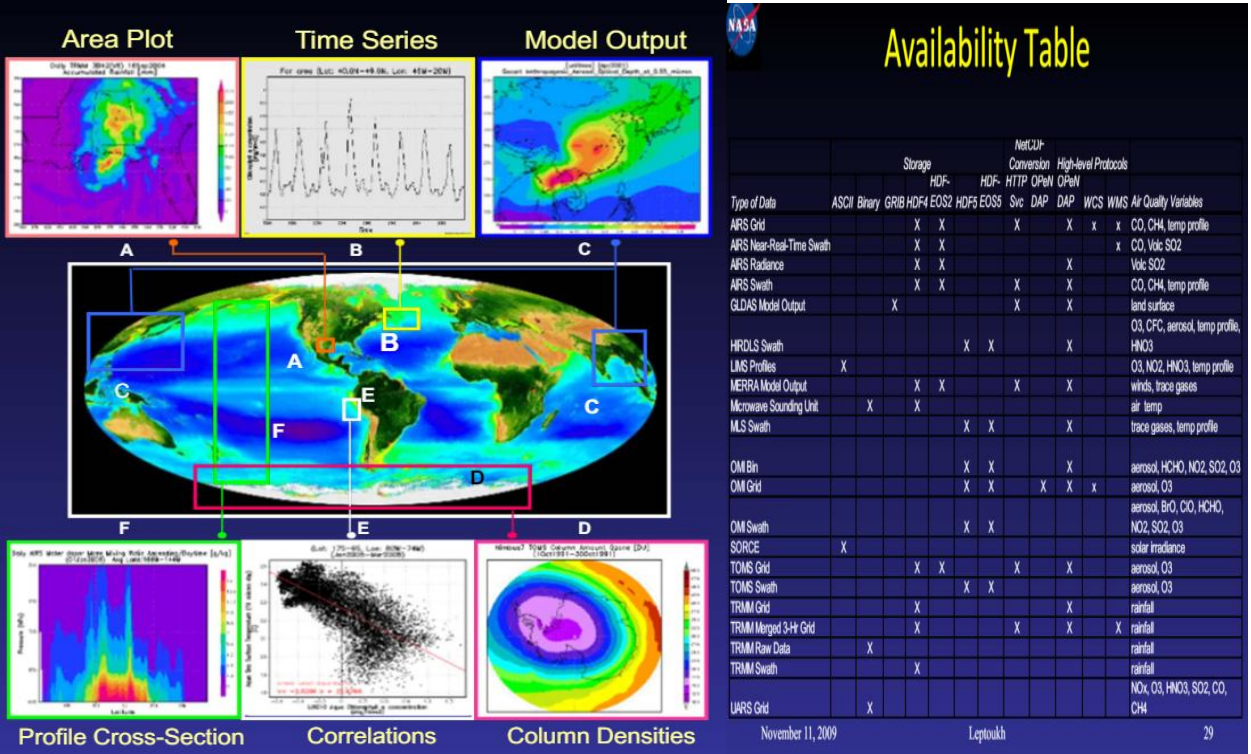


Рис. 1.8. Приклади візуалізації даних, отриманих з NASA GIOVANNI

В 1998 р. в Україні було затверджено «Положення про державну систему моніторингу довкілля», яка у 2024 р. втратила чинність, натомість в дію вступила Постанова Кабінету Міністрів «Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем» (Деякі питання функціонування, 2024). Головною метою функціонування цієї системи є

передбачення можливих змін у стані довкілля та формування науково обґрунтованих рекомендацій для ухвалення рішень, спрямованих на запобігання негативним екологічним наслідкам і забезпечення дотримання вимог екологічної безпеки.

Основні завдання суб'єктів державної системи моніторингу довкілля:

- забезпечення проведення безперервних, довгострокових, систематичних спостережень за станом довкілля відповідно до програм моніторингу підсистем системи моніторингу;
- забезпечення єдності вимірювань у підсистемах системи моніторингу;
- збирання, зберігання та оброблення даних спостережень, забезпечення їх достовірності та об'єктивності;
- збирання, оброблення, проведення аналізу, зберігання інформації та обмін екологічною інформацією, одержаною в результаті проведення моніторингу довкілля, вплив на стан довкілля та прогнозування його змін;
- оприлюднення екологічної інформації, одержаної в результаті проведення моніторингу довкілля та його складових, забезпечення доступу до неї;
- розроблення науково обґрунтованих рекомендацій в галузі охорони навколишнього природного середовища;
- інформаційне обслуговування органів державної влади, зокрема забезпечення здійснення звітності за міжнародними договорами України в галузі охорони навколишнього природного середовища, органів місцевого самоврядування, а також забезпечення населення інформацією про стан довкілля;
- періодичне визначення та подання пропозицій щодо внесення змін до переліку інформаційних потреб управління в галузі охорони навколишнього природного середовища (Деякі питання функціонування, 2024)..

Система спостереження за станом атмосферного повітря в Україні працює відповідно до «Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 827. Згідно з цим документом, до проведення моніторингу залучені такі установи: Міністерство захисту

довкілля та природних ресурсів, Міністерство охорони здоров'я, Державна служба з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Державне агентство з управління зоною відчуження, обласні державні адміністрації та виконавчі органи міських рад (Порядок здійснення...., 2019).

На державному рівні моніторинг якості атмосферного повітря здійснюється Українським гідрометеорологічним центром у 53 містах і територіях. Для цього використовується 162 стаціонарних, 2 маршрутних пости спостереження, та 2 станції транскордонного переносу повітря (Екологічний моніторинг....,2025; Немченко, Кучменко, Компанець, 2023).

На сьогодні державна мережа постів контролю якості повітря складається переважно зі стаціонарних постів типу «Пост-2», які функціонують у структурі Українського гідрометеорологічного центру. Такі пункти розміщені головню в обласних центрах та містах із розвиненою промисловістю. Їхня кількість є недостатньою для формування повної просторової картини стану атмосферного повітря як у великих містах, так і в менших населених пунктах чи сільській місцевості (Деякі питання функціонування, 2024).

Пост спостереження представляє собою спеціальний павільйон, обладнаний приладами для проведення приладами для забору проб та оцінки вмісту забруднюючих речовин. Приклад роботи стаціонарного поста державної мережі спостережень та склад його основних елементів наведено на рис. 1.9. Вимірювання за «повною програмою» виконуються щодня у фіксовані часові інтервали – о 1:00, 7:00, 13:00 та 19:00 за місцевим часом (за винятком неділі, коли спостереження не проводять; у суботу – змінний графік). У деяких випадках може застосовуватися і зміщений режим відбору проб. До переліку параметрів, які визначають у межах повної програми, належать 7 забруднюючих речовин: пил, діоксид азоту (NO_2), діоксид сірки (SO_2), монооксид вуглецю (CO), формальдегід, свинець та бенз(а)пірен. Деякі станції здійснюють спостереження за додатковими забруднюючими речовинами (Деякі питання функціонування, 2024; Екологічний моніторинг....,2025).



Рис. 1.9. Приклад стаціонарного поста спостережень за якістю атмосферного повітря (Пост №4 – м. Чернівці, вул. О.Гузар, 1)

В Україні діють гігієнічні нормативи щодо максимально допустимого вмісту забруднювачів у атмосферному повітрі. Проте вони орієнтовані здебільшого на вплив цих речовин на людину. Натомість при формуванні екологічних стандартів беруть до уваги ширший спектр факторів: фізичні та біологічні умови, клімат, вже існуючий рівень забруднення в регіоні, можливий трансграничний переніс забруднювачів. Такі підходи передбачають оцінку впливу не лише на людей, а й на природні екосистеми – рослин, тварин, весь ландшафт довкілля.

Якщо порівняти організацію національного моніторингу та європейського, то в Україні збір даних про полютанти здійснюється, зазвичай, на стаціонарних постах моніторингу, натомість європейський підхід передбачає неперервність спостережень у просторі. В останньому випадку територія країн-членів розподіляється на агломерації та зони. До агломерацій відносять передмістя і міста з населенням >250 тис. ос., іноді й інші території (згідно вимог законодавства тієї чи іншої країни) (Ткачук, Мазур, 2024).

В Україні основні дані отримують на окремих точках населеного пункту, натомість в країнах Європи вимірювання проводять у трьох напрямках: точні прямі вимірювання концентрацій забруднювачів в повітрі; індикаторні вимірювання спрямовані на виявлення забруднювачів у повітрі; моделювання стану повітря в регіоні на основі отриманих фіксованих та індикативних вимірів. В сукупності так досягається постійний моніторинг стану атмосферного повітря. Даний підхід дозволяє зменшити кількість пунктів спостереження, але водночас забезпечує повноцінну систему моніторингу стану повітря. Оскільки, у випадку високих концентрацій забруднювачів у атмосферному повітрі, надійде сповіщення від системи індикативного моніторингу, і фіксуватимуться точні вимірювання вмісту поллютантів. Адже якщо повітря умовно чисте, а вміст шкідливих речовин відносно низький, то немає необхідності проводити точні вимірювання і достатньо здійснювати індикативні виміри (Гусев, Легка, 2023).

Відмінними також є вимоги щодо кількості постів спостереження, адже у населених пунктах України в рази їх більше за аналогічні нормативи ЄС. Наприклад, якщо для українських міст з населенням ~3 млн. ос. вимагається 10-20 станцій моніторингу (табл.1.2), то директива ЄС передбачає 4 пости.

Таблиця 1.2

Визначення кількості стаціонарних постів спостереження

Чисельність населення, тис. осіб	<50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	>2000
Кількість постів, шт.	1	2	3	3-5	5-10	10-15	15-20

В Україні на окремих постах можуть відрізнятися принципи вимірювання. Наприклад, у м. Київ на багатьох станціях ведеться реєстрація ~20 поллютантів, втім поділ завислих частинок на PM10 та PM2.5 не ведеться. Також поза увагою залишається низка поширених більш токсичних речовин: бензену, миш'яку, ртуті. Крім того, програма спостережень у ЄС організовується, виходячи з порогових рівнів, і у випадку їх перевищення,

впроваджується відповідний вид моніторингу. Тобто, якщо при здійсненні індикаторного моніторингу тривалий час фіксуються сигнали про наявність високих концентрацій поллютантів у повітрі, тоді здійснюється моніторинг, спрямований на визначення прямих точних вимірювань. Це дозволяє зосередитись на ключових збудниках того чи іншого регіону дослідження, а не вимірювати велику кількість речовин (Ткачук, Мазур, 2024; Гусєв, Легка, 2023).

Дещо схожим у проведенні моніторингу повітря в національному та європейському підході є використання Індексів якості повітря, що є комунікаційним інструментом, спрямованим на донесення до широкого загалу громадськості інформації про поточний стан забруднення повітря. Адже для більшості населення самі по собі показники (вмісту фенолу, сірководню тощо) є незрозумілими, натомість їх інтегрування в узагальнений Індекс якості (Common Air Quality Index, CAQI: погодинний, щоденний та щорічний), який відображає зв'язок між отриманими реальними значеннями моніторингу і наслідками для здоров'я людини, є більш зрозумілим і краще сприймається суспільством.

Таким чином, аналіз світового досвіду вказує на перспективність та ефективність сенсорних мереж моніторингу як аналізаторів якості атмосферного повітря. Втім на сьогодні в Україні та країнах ЄС існує низка відмінностей в організації моніторингу якості атмосферного повітря. Адже національна моніторингова система спирається в основному на стаціонарні пости та дискретні виміри поллютантів у повітрі. Натомість, в ЄС діє різнопланова менш затратна і водночас більш гнучка система моніторингу.

1.3. Можливості та обмеження систем громадського моніторингу якості атмосферного повітря

В останні роки в Україні впроваджують автоматизовані системи спостереження за атмосферним повітрям, які працюють у безперервному режимі та дозволяють отримувати дані в реальному часі. Інформація з цих систем доповнює мережу стаціонарних пунктів спостережень. Стан і якість атмосферного повітря в різних регіонах України залишають бажати кращого (Чугай, Лавров, 2022).

Система громадського моніторингу передбачає залучення громадян та громадських організацій до спостережень за станом навколишнього середовища. Останні кілька років все частіше можна побачити та почути про такі ініціативи як SaveEcoBot, EcoCity тощо. Розглянемо детальніше наявну інформацію та порівняємо згадані мережі громадського моніторингу.

SaveEcoBot – додаток, який дозволяє стежити за якістю повітря в режимі реального часу 24/7, бот об'єднує майже всі станції громадського моніторингу країни і надає актуальну інформацію в реальному часі щодо стану довкілля по всій Україні. У додатку є можливість підписатися на конкретну станцію та отримувати щогодинні сповіщення про стан повітря. У веб-версії є можливість перегляду мапи України із різними шарами, які можна вмикати по чергово: мапа якості повітря, мапа радіаційного фону, мапа пожеж та напрямку вітру, мапа якості води (рис 1.10), які надають актуальну інформацію в реальному часі (Лавров, 2022).

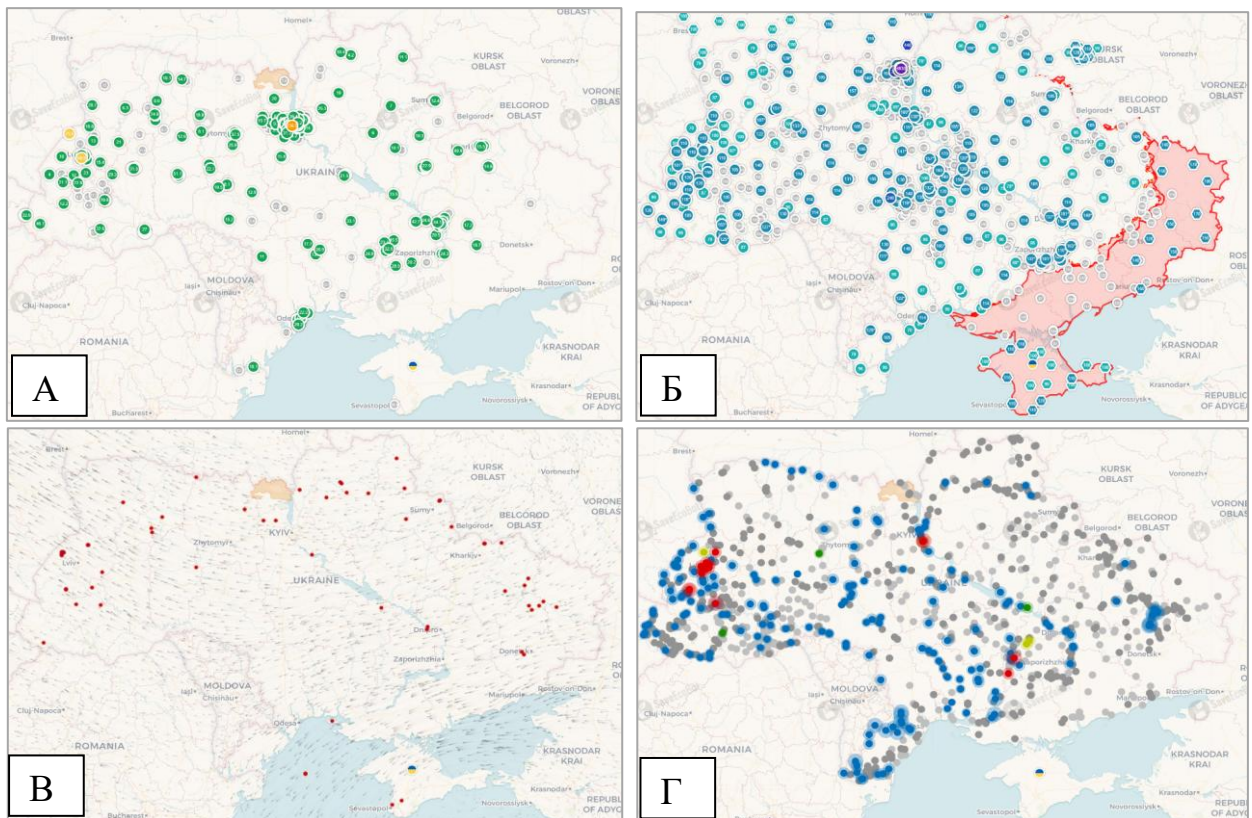


Рис. 1.10. Інтерактивні мапи сайту SaveEcoBot:

А – мапа якості повітря; Б – мапа радіаційного фону; В – мапа пожеж та напрямку вітру; Г – мапа якості води

Крім того, при натисканні на конкретну станцію є можливість перегляду не лише актуальної інформації щодо рівня забруднення повітря у даний момент, але і за попередні 48 годин. Також можна отримати узагальнену інфографіку, наприклад по місту за довший період часу – останній тиждень, місяць, 3, 6, 9 місяців, рік тощо (Ткачук, Вергеліс, 2025) (рис. 1.11)

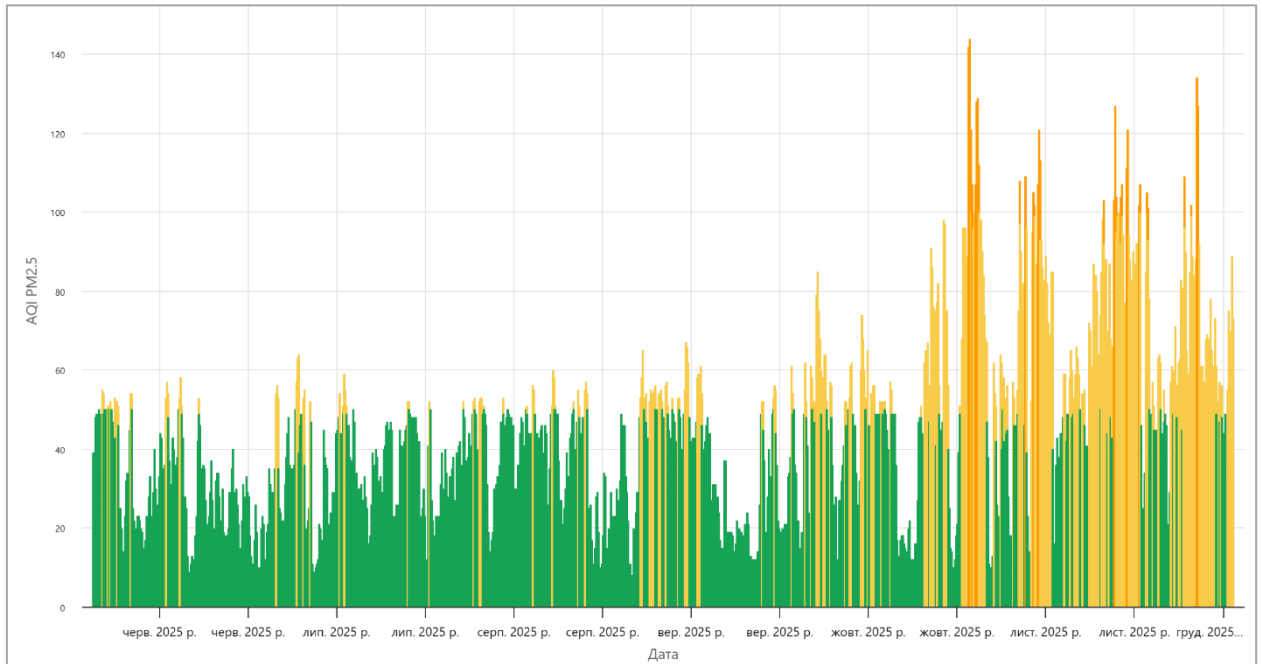


Рис. 1.11. Середній індекс якості повітря у м. Чернівці за 6 місяців

У статті О. Ткачук та В. Вергеліс дають порівняльну оцінку самих пристроїв, які використовуються для збору даних в мережах станцій SaveEcoBot та EcoCity – SaveEcoSensor та AirFreshMax, відповідно, та показників які вони можуть вимірювати (Ткачук, Вергеліс, 2025)

EcoCity – це мережа станцій громадського моніторингу якості повітря в містах, яка забезпечує збір і аналіз відповідних даних. Від початку проєкту було виготовлено та встановлено близько 500 станцій, із яких приблизно 250 працюють у режимі онлайн і постійно передають інформацію. Нині дані зі станцій збираються по всій території України. Наявність таких пристроїв (рис. 1.12) дає можливість відслідковувати рівень забруднення у містах та проводити подальший аналіз. Отриману інформацію можна застосовувати для різноманітних розрахунків (Лавров, 2022).

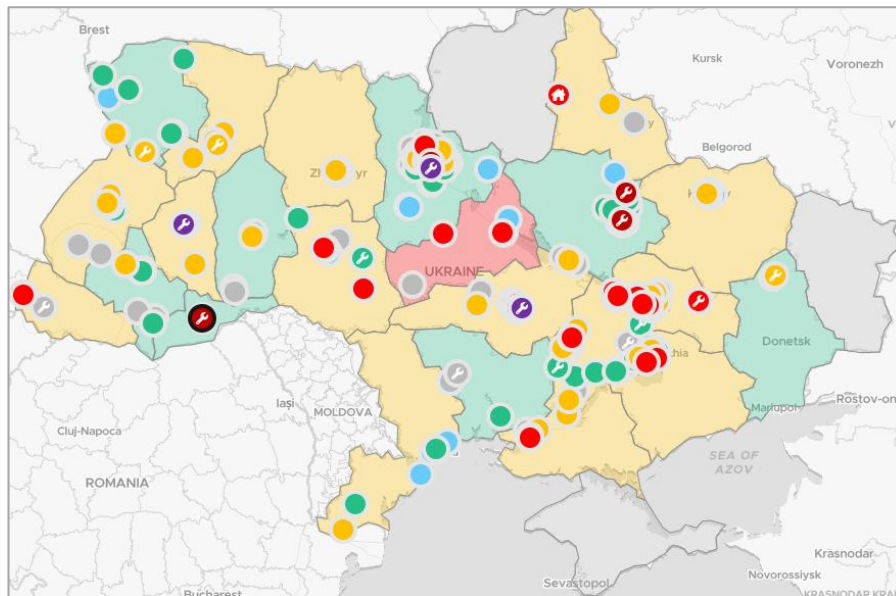
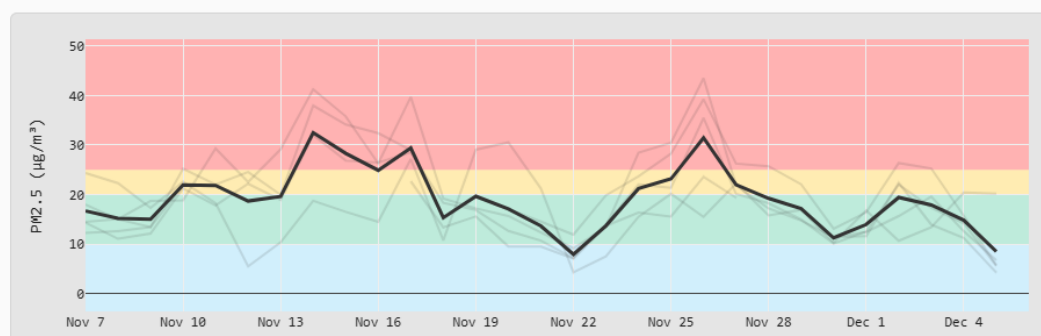


Рис 1.12. Мапа якості повітря EcoCity

На веб-сайті EcoCity є додаткові можливості по статистиці та візуалізації даних (рис. 1.13). Зокрема графік концентрацій часток пилу зображений на фоні що відповідає конкретному рівню забруднення, що є зручно для сприйняття інформації. Також є розподіл по днях тижня та місяцях, що дозволяє отримати оперативну інформацію часового розподілу твердих часток.

Графік забруднення за останні 30 днів

PM1 PM2.5 PM10



Календар забруднення за рік

UAQI Мікропил Основні гази Інші гази Радіаційний фон



Рис. 1.13. Приклади візуалізації даних, доступні на веб-сторінці EcoCity

Міндовкілля затвердило Порядок інформування громадськості про якість повітря наказом від 24 березня 2025 року № 590, який було зареєстровано у Міністерстві юстиції 7 квітня за № 536/43942. Документ встановлює правила повідомлення населення про стан повітря за основними забруднюючими речовинами з використанням індексу якості повітря (Затверджено механізм...., 2025).

Це важливий крок у забезпеченні відкритого доступу громадян до інформації про стан повітря у зрозумілому та зручному для користувача форматі. Порядок передбачає:

- перелік забруднюючих речовин, які враховуються для розрахунку індексу;
- діапазони концентрацій цих речовин, що визначають рівень індексу;
- кольорові та текстові позначки індексу якості повітря;
- рекомендації для населення залежно від стану повітря.

Індекс якості повітря класифікується за шістьма рівнями: «дуже поганий», «поганий», «незадовільний», «задовільний», «допустимий» і «добрий». Діапазони концентрацій для індексу визначено на основі національних нормативів, рекомендацій ВООЗ та з урахуванням європейського індексу якості повітря. На рис. 1.14-А зображена кольорова інтерпретація індексу якості повітря, на яку Міндовкілля рекомендує опиратися. Проте, якщо порівняти з кольоровою інтерпретацією Європейського індексу якості повітря, то можемо помітити певні відмінності в цифрових діапазонах (рис. 1.14-Б)

Забруднююча речовина	Добрий	Допустимий	Задовільний	Незадовільний	Поганий	Дуже поганий
ТЧ _{2,5} (тверді частки)	0-10	11-20	21-25	26-50	51-75	76-800
ТЧ ₁₀ (тверді частки)	0-20	21-40	41-50	51-100	101-150	151-1200
Озон	0-50	51-100	101-130	131-240	241-380	381-800
Діоксид азоту	0-40	41-90	91-120	121-230	241-340	341-1000
Діоксид сірки	0-100	101-200	201-350	351-500	501-750	751-1250

А

	Good	Fair	Moderate	Poor	Very poor	Extremely poor
Particles less than 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)	0-5	6-15	16-50	51-90	91-140	>140
Particles less than 10 μm (PM_{10})	0-15	16-45	46-120	121-195	196-270	>270
Ozone (O_3)	0-60	61-100	101-120	121-160	161-180	>180
Nitrogen dioxide (NO_2)	0-10	11-25	26-60	61-100	101-150	>150
Sulphur dioxide (SO_2)	0-20	21-40	41-125	126-190	191-275	>275

Б

Рис. 1.14. Кольорова інтерпретація Індексу якості повітря, рівнів забруднення та концентрацій основних забруднювачів: А – рекомендована Міндовкіллям; Б – рекомендована Європейською Агенцією з охорони навколишнього середовища

Існують певні застереження щодо можливого збільшення похибок під час вимірювання концентрації пилу станціями громадського моніторингу в тумані. Це пов'язано з тим, що такі станції використовують лазерні промені для визначення вмісту пилових частинок у повітрі. У період туману лазер гірше проходить крізь повітря і може сприймати частинки туману як пил, що призводить до завищення показників концентрації. Втім, більшість сучасних станцій громадського моніторингу вже оснащені додатковими елементами, які мінімізують цю проблему. Завдяки цьому точність їхніх вимірювань становить близько 70–90% у порівнянні з даними державних стаціонарних станцій моніторингу атмосферного повітря.

Враховуючи, що ключова роль мережі громадського моніторингу полягає в оперативному інформуванні населення про стан атмосферного повітря, її подальший розвиток і розширення є надзвичайно важливими. Одним із ефективних напрямів такого розширення є активне залучення закладів вищої освіти до встановлення станцій громадського моніторингу на їхній території. Це не лише посилює мережу спостережень, а й формує для ЗВО сучасну науково-практичну базу, необхідну для підготовки фахівців екологічних спеціальностей, особливо у частині організації систем моніторингу атмосферного повітря, їх моделювання та прогнозування. (Ломакіна, Телюра, 2025).

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт, предмет та матеріали дослідження

Об'єкт досліджень: якість атмосферного повітря міського середовища.

Предмет дослідження: зміни концентрацій дрібнодисперсних часток пилу PM10 та PM2,5.

Матеріали дослідження: архів даних шести станцій моніторингу SaveEcoSensor, розташованих в м. Чернівці за період з грудня 2023 р. по жовтень 2025 року. Загальна кількість рядків з даними склала 33 млн 124 тис 363.

SaveEcoSensor – це станція моніторингу якості атмосферного повітря, яка дає змогу отримати інформацію про склад повітря, яким дихає населення. Автоматизована система здійснює безперервний контроль концентрації дрібнодисперсного пилу фракцій PM2.5 та PM10 в атмосферному повітрі. Станція оснащена інтегрованими датчиками, що забезпечують корекцію показників з урахуванням метеорологічних умов – температури, вологості та атмосферного тиску. Прилад (рис. 2.1) призначений для постійної експлуатації на відкритому просторі та обладнаний камерою підігріву повітря. Пристрій потребує постійного живлення від електромережі та наявності мережі Wi-Fi для передачі даних в реальному часі.



Рис. 2.1. Станція моніторингу SaveEcoSensor

Камера підігріву є важливим елементом станції, який мінімізує вплив туману та атмосферних опадів на результати вимірювань. У разі наближення показників до точки роси система автоматично активує підігрів, завдяки чому повітря прогрівається, а конденсат випаровується.

До основних складових станції SaveEcoSensor належать:

- пиломір (пиловий сенсор) SDS011;
- контролер Wemos D1 mini V2 Pro;
- комбінований сенсор температури, вологості та тиску BME280;
- вбудована автоматизована камера підігріву повітря;
- вбудований перетворювач живлення (5->3.3V) та апаратний сторожовий таймер (watchdog);
- пластиковий корпус;
- блок живлення.

2.2. Опис регіону дослідження

Для аналізу якості атмосферного повітря в м. Чернівці використані бази даних шести діючих станцій громадського моніторингу SaveEcoSensor. Станції розміщені в різних районах міста – примисловий, малоповерхова забудова та приватний сектор, спальні райони. Координати станцій зазначені в табл. 2.1, а їх відображення на карті м. Чернівці – на рис. 2.2.

Таблиця 2.1

Координати станцій громадського моніторингу SaveEcoSensor м. Чернівці

№	Адреса станції	Координати
1	Вул. Ярослава Мудрого, 50	48.32459, 25.93042
2	Вул. Лесі Українки, 25	48.29287, 25.92752
3	Вул. Степана Смаль-Стоцького, 4	48.28974, 25.94255
4	Вул. Горіхівська, 16	48.28194, 25.90683
5	Вул. Володимира Винниченка, 9А	48.27093, 25.95311
6	Вул. Пилипа Орлика, 1А	48.26587, 25.93533

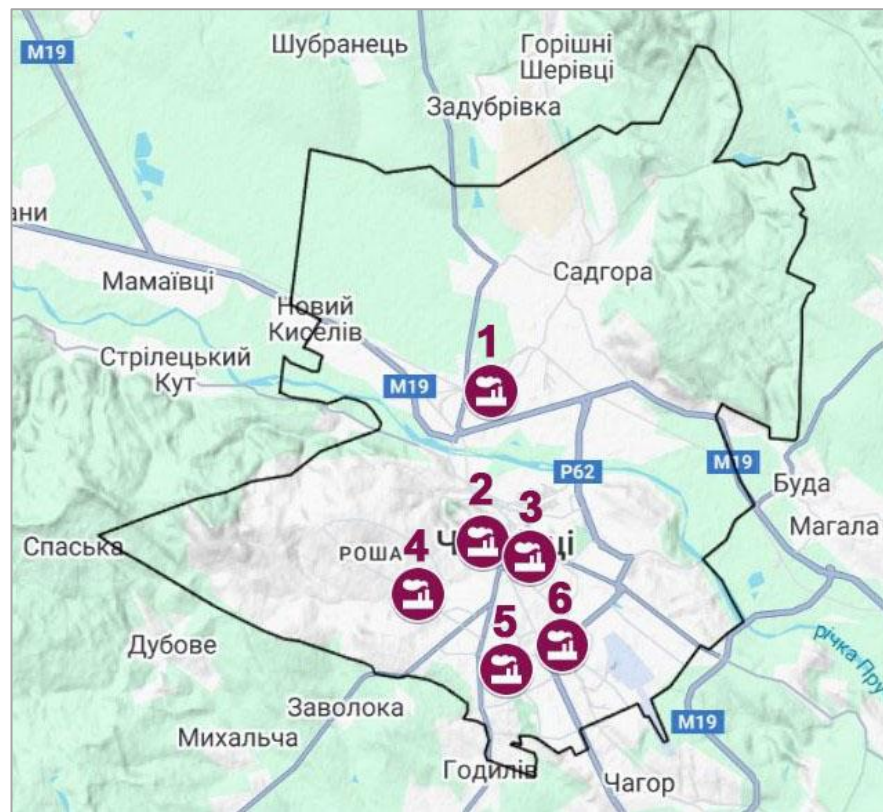


Рис. 2.2. Картосхема розміщення станцій громадського моніторингу SaveEcoSensor на карті м. Чернівці: 1) вул. Ярослава Мудрого, 50; 2) вул. Лесі Українки, 25; 3) вул. Степана Смаль-Стоцького, 4; 4) вул. Горіхівська, 16; 5) вул. Володимира Винниченка, 9А; 6) вул. Пилипа Орлика, 1А

Місто Чернівці розташоване у південно-західній частині України, в межах Чернівецької області, у межах Буковинської височини та долини річки Прут. Територія міста лежить у зоні контакту лісостепових і передгірських ландшафтів, що зумовлює складну морфологічну структуру поверхні та високу розчленованість рельєфу. Абсолютні висоти в межах міста коливаються в середньому від 240 до 300 м над рівнем моря. Особливості рельєфу визначають локальні мікрокліматичні умови та формування напрямків повітряних потоків у межах міської забудови (Національний атлас України, 2007; Екологічний паспорт....., 2024).

Гідрографічна мережа представлена річкою Прут, яка протікає через центральну частину міста, а також малими водотоками та балками. Долина Пруту відіграє важливу роль у формуванні міського мікроклімату, вологості повітря та температурного режиму. Водні об'єкти також впливають на

процеси перенесення та акумуляції атмосферних забруднювачів у приземному шарі (Екологічний паспорт....., 2024; Регіональна доповідь....., 2023).

Клімат міста Чернівці помірно континентальний, з м'якою зимою і теплим літом. Середньорічна температура повітря становить близько $+8...+9$ °С, середня температура січня – $-2...-3$ °С, липня – $+19...+20$ °С. Річна кількість опадів коливається в межах 600–650 мм, з максимумом у теплий період року, при цьому за 150-річний період спостерігалися коливаннями за від 297 мм до 1000 мм. Характерною особливістю є часте формування температурних інверсій у холодний період, що сприяє накопиченню забруднюючих речовин у нижніх шарах атмосфери (Національний атлас України, 2007; Николаєв, Шевчук, 2014).

Ґрунтовий покрив і рослинність навколо міста представлені переважно сірими лісовими та опідзоленими чорноземами, а також урбанізованими ґрунтами в межах міської забудови. Зелені насадження (парки, сквери, лісопаркові зони) виконують важливі санітарно-гігієнічні функції та частково знижують рівень запиленості атмосферного повітря (Екологічний паспорт....., 2024; Регіональна доповідь....., 2023).

Територія міста характеризується високим рівнем антропогенного навантаження, зумовленого транспортною інфраструктурою, щільністю забудови та функціонуванням об'єктів комунального господарства. Основні джерела забруднення атмосферного повітря мають переважно автотранспортне та локальне стаціонарне походження, що є важливим чинником формування просторових відмінностей якості повітря в межах міста (Екологічний паспорт....., 2024; Регіональна доповідь....., 2023).

2.3. Методологія проведення дослідження

Обробку та аналіз даних було здійснено у програмному середовищі **R**, яке розповсюджується безкоштовно відповідно до ліцензії GNU General Public License та доступне у вигляді відкритого програмного коду або готових бінарних версій для більшості операційних систем.

Вибір програмного забезпечення для статистичного аналізу був зроблений на основі декількох причин.

1. Великий масив вхідних даних від 6 станцій моніторингу якості повітря (понад 33 млн рядків за весь період аналізу), який унеможливило коректну роботу з ними в табличних редакторах.
2. Гнучкість та можливості мови програмування R, а також наявність великої кількості бібліотек дозволяє автоматизувати багато алгоритмів. До прикладу – формування вибірок, розрахунків днів тижня, розділення пакету з циклічного набору параметрів в окремі стовпці тощо.
3. Можливість якісної гнучкої візуалізації результатів аналізу у вигляді різноманітних графіків, діаграм у друкарській якості в різних форматах.
4. Безкоштовність програмного забезпечення, його кросплатформеність, доступність найновіших оновлень за ліцензією GNU GPL.
5. R Входить в топ-10 мов програмування за версією GitHub, в IEEE, TIOBE (топ-15).
6. Багато компаній використовують програмне середовище R для аналізу даних і статистичного моделювання.

Ось кілька прикладів компаній, які активно використовують R для своїх аналітичних потреб (<https://www.r-project.org/about.html>). Google використовує R для аналізу даних та статистики в різних проектах, включаючи рекламні кампанії та аналіз веб-трафіку. Facebook застосовує R для аналізу даних, прогнозування та створення моделей для різних цілей, таких як реклама та розробка продуктів. Microsoft має значні інвестиції в R, включаючи розробку пакету Microsoft R Open та інтеграцію R в інші продукти, такі як Azure та SQL Server. Uber з допомогою R аналізує дані про водіїв та пасажирів, використовує для оптимізації та прогнозування популярності маршрутів. Airbnb використовує R для аналізу та моделювання даних про відгуки користувачів, цінову стратегію та прогнозування популярності об'єктів проживання. Netflix аналізує дані про перегляди контенту, рекомендаційні системи та стратегії контенту з застосуванням програмного пакету R. Pfizer

використовує R для аналізу клінічних даних, моделювання ефективності ліків та прогнозування результатів клінічних випробувань.

Загалом наші дослідження включали 33 124 363 рядків даних, завантажених з 6 станції аналізу якості повітря м. Чернівці. До уваги взяті параметри концентрації твердих частинок діаметром 10 і 2,5 мікрметрів (PM10 та PM2.5). В подальшому нами здійснено опрацювання даних за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA із застосуванням тесту Tukey та t-Student з поправкою Bonferroni на множинні порівняння), а також регресійного та кореляційного аналізів. Інтерпретація результатів дисперсійного аналізу подана у вигляді коробкових діаграм (рис. 2.3). Візуалізація парного t-тесту за критерієм Стюдента подана у вигляді теплограм, регресійного аналізу – у вигляді рівнянь регресії.

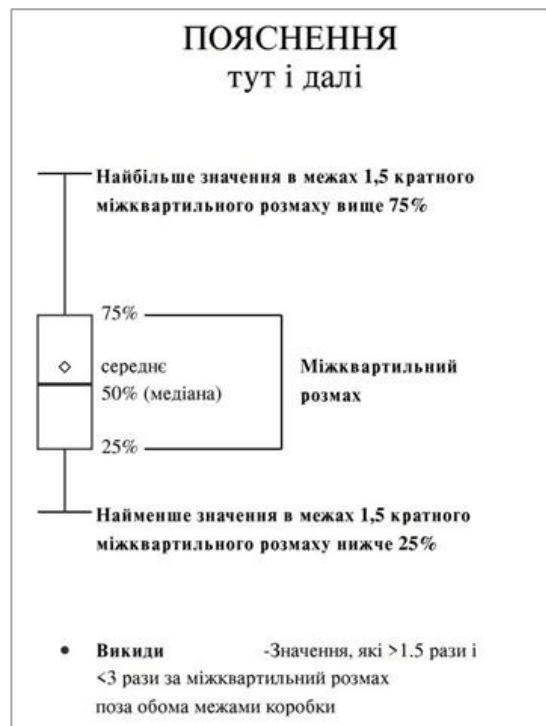


Рис. 2.3. Коробкова діаграма, що демонструє отримані результати за допомогою дисперсійного аналізу

Для аналізу просторово-часового розподілу концентрацій твердих часток PM2,5 та PM10 використовували медіанні значення. На графіках для оптимальної візуалізації коробкових діаграм та розмаху розподілу даних «обітнули» викиди концентрацій понад 70 мкг/м³.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Аналіз якості повітря м. Чернівці за даними станцій моніторингу SaveEcoSensor

Першим етапом наших досліджень стало опрацювання багатотисячних даних, отриманих за допомогою автоматизованої станції моніторингу якості повітря SaveEcoSensor, та визначено усередненні і медіанні концентрації дрібнодисперсних твердих частинок діаметром $<2,5$ мкм (PM_{2,5}) та діаметром від 2,5 до 10 мкм (PM₁₀), а також здійснено порівняльну оцінку отриманих значень для PM_{2,5} і PM₁₀ з національними та міжнародними стандартами якості повітря.

Прийняті у 2005 р. рекомендації щодо якості повітря (AQG – Air Quality Guideline) були оновлені у 2021 р. і стали більш жорсткішими (WHO, 2023) (рис. 3.1). В Україні наразі діють граничні показники забруднювальних речовин (ГДК), визначені Порядком здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, затвердженого Постановою КМУ від 14.08.2019 р. № 827, де допустимий добовий рівень PM_{2,5} не повинен перевищувати 25 мкг/м³, PM₁₀ – <50 мкг/м³ (Порядок здійснення..., 2024).

2005 V.S. 2021 WHO air quality guidelines (AQGs)			
Preventable PM _{2.5} deaths avoided if new AQGs met globally: ~80% Source: WHO			
Pollutant	Averaging Time	2005 AQGs	2021 AQGs
PM _{2.5} µg/m ³ 	Annual 24-hour	10 25	5 15
PM ₁₀ µg/m ³ 	Annual 24-hour	20 50	15 45

Рис. 3.1. Нормативні значення дрібнодисперсних твердих частинок PM_{2,5} та PM₁₀, рекомендовані ВООЗ

Розглянемо зміну концентрації PM_{2,5} в різних часових проміжках. Так, на рис. 3.1 зображено добові флуктуації варіації концентрацій PM_{2,5} на шести на станціях спостережень м. Чернівці. Кожен графік демонструє розподіл концентрацій за 24 години доби у вигляді boxplot-діаграм. Можемо прослідкувати характерну добову динаміку: найвищі концентрації фіксуються

в вечірні та ранкові години, в основному з 20:00 до 00:00, а та з 07:00 до 10:00. Це може бути пов'язано зі зниженням інтенсивності вертикального перемішування повітря, температурною інверсією та накопиченням викидів. У денний період – з 13:00 до 16:00 за даними станцій моніторингу спостерігається зниження концентрацій $PM_{2,5}$, що відповідає покращенню умов розсіювання забруднюючих речовин. Після 17:00 помітне поступове підвищення вмісту твердих часток у повітрі, що пов'язано з вечірньою транспортною активністю та знову ж таки – зі слабшим перемішуванням повітря.

Попри спільну добову тенденцію, між окремими точками спостережень є відмінності за рівнем забруднення та амплітудою коливань, що свідчить про локальні особливості джерел викидів і метеорологічні умови. Найнижчі значення концентрацій $PM_{2,5}$ з усіх спостережень зафіксовані на станції, розміщеній на вул. Л.Українки, 25: денний мінімум становить 4,1-4,2 $мкг/м^3$ та 7,1-7,2 $мкг/м^3$ в вечірній час до опівночі. Найвищі показники показала станція на вул. П.Орлика, 1А: 8,5-8,7 $мкг/м^3$ в обідні години та 13,6 $мкг/м^3$ – в нічні години. Відмінності між мінімальними та максимальними концентраціями твердих часток $PM_{2,5}$ протягом доби становлять 37-43%.

Розподіли концентрацій PM_{10} на більшості графіків мають чіткий бімодальний розподіл, тобто два виражені піки протягом 24 годин – найвищі значення зафіксовані з 20:00 до 22:00-23:00, з максимумом по всіх станціях о 21:00. Концентрація в цей період коливається від 19,1...20,2 $мкг/м^3$ на Горіхівській, до 25,2...26,2 $мкг/м^3$ на П.Орлика (рис. 3.2). Після півночі спостерігається поступове зниження концентрації завислих часток, це співпадає з періодом мінімальної активності транспорту та більшої висоти змішування (розсіювання) забруднюючих речовин.

Ранкові максимальні значення PM_{10} зафіксовані о 08:00 і варіюють від 16,7...17,0 $мкг/м^3$ на Горіхівській, до 24,4...25,4 $мкг/м^3$ на П.Орлика. Ці значення є на 5-17% нижчими за вечірній пік. Це безпосередньо корелює з початком робочого дня та рухом транспорту. Додатковим фактором є низький інверсійний шар, що накопичується після нічного охолодження, який "притискає" викиди до поверхні.

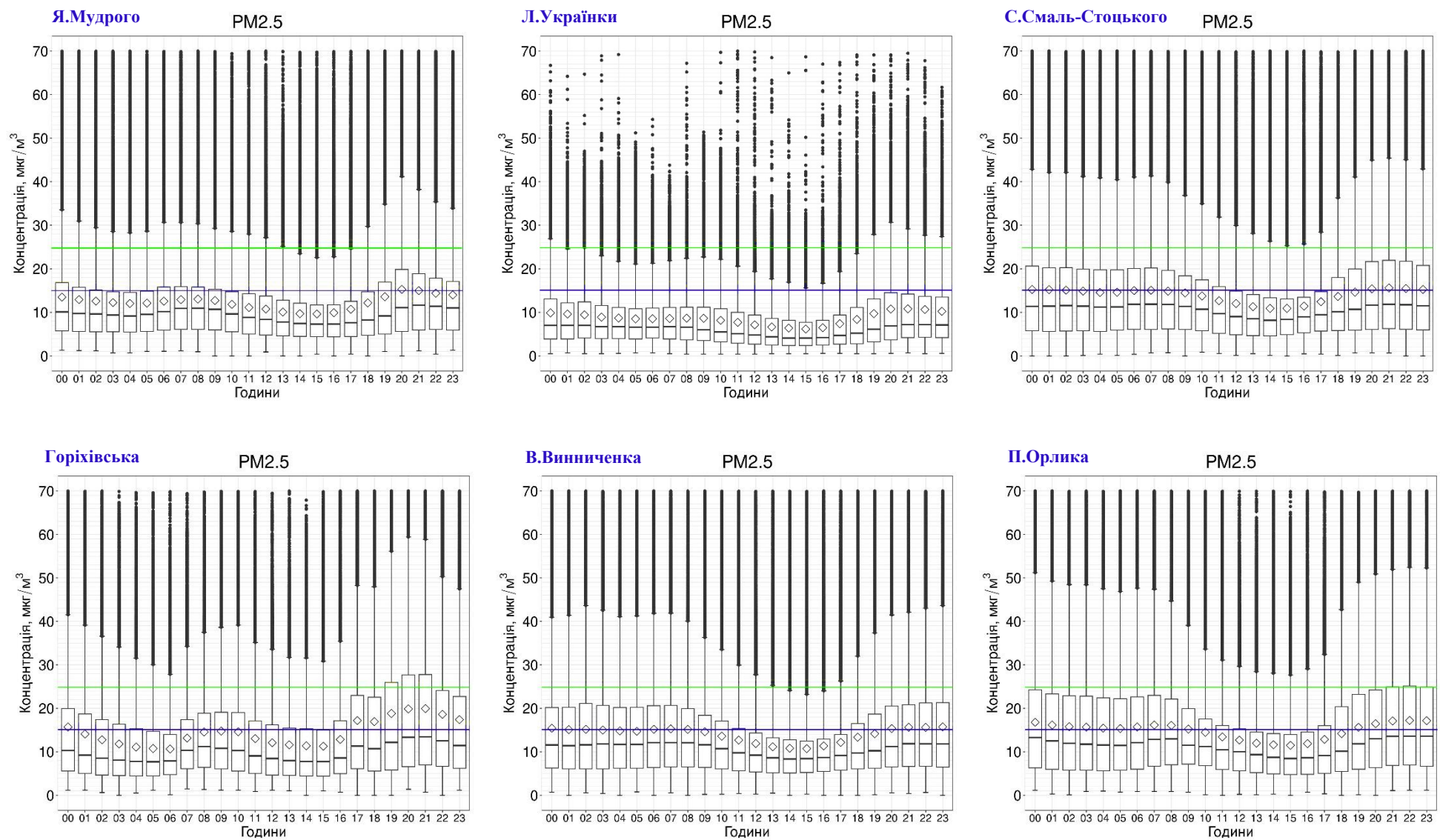


Рис. 3.1. Добові (погодинні) варіації концентрації РМ 2,5, $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ на станціях м. Чернівці (грудень 2023 р. – жовтень 2025 р.)
— національні стандарти (25 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$) — міжнародні стандарти (15 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$)

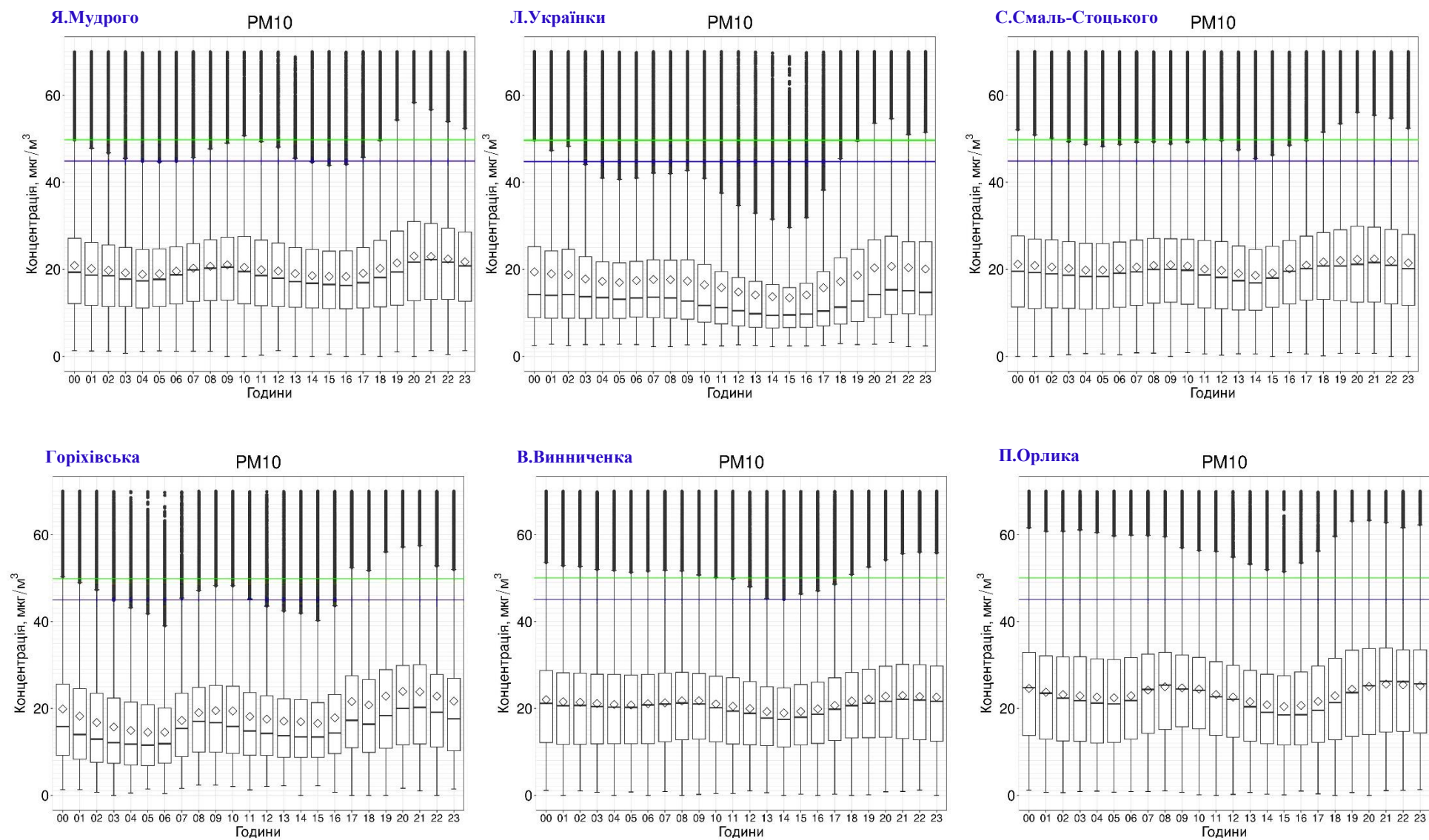


Рис. 3.2. Добові (погодинні) варіації концентрації РМ 10, $\mu\text{г}/\text{м}^3$ на станціях м. Чернівці (грудень-2023 р. – жовтень 2025 р.)
— національні стандарти ($50 \mu\text{г}/\text{м}^3$) — міжнародні стандарти ($45 \mu\text{г}/\text{м}^3$)

З 10:00 до 16:00 відзначаємо денну стабілізацію рівнів твердих частинок PM_{10} – концентрації дещо знижуються або виходять на плато. Це пов'язано з підвищенням висоти атмосферного прикордонного шару, що сприяє кращому вертикальному розсіюванню забруднень. Мінімальні значення концентрацій PM_{10} спостерігаються о 14:00 на вулицях Л.Українки ($9,4 \text{ мкг/м}^3$), С.Смаль-Стоцького ($16,9 \text{ мкг/м}^3$), Горіхівській ($13,4 \text{ мкг/м}^3$), В.Винниченка ($17,5 \text{ мкг/м}^3$) та о 16:00 на вулицях Я.Мудрого ($16,3 \text{ мкг/м}^3$) та П.Орлика ($18,5 \text{ мкг/м}^3$). Якщо порівняти мінімальні та максимальні концентрації PM_{10} по кожній станції протягом доби, то можемо сказати, що вони відрізняються в 1,1–1,6 разів.

Дещо відмінний від загальної тенденції тренд спостерігаємо на станції по вул. Л.Українки 25: тут на відміну від інших локацій не спостерігається ранкове підвищення концентрації PM_{10} , натомість бачимо плавне зростання концентрації від мінімальної о 14:00 до максимуму о 21:00, і подальше поступове зниження протягом нічних та ранкових годин

В цілому добові коливання рівнів твердих аерозольних частинок $PM_{2,5}$ та PM_{10} в м. Чернівці не показують перевищень за міжнародними та національними стандартами якості повітря

Розглядаючи флуктуації рівнів дрібнодисперсних твердих частинок $PM_{2,5}$ та PM_{10} у повітрі м. Чернівці по днях тижня встановлено, що медіанні значення концентрацій в межах кожної локації (крім Л.Українки) варіюють на різних точках межах – $7,9 \dots 12,1 \text{ мкг/м}^3$ ($PM_{2,5}$) та $13,9 \dots 23,5 \text{ мкг/м}^3$ (PM_{10}) (рис. 3.3, рис. 3.4). Найнижчі значення зафіксовані на станції розташованій на вул. Л.Українки, 25: $5,6 \dots 6,4 \text{ мкг/м}^3$ ($PM_{2,5}$) та $12,1 \dots 13,0$ (PM_{10})

На усіх досліджуваних локаціях спостерігається тенденція до зниження медіанних рівнів концентрацій $PM_{2,5}$ та PM_{10} починаючи від суботи до понеділка. При цьому мінімальні значення на 4-х дослідних точках із 6-ти спостерігаються в понеділок (Я.Мудрого, Л.Українки, С.Смаль-Стоцького та П.Орлика), ще на 2-х – в неділю (Горіхівська, В.Винниченка).

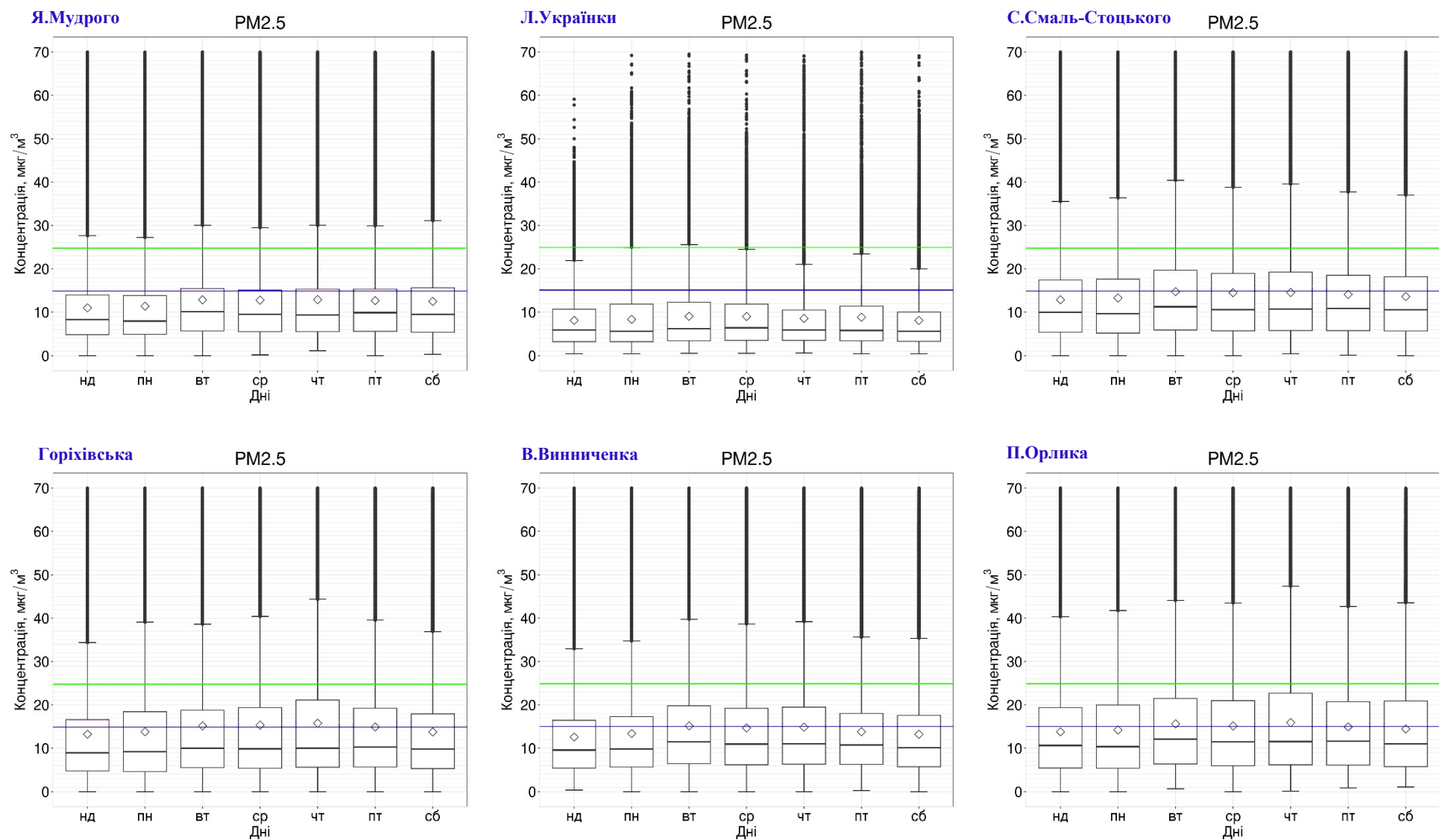


Рис. 3.3. Тижневі варіації концентрації РМ 2,5, $\text{мкг}/\text{м}^3$ на станціях м. Чернівці (грудень-2023 р. – жовтень 2025 р.)
— національні стандарти ($25 \text{ мкг}/\text{м}^3$) — міжнародні стандарти ($15 \text{ мкг}/\text{м}^3$)

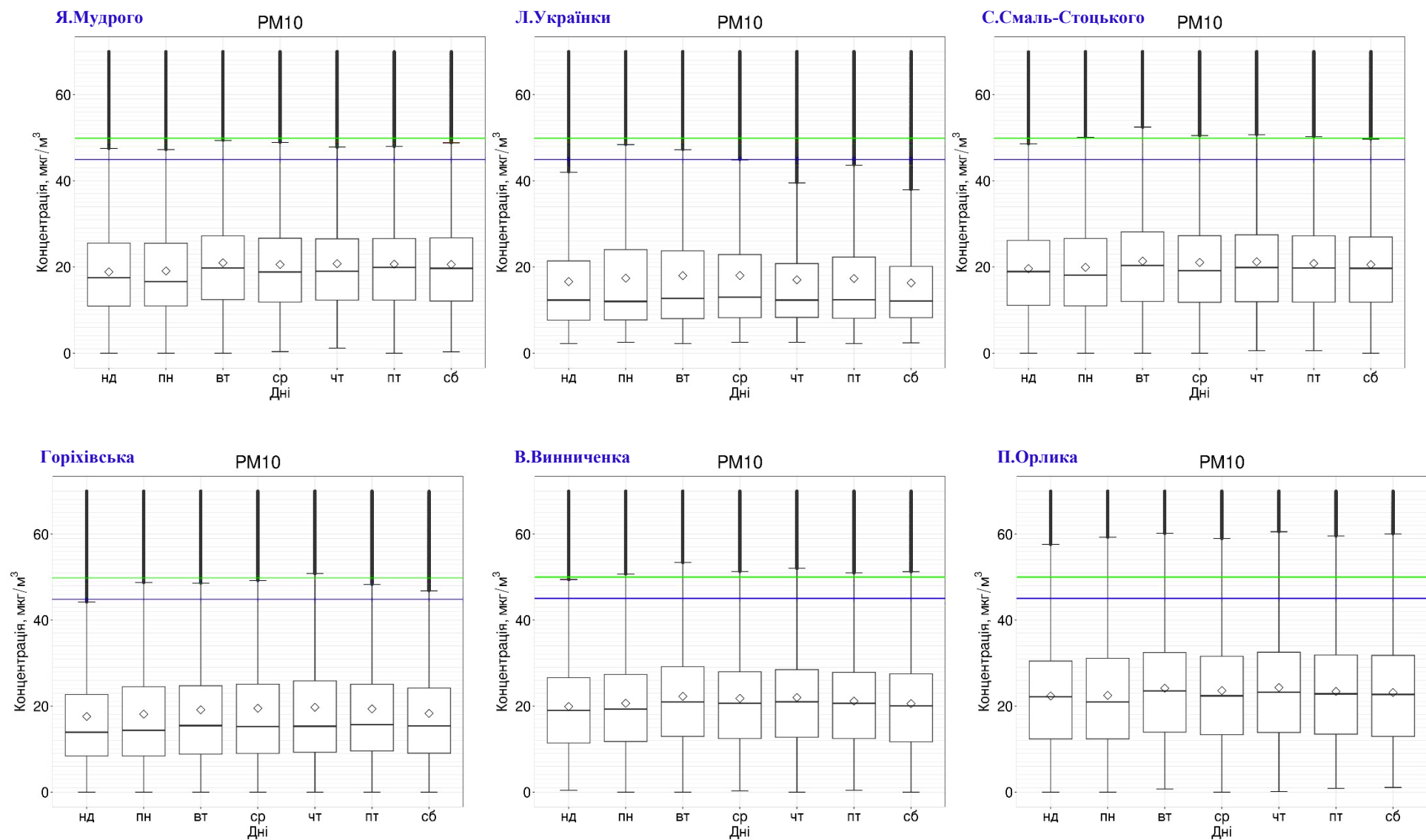


Рис. 3.4. Тижневі варіації концентрації РМ 10, $\mu\text{г}/\text{м}^3$ на станціях м. Чернівці (грудень-2023 р. – жовтень 2025 р.)
— національні стандарти (50 $\mu\text{г}/\text{м}^3$) — міжнародні стандарти (45 $\mu\text{г}/\text{м}^3$)

Зниження медіанних концентрацій $PM_{2,5}$ та PM_{10} у вихідні дні та на початку тижня зумовлене передусім зменшенням інтенсивності антропогенного навантаження. У суботу–понеділок у місті суттєво скорочується транспортний потік, обсяги вантажних перевезень та робота промислових і комерційних об'єктів, що є основними джерелами дрібнодисперсного пилу. Зменшення руху автотранспорту призводить не лише до скорочення викидів вихлопних газів, а й до зниження повторного підйому пилу з дорожнього покриття (ресуспензії).

Для окремих локацій відмінності у днях мінімуму концентрацій можуть пояснюватися специфікою локальних джерел забруднення. Території, наближені до транспортних артерій і ділових центрів, швидше реагують на зниження трафіку в понеділок, тоді як у житлових районах із менш інтенсивним потоком транспорту мінімальні значення частіше фіксуються в неділю. Окрім того це може бути пов'язано із наявністю зелених насаджень та меншою щільністю забудови, що сприяє кращому розсіюванню забруднюючих домішок.

Аналізуючи варіації вмісту дрібнодисперсних твердих частинок у повітрі м. Чернівці на шести досліджуваних станціях моніторингу якості атмосферного повітря по місяцях встановлено, що концентрації $PM_{2,5}$ коливаються у межах від $3,3 \dots 6,6$ мкг/м^3 в травні-червні до $12,7 \dots 24,6$ мкг/м^3 в січні. Для PM_{10} варіації концентрації варіюють в межах $8,0 \dots 14,0$ мкг/м^3 в травні та $24,4 \dots 32,9$ мкг/м^3 в січні. Для обох фракцій виявлено тенденції щодо реєстрації найвищих медіанних значень у зимові місяці, зокрема в січні, на окремих станціях в листопаді/грудні. Далі спостерігається їх поступове зменшення з кожним наступним місяцем, досягаючи найнижчих рівнів у травні-червні (рис. 3.5, рис. 3.6).

В період з листопада по березень на більшості локацій спостерігається значне зростання як медіани, так і загального діапазону концентрацій обох фракцій. Це очікувано і пов'язано зі збільшенням викидів від опалення (спалювання палива від генераторів) та погодними умовами, що сприяють

накопиченню забруднюючих речовин (інверсії). Як видно з рис. 3.5 в цей період не просто спостерігаються найвищі концентрації твердих часток $PM_{2,5}$, але й перевищення допустимих міжнародних нормативів, рекомендованих ВООЗ, які становлять 15 мкг/м^3 (синя лінія на графіках), згідно національних стандартів ці концентрації наближаються до межі ГДК. Концентрації твердих часток фракції PM_{10} знаходяться в межах норми (рис. 3.6).

З квітня по жовтень концентрації суттєво знижуються: медіана та міжквартильний діапазон зміщуються до найнижчих значень. Це пояснюється зменшенням опалювальних викидів та кращим розсіюванням забруднень. Проте, це є не лише результатом зменшення викидів, свою роль відіграє і вегетаційний період рослин – наявність листя забезпечує додаткову біологічну фільтрацію (осадження) твердих частинок.

На всіх графіках присутня значна кількість викидів по вертикалі, особливо взимку. Це свідчить про часті випадки короточасного критичного перевищення концентрації $PM_{2,5}$, що має важливе значення для оцінки ризику для здоров'я населення та вказує на необхідність моніторингу екстремальних подій і впровадження швидких заходів реагування для захисту населення в періоди високого забруднення.

Отже, підсумовуючи, можемо зробити висновок, що коливання концентрацій дрібнодисперсного пилу обох фракцій демонструють чітко виражену сезонну динаміку забруднення $PM_{2.5}$ та PM_{10} , яка є типовою для регіонів з помірним кліматом. Максимальні значення $PM_{2,5}$ протягом року (переважно січневі) в 3,0-3,8 разів перевищують мінімальними (в основному травневі), для концентрацій PM_{10} такі відмінності становлять 1,9-3,1 разів.

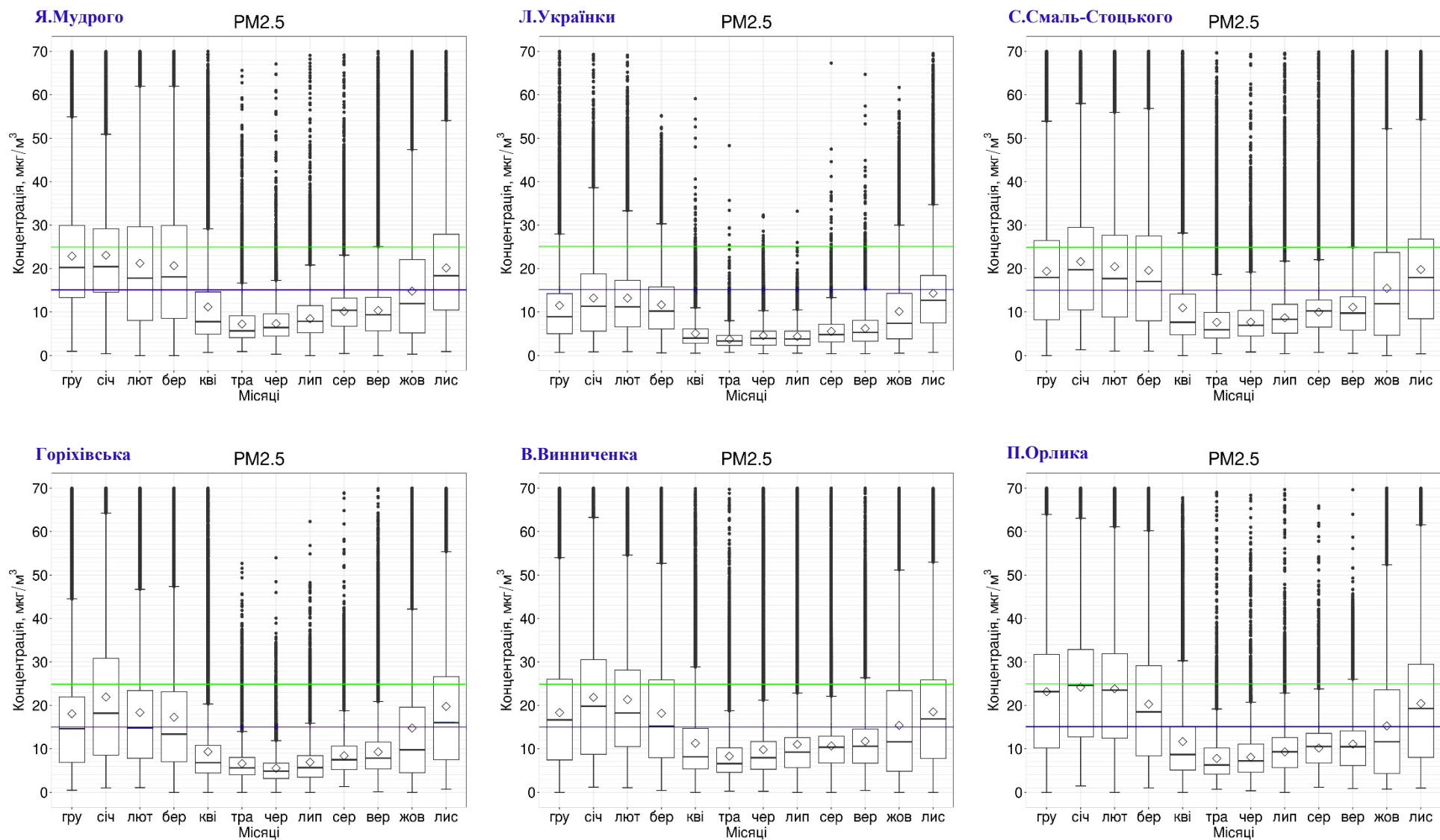


Рис. 3.5. Річні варіації концентрації РМ 2,5, мкг/м³ на станціях м. Чернівці (грудень-2023 р. – жовтень 2025 р.)

— національні стандарти (25 мкг/м³) — міжнародні стандарти (15 мкг/м³)

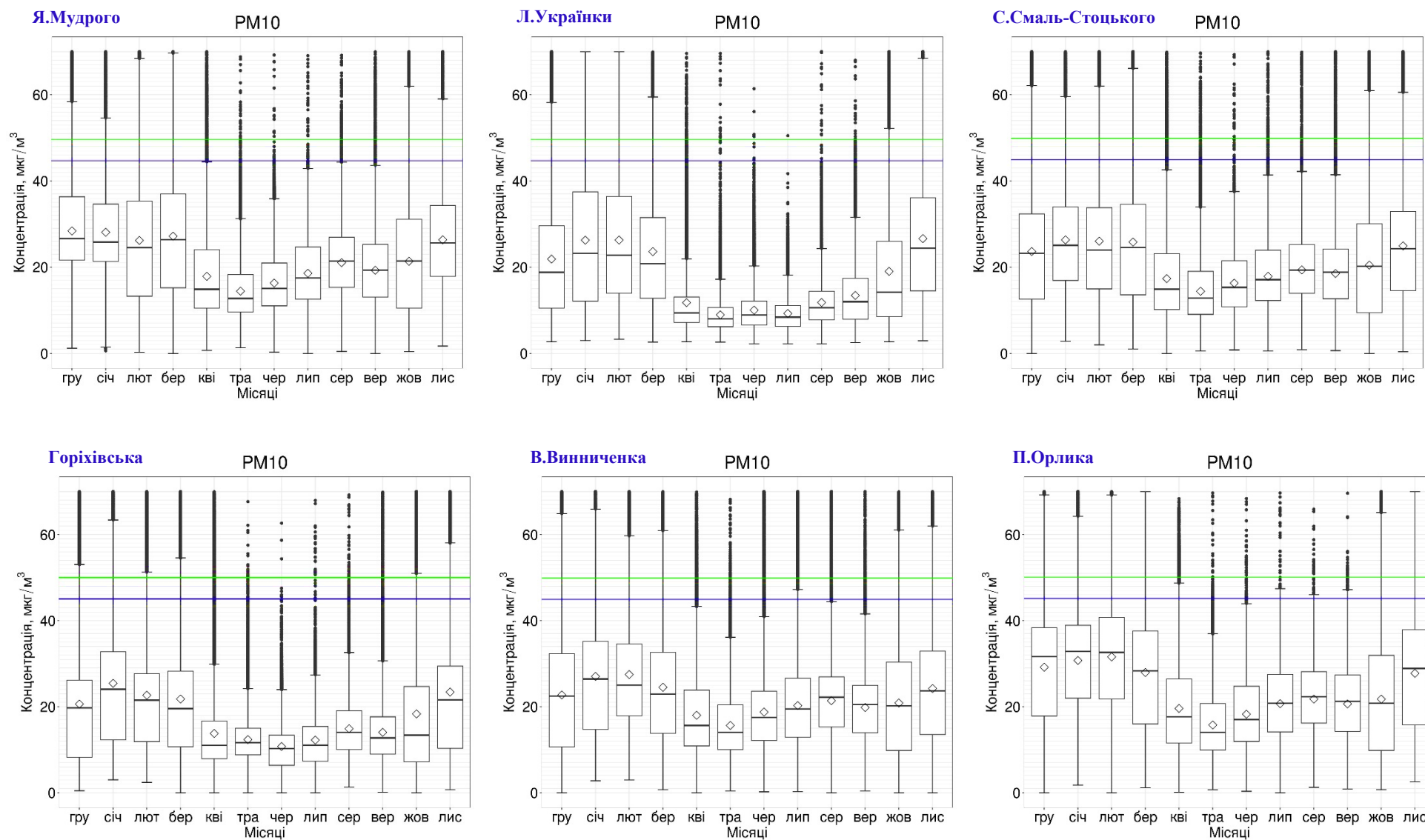


Рис. 3.6. Річні варіації концентрації PM 10, $\mu\text{г}/\text{м}^3$ на станціях м. Чернівці (грудень-2023 р. – жовтень 2024 р.)
— національні стандарти (50 $\mu\text{г}/\text{м}^3$) — міжнародні стандарти (45 $\mu\text{г}/\text{м}^3$)

Середньодобова концентрація PM_{2,5} та PM₁₀ за весь період спостережень (з грудня 2023 р. по жовтень 2025 р.) на 6 станціях не виявила перевищень як згідно міжнародних, так і національних стандартів (рис. 3.7).

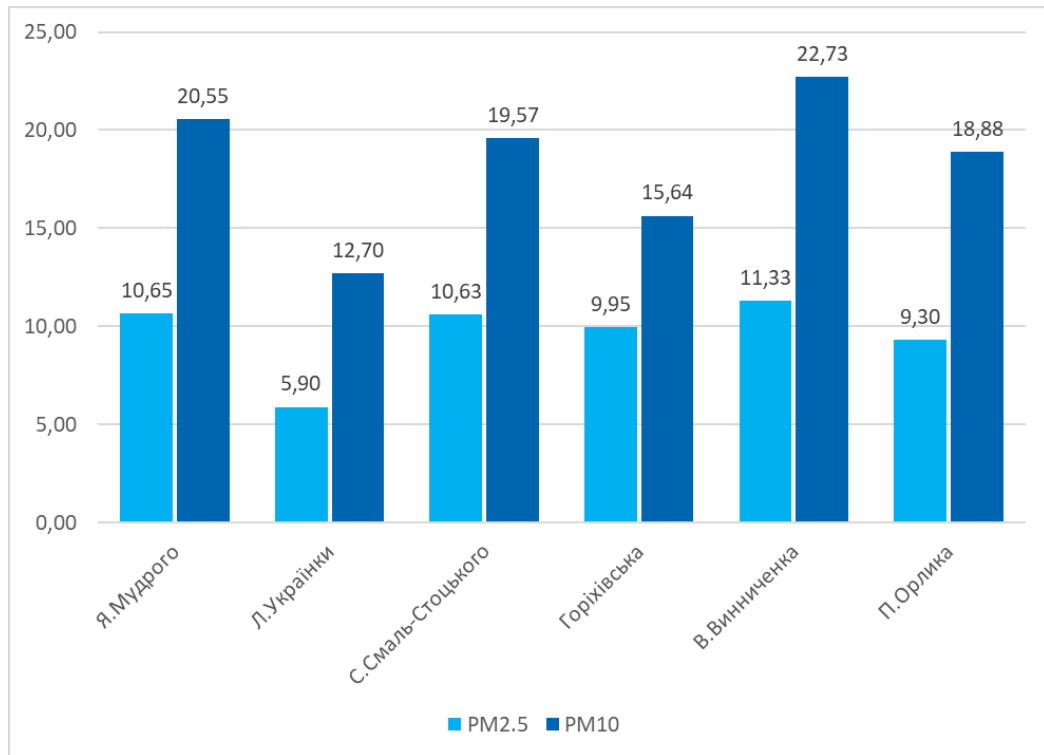


Рис. 3.7. Якість повітря у м. Чернівці за медіанами середньодобових концентрацій дрібнодисперсних твердих часток PM_{2.5} та PM₁₀ за увесь період спостережень (грудень 2023р. – жовтень 2025р.)

Також нами було здійснено дисперсійний аналіз (ANOVA) зазначених параметрів із наступним застосуванням тесту Тьюкі. За результатами аналізу отримано низькі р-значення (менше $2 \cdot 10^{-16}$) для кожного порівняння. Так, ANOVA виявила загальний статистично значущий вплив місяця і часу доби на рівні PM_{2.5} та PM₁₀, втім різниці між парами є настільки незначними, що тест Тьюкі після поправки на множинні порівняння не показав статистично значущих відмінностей (р-значення $>0,05$).

Тому в подальшому нами проведено аналіз парного t-тесту за критерієм Стюдента з поправкою Бонферроні на множинні порівняння. Даний аналіз підтвердив достовірні відмінності між вибірками по годинах та по місяцях. Для кращого сприйняття достовірних різниць ($p \leq 0,05$) між вибірками

результати t-тесту візуалізовано у вигляді теплограм. На рис. 3.8 зображені теплограми побудовані на основі станції, що розміщена на корпусі ННІБХБ (вул. Л.Українки, 25). Інші теплограми – див. ДОДАТОК А.

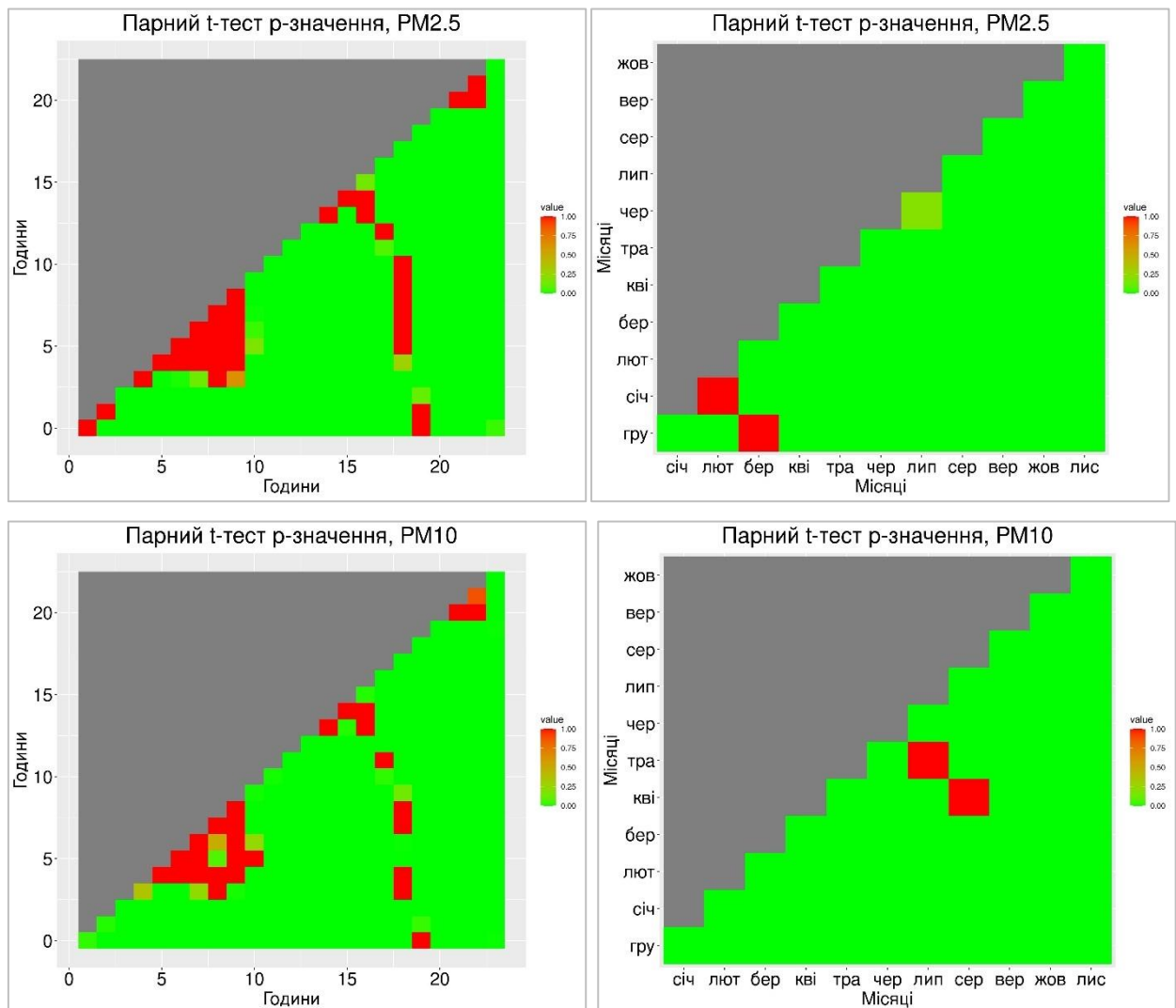


Рис 3.8. Візуалізація парного t-тесту за критерієм Стюдента у вигляді теплограм для PM2,5 та PM10 на станції в м. Чернівці, вул. Л.Українки, 25

Примітка: зеленим вказано наявність достовірної різниці між вибірками, червоним – її відсутність

Китайські дослідники описали закономірності встановлені для ~30-ти міст Китаю, де в зимовий період відмічено зростання PM2,5 та PM10, а в літній сезон – суттєве їх зниження (~1,5-3 рази) (Fan et al., 2021). При цьому науковці стверджують, що основним джерелами надходження PM10 є природні джерел (перенесення пустельних мас, вітрова ерозія гірських порід, наприклад, з Тибетських гір), а також діяльність людини (дорожній пил і промислові викиди). Тоді як джерелами PM 2,5 в основному стало спалювання викопного

палива (наприклад, промислового спалювання вугілля), вихлопні гази автомобілів тощо (Fan et al., 2021; Zhang et al., 2019).

Liu Z. з колегами також виявили схожі сезонні закономірності змін розподілу рівнів $PM_{2,5}$ і PM_{10} і встановили, що масові концентрації $PM_{2,5}$ та PM_{10} найнижчими були влітку, найвищими взимку, після чого йдуть весна та осінь. Дослідниками виявлена і значна негативна кореляція з кількістю опадів: чим більше опадів, тим нижча концентрація $PM_{2,5}$ PM_{10} , і науковці дійшли висновку, що опади мають ефект вологого видалення даних частинок, зокрема, для більших фракцій ефект поглинання кращий, ніж для дрібних. При цьому, опади з травня по вересень проявляли помірний вплив, а невеликий дощ взимку збільшував концентрацію забруднюючих речовин (Liu et al., 2020).

Такі ж тенденції щодо вищого вмісту шкідливих аерозольних частинок в зимовий період відмічено і в містах Чехії: м. Градец-Кралоуе, м. Оломоуц та м. Брно (у середньому на 47%). При цьому, загальна середня концентрація $PM_{2.5}$ у міському повітрі досліджуваних населених пунктів становила 21 мкг/м^3 , подібно до концентрації в Берні (Швейцарія) та Відні (Австрія) (Martinková et al., 2023).

Науковцями з Великої Британії (Galán-Madruga, 2024) та Польщі (Maciejewska, 2020) також повідомляється про реєстрування найвищих середніх концентрацій твердих частинок в зимовий період. В останньому випадку, максимальні рівні були отримані і в осінній сезон. Ймовірною причиною таких сезонних змін автори вбачають у комбінації таких факторів як низькі температури, інтенсивне нагрівання та атмосферні умови, несприятливі для розсіювання. Для $PM_{2,5}$ в зимовий період додатковий вплив мала і опалювальна діяльність (Maciejewska, 2020).

В різних містах Марокко (Африка) виявлено дещо інші сезонні закономірності, зокрема, реєстрування високих рівнів твердих частинок восени (для PM_{10} на рівні $61,4 \pm 24,5 \text{ мкг/м}^3$; $PM_{2.5}$ – $21,2 \pm 8,2 \text{ мкг/м}^3$), а мінімальних як взимку (для PM_{10} на рівні $40,2 \pm 17,1 \text{ мкг/м}^3$), так і влітку (для $PM_{2.5}$ на рівні $14,3 \pm 3,3 \text{ мкг/м}^3$) (Bounakhla et al., 2023).

Базуючись на даних про рівні дрібнодисперсних твердих частинок PM_{2,5} та PM₁₀, в Порядку інформування населення про якість повітря за основними показниками з використанням індексу якості повітря в Україні Міндовкілля притримується визначення відповідних рівнів якості повітря за градацією ЕЕА з урахуванням Європейського індексу якості повітря (рис. 3.9).

Забруднююча речовина	Добрий	Допустимий	Задовільний	Незадовільний	Поганий	Дуже поганий
ТЧ _{2,5} (тверді частки)	0-10	11-20	21-25	26-50	51-75	76-800
ТЧ ₁₀ (тверді частки)	0-20	21-40	41-50	51-100	101-150	151-1200

Рис. 3.9. Показники індексу якості повітря за вмістом PM_{2.5} та PM₁₀, рекомендована Європейським агентством з охорони навколишнього середовища (ЕЕА)

Так, згідно отриманих в результаті аналізу даних по м. Чернівці виявлено, що за усередненими показниками концентрацій PM_{2.5} та PM₁₀ у м. Чернівці якість повітря є гарною і навіть дуже (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

**Якість повітря у м. Чернівці за усередненими показниками
концентрацій дрібнодисперсних твердих частинок PM_{2,5} та PM₁₀**

Показники	PM2.5, $\text{мкг}/\text{м}^3$						PM105, $\text{мкг}/\text{м}^3$					
ГДК												
національний	25						50					
міжнародний	15						45					
Станції	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Добові (по годинах)												
min	7,3	4,1	8,2	7,7	8,3	8,5	16,3	9,4	16,9	13,4	17,5	18,6
max	11,6	7,2	11,9	13,4	12,1	13,6	22,2	15,3	21,6	20,2	22,1	26,2
Тижневі (по днях тижня)												
min	7,9	5,6	9,7	9,0	9,6	10,3	16,6	12,0	18,1	13,9	19,0	21,0
max	10,1	6,4	11,3	10,3	11,5	12,1	19,9	13,0	20,3	15,7	21,0	23,5
Річні (по місяцях)												
min	5,7	3,3	5,9	4,9	6,6	6,3	12,7	8,0	12,8	10,3	14,0	14,0
max	20,4	12,7	19,7	18,2	19,8	24,6	26,6	24,4	25,1	24,0	26,4	32,9

Примітка: червоним позначено перевищення міжнародних стандартів. **Станції:**
1) вул. Ярослава Мудрого, 50; 2) вул. Лесі Українки, 25; 3) вул. Степана Смоль-Стоцького, 4; 4) вул. Горіхівська, 16; 5) вул. Володимира Винниченка, 9А; 6) вул. Пилипа Орлика, 1А

Таким чином, в результаті проведених досліджень визначено концентрації дрібнодисперсних твердих частинок в атмосферному повітрі в м. Чернівці. Так, встановлено, що флуктуації змінюються:

- для **PM_{2,5}** – в середньому протягом доби в межах 4,1...13,6 мкг/м³, у розрізі днів тижня – 5,6...12,1 мкг/м³, у розрізі місяців – 3,2...24,6 мкг/м³;

- для **PM₁₀** в середньому протягом доби в межах 9,4...26,2 мкг/м³, у розрізі днів тижня – 12,0...23,5 мкг/м³, у розрізі місяців – 8,0...32,9 мкг/м³.

При цьому, отримані значення (за винятком окремих даних) загалом відповідають вимогам національних та міжнародним стандартам, а рівень якості повітря в місті є **добрий** та **допустимий**, рідше – **задовільний** (лише за вмістом PM_{2,5}).

При аналізі просторово-часових варіацій досліджуваних фракцій твердих частинок виявлено достовірні тенденції для добових (погодинних), тижневих (днях тижня) та сезонних (по місяцях року) концентрацій:

- добові: зростання рівня аерозольних частинок обох фракцій у вечірній час доби та їх зниження в обідню пору в 1,4-1,8 разів для PM_{2,5} та в 1,1-1,6 разів для PM₁₀;
- тижневі: найнижчі концентрації дрібнодисперсного пилу фіксувалися в неділю-понеділок, у вівторок – збільшення концентрацій на 14-28% для PM_{2,5} та 8-20% для PM₁₀;
- сезонні: збільшення концентрації PM_{2,5} та PM₁₀ у холодну пору року (січень), з поступовим їх зменшення з кожним наступним місяцем, досягаючи помітно найнижчих рівнів у теплий період року (травні), варіювання в 3,0-3,8 разів для PM_{2,5} та 1,9-3,1 разів для PM₁₀.

Sicard зі співавторами зазначає, що найбільш забруднені міста планети за показником PM_{2,5} (> 45 мкг/м³) знаходяться в Африці на південь від Сахари, а також в Східній та Південній Азії (зокрема в Індії (>75 мкг/м³), тоді як менш забруднені (<15 мкг/м³) – в Західній Європі, США та Японії (Sicard et al., 2023). Дослідники вважають, що високий вміст даних забруднюючих

речовин в розглянутих регіонах відображає широкий спектр джерел їх надходження, таких як викиди автотранспорту, промисловості та спалювання біомаси, зокрема, у Східній та Південній Азії (Zhang et al., 2019), а також мінеральний пил, переважно в Північній Африці та на Близькому Сході (Sicard et al., 2023).

Литовськими дослідниками за 15-ти річний період (2006-2022 рр.) помічено тенденцію до деякого відносного зниження рівнів дрібнодисперсних твердих частинок у повітрі країни. Так середньорічні концентрації PM_{2.5} варіювали в межах $\sim 8\text{--}15\text{ мкг/м}^3$, а PM₁₀ – $\sim 18\text{--}27\text{ мкг/м}^3$ (Davtalab et al., 2023).

Польські дослідники встановили, що концентрації твердих частинок PM_{2.5} на міській фоновій станції в м. Краків на вул. Буджака за період 2010-2019 рр. коливалась від 25 мкг/м^3 (середньорічна у 2019 р.) до 41 мкг/м^3 (середньорічна у 2012 р.). Причинами перевищення рівнів автори вказують викиди, пов'язані з рухом транспорту в центрі міста, викиди від промислових підприємств, теплоцентралей та електростанцій, викиди, пов'язані з приватним опаленням будівель, специфічні місцеві умови, що впливають на поширення забруднюючих речовин, а також несприятливі кліматичні умови. Найвищі концентрації спостерігалися взимку, коли добові концентрації коливалися від 4 до 306 мкг/м^3 . У весняний період добові концентрації коливалися від 6 до 158 мкг/м^3 , влітку – від 3 до 40 мкг/м^3 , восени – від 2 до 161 мкг/м^3 (Ziarnicka-Wojtaszek et al., 2024).

У містах Угорщини середні річні концентрації PM₁₀ часто не перевищують 40 мкг/м^3 (Ferenczi Z. et al., 2021).

У містах Північної Македонії повідомляється про відносно високі середньодобові концентрації дрібнодисперсних аерозольних частинок у повітрі, що часто перевищували нормативи ВООЗ. Так, наприклад, середні значення PM_{2.5} у м. Флоріні, м. Веві-Меліті та м. Ойкімос становили $24,51\text{ мкг/м}^3$, $20,76\text{ мкг/м}^3$ і $22,50\text{ мкг/м}^3$ відповідно, а середні значення PM₁₀ у м. Ойкімос, м. Анарджірой, м. Койладі – $56,79\text{ мкг/м}^3$, $37,85\text{ мкг/м}^3$ та 24 мкг/м^3 відповідно (Evangelopoulos et al., 2022).

У м. Тебріз (Іран) найвищі середньомісячні концентрації PM_{10} , зафіксовані у зимові (зокрема, у грудні, а саме для частинок $PM_{2.5}$ – 42,5 $мкг/м^3$) та весняні (зокрема, у травні а саме для частинок PM_{10} – 80,4 $мкг/м^3$) місяці (Barzeghar et al., 2020).

Дослідження проведені у містах Китаю по всій країні встановили відмінності між регіонами. Так, у більшості населених пунктів, які знаходяться на «окраїнах» країни (за винятком східних регіонів) середні значення $PM_{2.5}$ варіюють в межах 26-35 $мкг/м^3$. Рухаючись в напрямку до центральних регіонів країни їх вміст зростає до 36-45 $мкг/м^3$, а в східних та деяких північних – до 46-55 $мкг/м^3$ та навіть досягає 70 $мкг/м^3$. І лише в двох західних провінціях рівень $PM_{2.5}$ не перевищує 25 $мкг/м^3$ (Fan et al., 2021).

3.2. Оцінка впливу погодних умов на вміст $PM_{2.5}$ та PM_{10} за допомогою регресійного аналізу

Відомо, що основними факторами, які впливають на концентрацію твердих частинок в атмосфері, є природні та антропогенні джерела викидів, а також метеорологічні чинники. При цьому, якщо перші у тому чи іншому регіоні виявляють відносно стабільний вплив, то тоді провідну роль відіграють погодно-кліматичні умови, впливаючи на зміни концентрацій твердих часток (Liu et al., 2020). Останні ж, зростаючи, можуть створювати негативний вплив на здоров'я населення та мікрокліматичні умови відповідної місцевості (Fan, et al., 2021; Zhao et al., 2017) .

Для оцінки впливу метеофакторів на зміни концентрації дрібнодисперсних твердих частинок проведено регресійний аналіз та побудовано рівняння регресії (табл. 3.2). На станції, розміщеній на вул. Лесі України, 25 враховували вплив вологості повітря, температури та атмосферного тиску. На всіх інших станціях враховували вплив вологості повітря та температури, оскільки в конструкції станцій відсутній датчик атмосферного тиску.

Таблиця 3.2

Регресійні рівняння залежності концентрації твердих часток PM2.5 та PM10 в атмосферному повітрі в м. Чернівці від метеочинників і

PM 2,5		
Адреса станції		
вул. Ярослава Мудрого, 50	$pm2.5 = 23,4587 - 0,0090 \times hum - 0,6161 \times temp$	$R^2 = 0,1951$
вул. Лесі Українки, 25	$pm2.5 = -8,072e+01 + 6,181e-02 \times hum - 2,434e-01 \times temp + 8,943e-05 \times pres$	$R^2 = 0,1889$
вул. Смаль-Стоцького, 4	$pm2.5 = 24,2881 - 0,0262 \times hum - 0,5823 \times temp$	$R^2 = 0,1429$
вул. Горіхівська, 16	$pm2.5 = 24,2029 + 0,0030 \times hum - 0,8451 \times temp$	$R^2 = 0,1443$
вул. Винниченка, 9А	$pm2.5 = 21,7781 - 0,0556 \times hum - 0,1929 \times temp$	$R^2 = 0,0104$
вул. Пилипа Орлика, 1А	$pm2.5 = 28,7995 - 0,0510 \times hum - 0,6957 \times temp$	$R^2 = 0,2227$

PM10		
Адреса станції	Рівняння регресії	
вул. Ярослава Мудрого, 50	$pm10 = 28,9463 - 0,0256 \times hum - 0,3948 \times temp$	$R^2 = 0,0667$
вул. Лесі Українки, 25	$pm10 = -1,702e+02 + 1,819e-02 \times hum - 6,507e-01 \times temp + 1,985e-04 \times pres$	$R^2 = 0,1823$
вул. Смаль-Стоцького, 4	$pm10 = 33,9665 - 0,0979 \times hum - 0,4312 \times temp$	$R^2 = 0,0500$
вул. Горіхівська, 16	$pm10 = 34,8434 - 0,0758 \times hum - 0,8321 \times temp$	$R^2 = 0,1035$
вул. Винниченка, 9А	$pm10 = 30,4856 - 0,1138 \times hum - 0,0394 \times temp$	$R^2 = 0,0128$
вул. Пилипа Орлика, 1А	$pm10 = 37,1074 - 0,0889 \times hum - 0,5186 \times temp$	$R^2 = 0,1020$

PM2.5 слабо, але залежить від метеопараметрів на що вказує R^2 – 14–23 % варіації описують виведені рівняння. Для PM10 залежність від погоди є ще меншою – 5-10% варіацій описуються рівняннями. Це означає, що основними факторами формування концентрацій PM10 є інші чинники – джерела викидів, характер забудови, транспортне навантаження та сезонні

антропогенні процеси, тоді як погода відіграє другорядну роль.

Для фракції дрібнодисперсних частинок PM_{2.5} на всіх постах спостереження отримані лінійні регресійні моделі, що описують залежність концентрації частинок від відносної вологості повітря (hum), температури повітря (temp), а на окремих постах – також від атмосферного тиску (pres).

Для більшості станцій виявлено негативні коефіцієнти при температурі, що свідчить про тенденцію до зниження концентрації PM_{2.5} зі зростанням температури повітря. Це явище може бути пов'язане з посиленням вертикального перемішування повітря у теплий період року та зменшенням інтенсивності опалення.

Вплив вологості повітря є переважно слабким і змінним за знаком: на більшості постів спостережень коефіцієнти при hum мають від'ємні значення, що може свідчити про осадження аерозольних частинок за умов підвищеної вологості. Водночас на окремих станціях (зокрема, вул. Горіхівська, 16) зафіксовано слабкий позитивний зв'язок, що може пояснюватися утворенням гігроскопічних частинок або процесами вторинного аерозолеутворення.

Коефіцієнти детермінації (R^2) для моделей PM_{2.5} варіюють у межах 0,01–0,22, що вказує на низьку–помірну пояснювальну здатність моделей: метеорологічні чинники пояснюють не більше 22% варіацій концентрацій дрібнодисперсного пилу.

Для фракції PM₁₀ також отримані лінійні регресійні залежності концентрацій від температури та відносної вологості, а для станції на вул. Лесі Українки, 25 – додатково від атмосферного тиску.

У всіх моделях спостерігається стабільний від'ємний коефіцієнт при температурі, що свідчить про зменшення концентрації грубодисперсних частинок зі зростанням температури. Це пояснюється кращими умовами атмосферного перемішування у теплу пору року та зменшенням інтенсивності твердопаливного опалення.

Вологість повітря також має переважно від'ємний вплив на концентрації PM₁₀, що відповідає фізичним процесам зволоження та осадження грубих

частинок. Найслабший зв'язок зафіксовано на станції вул. Винниченка, 9А, де коефіцієнт при температурі майже нульовий, а R^2 мінімальний.

Значення коефіцієнта детермінації для PM_{10} перебувають у межах 0,01–0,18, що вказує на дуже слабку пояснювальну спроможність моделей: метеорологічні змінні пояснюють не більше 18% змін концентрацій PM_{10} .

Залежності, зокрема з температурним чинником встановлені й іншими науковцями. Так Bounakhla Y. з колегами у повітрі північно-західних міст Марокко (Африка) виявили негативну кореляцію температури з $PM_{2,5}$ взимку і влітку та позитивну з PM_{10} восени. Також авторами зафіксовані високі негативні кореляції відносної вологості з концентрацією твердих частинок обох фракцій протягом року (за винятком зими) та швидкості вітру (PM_{10} взимку і влітку; а з $PM_{2,5}$ лише влітку) (Bounakhla et al., 2023).

Подібні зв'язки були описані польськими дослідниками, які використовували PCA для концентрації твердих частинок $PM_{2,5}$ та PM_{10} в повітрі гірської долини в м. Новий Сонч (Польща). Дослідниками виявлено, що першим фактором на зміни вмісту $PM_{2,5}$ впливала температура повітря, тоді як у випадку з PM_{10} – комбінація факторів – температури повітря та швидкості вітру (мова йшла про зимовий період). Другим визначальним фактором для $PM_{2,5}$ стала швидкість вітру, а для PM_{10} – сукупність чинників – вологість повітря та атмосферний тиск. І третім фактором, щоправда значимим лише для фракції $PM_{2,5}$, – комбінація факторів – опади та відносна вологість повітря. Загалом, взимку (коли концентрація $PM_{2,5}$ була найвищою) мінливість рівня концентрації твердих частинок від впливу метеочинників головним чином залежала від температури (у ~44 % випадків), швидкості вітру (у ~19 % випадків), і в деякій мірі від опадів та вологості (лише у ~16 % випадків) (Zuśka et al., 2019).

У науковій статті представлені дослідження сезонних коливань аерозолів – дрібних ($PM_{2,5}$) і крупних (PM_{10}) частинок, а також чорного вуглецю (BC) – в умовах міського середовища Кенітри, Марокко. Основною метою було кількісне визначення впливу метеорологічних чинників, таких як

температура і вологість, на рівні забруднення, зокрема з використанням комплексного статистичного аналізу залежностей із затримкою. Результати підтвердили виражені сезонні варіації в забрудненні, де максимальні концентрації РМ-частинок зазвичай спостерігалися восени, тоді як найвищий рівень ВС припадав на літній період. Дослідження підкреслює, що метеорологія відіграє вирішальну роль, причому зв'язок між забруднювачами та погодними умовами, включно з транспортуванням аерозолів на великі відстані та низькою вологістю, є складним і нелінійним (Bounakhla et al., 2023).

Sohrab S. зі співавторами зазначають, що важливу та ефективну роль у вирішенні зменшення забруднення повітря дрібнодисперсними твердими частинками в умовах міста може відігравати ландшафтна структура (Sohrab et al., 2023), адже багато дослідників вважають, що забруднення повітря тісно пов'язане з моделями міського землекористування. І саме ландшафтне планування може покращити якість міського повітря у довгостроковій перспективі доведено, що впровадження заходів, таких як зелені насадження та збільшення кількості транспортних засобів на альтернативних джерелах палива, може допомогти зменшити забруднення РМ10 у районах з інтенсивним рухом транспорту та промисловою діяльністю. При цьому, розрізняють такі типи елементів ландшафтої структури як бар'єри від транспортування забруднення повітря РМ: лінійні, точкові та ареальні (дифузні) (Manakos, Braun, 2014).

У дослідженні Galán-Madruga зі співавторами запропоновано легкодоступну методологічну структуру для оцінки концентрацій дрібних твердих частинок РМ2,5 у повітрі. Автори розробили модель, що використовує множинний лінійний регресійний аналіз для встановлення зв'язку між рівнями РМ2,5 та метеорологічними умовами (такими як тиск, температура та вітер) у Сполученому Королівстві. Цей підхід забезпечує надійну альтернативу обмеженим даним моніторингових станцій і допомагає подолати недоліки супутникового моніторингу, викликані, наприклад, хмарністю. Успішна валідація моделі дозволила провести ретроспективний

аналіз та оцінити довгостроковий вплив забруднення $PM_{2,5}$ на здоров'я населення з 2000 по 2021 рік (Galán-Madruga et al., 2023).

Загалом регресійний аналіз показав, що температура та вологість повітря мають статистично помітний, проте слабкий вплив на концентрації $PM_{2.5}$ та PM_{10} у м. Чернівці. Метеорологічні чинники пояснюють лише незначну частку варіацій, що свідчить про провідну роль антропогенних джерел забруднення та локальних умов формування якості повітря.

ВИСНОВКИ

1. На основі багатомільйонних даних 6 автоматизованих станцій громадського моніторингу SaveEcoSensor м. Чернівці визначено концентрації дрібнодисперсних твердих частинок діаметром до 2,5 та до 10 мкм: середньодобові концентрації PM_{2.5} коливаються в межах 5,90–11,33 мкг/м³, PM₁₀ – 12,70–22,73 мкг/м³.

2. При аналізі просторово-часових варіацій PM_{2.5} та PM₁₀ виявлено достовірні добові, тижневі та сезонні тенденції їх зміни. Відмічено зростання рівня аерозольних частинок обох фракцій у вечірній і нічний час доби, та їх зниження (майже вдвічі) в обідню пору. В неділю та понеділок – концентрація твердих часток є найнижчою. Сезонна динаміка демонструє збільшення концентрації в осінньо-зимовий період (з максимумами в січні), та зменшення в весняно-літній період (з мінімумами в травні).

3. З'ясовано, що медіани середньодобових концентрацій твердих частинок фракцій PM_{2,5} та PM₁₀ загалом відповідає вимогам національних та міжнародних стандартів, а якість повітря в місті (за категоріями, рекомендованими Європейським агентством з охорони навколишнього середовища – ЕЕА), є «добрий» та «допустимий». Концентрації PM_{2,5} перевищують норми рекомендовані ВООЗ з листопада по березень за даними п'яти із шести станцій і коливаються в межах 15,3–23,5 мкг/м³

4. Регресійний аналіз показав залежність флуктуацій твердих частинок PM₁₀ та PM_{2,5} в атмосферному повітрі від температури та вологості, проте сила впливу слабка – модель описує 1–18% варіацій для PM₁₀ та 1–22% варіацій для PM_{2,5}, для сила впливу метеочинників середня – підпадають під виведені рівняння регресії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васенко О.Г., Карлюк А.А., Черба О.В. Сучасний стан системи моніторингу довкілля в Україні. *Науково-практичний журнал. Сер. Екологічні науки*. 2023. № 6 (51). С. 73–77.
2. Гринчишин Н.Н. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок (РМ 2,5) у містах України в умовах карантину та воєнного стану. *Вісник Львівського держ. університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 27. С. 6–15.
3. Гусак А.В, Любимова Н.О. Техніка безпеки при роботі за комп'ютером. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених*. Харків, 2017. Вип. 1. С. 107–109.
4. Гусев А., Легка Т. Моніторинг стану повітря в Україні та в ЄС. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки*. 2023. Вип. 1. С. 53–57.
5. Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем: постанова Кабінету Міністрів України від 18.06.2024 р. № 684. Редакція від 11.04.2025 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-п> (дата звернення: 16.11.2025).
6. Екологічний моніторинг довкілля. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: веб-сайт*. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/> (дата звернення: 18.11.2025)
7. Екологічний паспорт Чернівецької області за 2023 рік. Чернівці: Департамент екології та природних ресурсів Чернівецької обласної державної адміністрації, 2024. 150 с.
8. Затверджено механізм оперативного інформування населення із застосуванням індексу якості повітря в Україні. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: веб-сайт*. Режим доступу:

<https://mepr.gov.ua/zatverdzheno-mehanizm-operatyvnogo-informuvannya-naselennya-iz-zastosuvannyam-indeksu-yakosti-povitrya-v-ukrayini/>

9. Золотопуп В. Ю. Особливості охорони праці при роботі з комп'ютером. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dspace.pnpu.edu.ua/bitstream/123456789/16965/1/157.pdf>

10. Коваленко Л.О. Фоменко Г.Р. Аналіз забруднення атмосферного повітря міських територій. *Комунальне госп-во міст*. 2019. Том 1. С. 220–223.

11. Ломазов П.К., Павличенко А.В. Впровадження міжнародного досвіду в системи екологічного моніторингу атмосферного повітря в Україні. *Наукова весна: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених*. Київ, 2023. С. 114–116.

12. Ломакіна О.С., Телюра Н.О. Аналіз систем державного та громадського моніторингу атмосферного повітря в м. Харків та Харківській області. *Екологічні науки*. 2025. № 3(60). С. 77–82. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.14>

13. Марчишина Є. І. Охорона праці та профілактика здоров'я користувачів персональних комп'ютерів. *Збірник тез доповідей XIX міжнар. конф. науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування»* (25–29 березня 2019 року). Київ, 2019. С. 36-38. (<http://dglip.nubip.edu.ua/bitstream/123456789/6423/1/36.%D0%9C%D0%B0%D1%80%D1%87%D0%B8%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B02.pdf>)

14. Національний атлас України / за ред. Л. Г. Руденка. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.

15. Некос А., Молодан Я. Стан, проблеми та недоліки функціонування системи моніторингу атмосферного повітря м. Харкова. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. № 1 (2). С. 47–53.

16. Немченко І., Кучменко О., Компанець Е. Роль моніторингових системи оцінки якості атмосферного повітря у формуванні безпечного життєвого середовища. *Modern engineering and innovative technologies* 2023.

Вип. 1 (27-02). С. 19–25.

17. Николаєв А. М., Шевчук Ю. Ф. Зміни елементів клімат Чернівців під впливом глобального потепління. *Науковий вісник Чернівецького університету. Географія*. 2014. Вип. 724-725. С. 43–48

18. Орлова Н. О. Впровадження автоматизованих систем моніторингу якості води. *Актуальні проблеми захисту довкілля-2024: матеріали науково-практичної конференції* (11 квітня 2024 року, м. Київ). Київ: Український державний університет імені Михайла Драгоманова, 2024. С. 28–31.

19. Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 827. Редакція від 11.05.2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-п> (дата звернення: 16.11.2025).

20. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернівецькій області за 2022 рік. Чернівці: Департамент екології та природних ресурсів Чернівецької обласної державної адміністрації, 2023. 170 с.

21. Ткачук О.П., Вергеліс В.І. Екологічна ефективність громадського моніторингу атмосферного повітря в Україні. *Екологічні науки*. 2025. № 1(58). С. 157–163. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.27>

22. Ткачук О.П., Мазур О.В. Проблеми адаптації системи моніторингу атмосферного повітря в Україні до вимог Європейського Союзу. *Екологічні науки*. 2024. № 1(52), Том 1. С. 65–70.

23. Чугай А.В., Лавров Т.В. Громадський моніторинг як інструмент оцінки стану повітряного басейну в регіонах України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2022. № 30. С. 81–86.

24. Anenberg S. C., Mohegh A., Goldberg D. L., Kerr G. H., Brauer M., Burkart K., Lamsal L. Long-term trends in urban NO₂ concentrations and associated paediatric asthma incidence: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*. 2022. Vol. 6(1), P. 49–58.

25. Barzeghar V., Sarbakhsh P., Hassanvand M. S., Faridi S., Gholampour A. Long-term trend of ambient air PM₁₀, PM_{2.5} and O₃ and their health effects in Tabriz

city, Iran, during 2006–2017. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 54. Article 101988. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101988.

26. Bounakhla Y., Benchrif A., Costabile F., Tahri M., El Gouch B., El Hassan E. K., Bounakhla M. Overview of PM₁₀, PM_{2.5} and BC and their dependent relationships with meteorological variables in an urban area in Northwestern Morocco. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14 (1). P. 162–178.

27. Bounakhla Y., Benchrif A., Costabile F., Tahri M., El Gouch B., El Hassan E. K., Zahry F., Bounakhla M. Overview of PM₁₀, PM_{2.5} and BC and their dependent relationships with meteorological variables in an urban area in northwestern Morocco. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, no. 1, article 162. DOI: 10.3390/atmos14010162

28. Cassard Th., Jauvion G., Lissmyr D. High-Resolution Air Quality Prediction Using Low-Cost Sensors. 2020. arXiv preprint arXiv:2006.12092. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.12092>

29. Davtalab M., Byčenkienė S., & Bimbaitė V. Long-term spatial and temporal evaluation of the PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations in Lithuania. *Atmospheric Pollution Research*. 2023. Vol. 14 (12). 101951.

30. European Commission Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008. Official Journal L 152. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng> (дата звернення: 30.11.2025).

31. European Council Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*.

32. European Council Directive 2016/2284/EC of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. *Official Journal of the European Union*.

33. European Environment Agency. *Air quality in Europe – 2023 report*.

Copenhagen: ЕЕА, 2023. Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/analysis/publications/europes-air-quality-status-2023> (дата звернення: 30.11.2025).

34. Evangelopoulos V., Begou P., Zoras S. In-depth study of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations over a 12-year period and their elemental composition in the Lignite Center of Western Macedonia, Greece. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13 (11). 1900.

35. Fan H., Zhao C., Yang Y., Yang X. Spatio-temporal variations of the PM_{2.5}/PM₁₀ ratios and its application to air pollution type classification in China. *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. 692440.

36. Ferenczi Z., Imre K., Lakatos M., Molnár Á., Bozó L., Homolya E., Gelencsér A. Long-term characterization of urban PM₁₀ in Hungary. *Aerosol and Air Quality Research*. 2021. Vol. 21 (10). 210048.

37. Galán-Madruga D., Broomandi P., Satyanaga A., Jahanbakhshi A., Bagheri M., Fathian A., Kim J. R. A methodological framework for estimating ambient PM_{2.5} particulate matter concentrations in the UK. *Journal of Environmental Sciences*. 2024. Vol. 150. P. 676–691.

38. Galán-Madruga D., Broomandi P., Satyanaga A., Jahanbakhshi A., Bagheri M., Fathian A., Sarvestan R., Cárdenas-Escudero J., Cáceres J. O., Kumar P., Kim J. R. A methodological framework for estimating ambient PM_{2.5} particulate matter concentrations in the UK. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2025. Vol. 150, P. 676–691. DOI: 10.1016/j.jes.2023.11.019

39. Guevara M., Jorba O., Tena C., Denier van der Gon H., Kuenen J., Elguindi-Solmon N., Pérez García-Pando C. CAMS-TEMPO: global and European emission temporal profile maps for atmospheric chemistry modelling. *Earth System Science Data Discussions*. 2020. Vol. 71. P. 1–60.

40. Guo J., Chai G., Song X., Hui X., Li Z., Feng X., Yang K. Long-term exposure to particulate matter on cardiovascular and respiratory diseases in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. Article 1134341. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1134341>

41. Hammer M., Donkelaar A., Li C., Lyapustin A., Sayer A., Hsu N., Martin R. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998–2018). *Environmental Science & Technology*. 2020. Vol. 54 (13). P. 7879–7890.
42. Hoesly R.M., Smith S.J., Feng L., Klimont Z., Janssens-Maenhout G., Pitkanen T., Seibert J.J., Vu L., Andres R.J., Bolt R.M., Bond T.C., Dawidowski L., Kholod N., Kurokawa J., Li M., Liu L., Lu Z., Muntean M., O'Rourke P.R., Zhang Q. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development*. 2018. Vol. 11. P. 369–408. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
43. Karri, R. R., Vera, T., Hassan, S. K. M., Khoder, M. I., Dehghani, M. H., Mubarak, N. M., & Ravindran, G. (2024). Classification, sources, and occurrence of outdoor air pollutants: a comprehensive overview. *Health and Environmental Effects of Ambient Air Pollution*, 1-34.
44. Liu Z., Shen L., Yan C., Du J., Li Y., Zhao H. Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM_{2.5} and PM₁₀ in the Atmosphere. *Advances in Meteorology*. 2020. Vol. 145 (1). 5039613.
45. Maciejewska K. Short-term impact of PM_{2.5}, PM₁₀, and PM_c on mortality and morbidity in the agglomeration of Warsaw, Poland. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2020. Vol. 13 (6). P. 659–672.
46. Malings C. NASA Resources to support air quality monitoring and forecasting. *In training course for Jakarta city: air quality monitoring best practices: data collection, management and use*. 2023. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230006376/downloads/nasa-gmao-presentation-for-training-course-for-jakarta-city---cmalings-20230503-v3.pdf>
47. Manakos I., Braun M. Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends. Dordrecht: Springer, 2014. 441 c.
48. Martinková E., Kochergina Y. V. E., Šebek O., Seibert R., Chrastný V., Novák M., Komárek A. Winter-time pollution in Central European cities shifts the ²⁰⁸Pb/²⁰⁷Pb isotope ratio of atmospheric PM_{2.5} to higher values: Implications for lead source apportionment. *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 310. 119941.

49. Mayer H. Air pollution in cities. *Atmospheric environment*. 1999. Vol. 33. P. 1029–1037.
50. Parvez F., Lamancusa C., Wagstrom K. Primary and secondary particulate matter intake fraction from different height emission sources. *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 165. P. 1–11.
51. Peuch V.-H., Engelen R., Rixen M., Dee D., Flemming J., Suttie M., Ades M., Agustí-Panareda A., Ananasso C., Andersson E., Armstrong D., Barré J., Bousserez N., Dominguez J. J., Garrigues S., Inness A., Jones L., Kipling Z., Letertre-Danczak J., Parrington M., Razinger M., Ribas R., Vermoote S., Yang X., Simmons A., Garcés de Marcilla J., Thépaut J.-N. The Copernicus Atmosphere Monitoring Service: From Research to Operations. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2022. Vol. 103, No. 9. P. E2650–E2668. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0314.1>
52. Popoola L.T., Adebajo S.A., Adeoye B.K. Assessment of atmospheric particulate matter and heavy metals: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 15. P. 935–948.
53. Salami L., Popoola L. T. A comprehensive review of atmospheric air pollutants assessment around landfill sites. *Air, Soil and Water Research*. 2023. Vol. 16. 117–129.
54. Schultz M., Schröder S., Lyapina O., Cooper O., Galbally I., Petropavlovskikh I., Zhiqiang M. Tropospheric ozone assessment report: database and metrics data of global surface ozone observations. *Elem. Sci Anth.* 2017. Vol. 5. P. 58–71.
55. Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S. C., De Marco A., Paoletti E., Calatayud V. Trends in urban air pollution over the last two decades: a global perspective. *Science of the total environment*. 2023. Vol. 858. 160064.
56. Singh, S., Kulshrestha, M.J., Rani, N. *et al.* An Overview of Vehicular Emission Standards. *MAPAN* **38**, 241–263 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12647-022-00555-4>

57. Sohrab S., Csikos N., Szilassi P. Effects of land use patterns on PM₁₀ concentrations in urban and suburban areas. A European scale analysis. *Atmospheric Pollution Research*. 2023. Vol. 14 (12). 101942.

58. Southerland V., Brauer M., Mohegh A., Hammer M., Van Donkelaar A., Martin R., Anenberg C. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*. 2022. Vol. 6 (2). P. 139–146.

59. Wang H., Zhou J., Li X., Ling Q., Wei H., Gao L., Ding Y. Review on recent progress in on-line monitoring technology for atmospheric pollution source emissions in China. *Journal of Environmental Sciences*. 2023. Vol. 123. P. 367–386.

60. World Health Organization. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization, 2021. 273 c. ISBN 978-92-4-003422-8. Режим доступа: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (дата звернення: 30.11.2025).

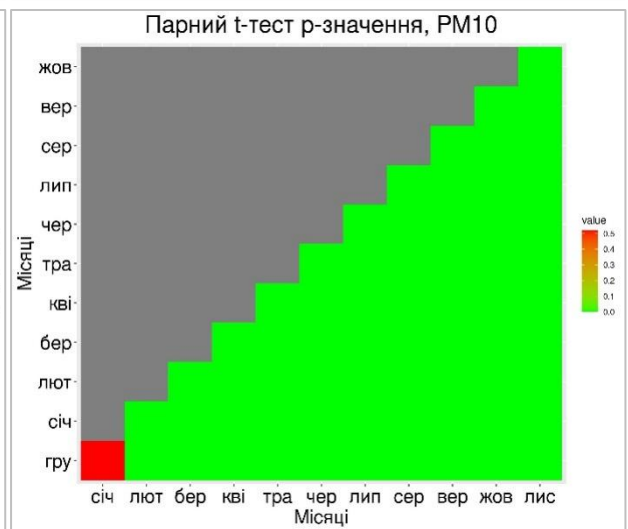
61. Yu, Wenhua et al. Estimates of global mortality burden associated with short-term exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) *The Lancet Planetary Health*, 2024ю Volume 8, Issue 3, e146 - e155 DOI: [10.1016/S2542-5196\(24\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00003-2)

62. Zhang Q., Zheng Y., Tong D., Shao M., Wang S., Zhang Y. Drivers of Improved PM_{2.5}air Quality in China from 2013 to 2017. *Proc. Natl. Acad. Sci*. 2019. Vol. 4. P. 2463–2469.

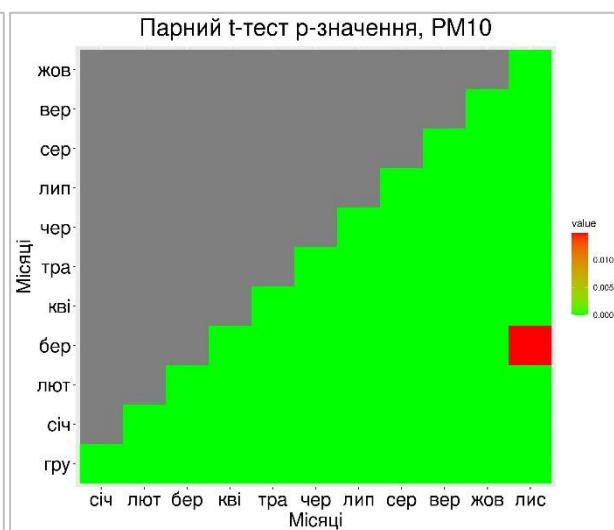
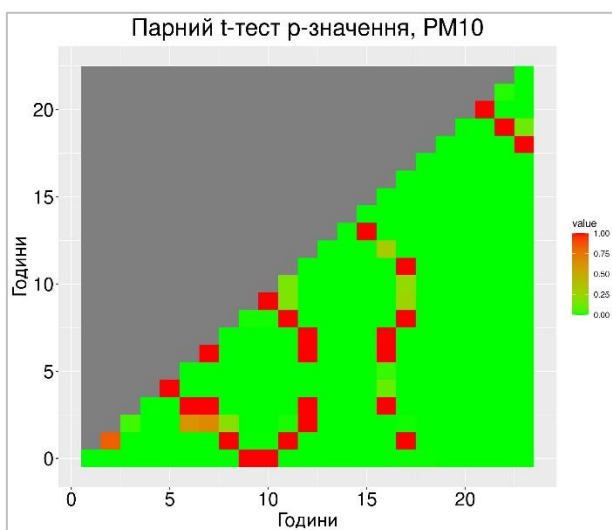
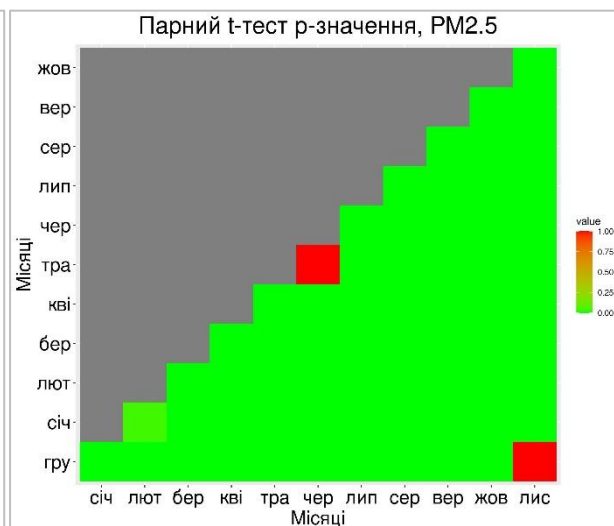
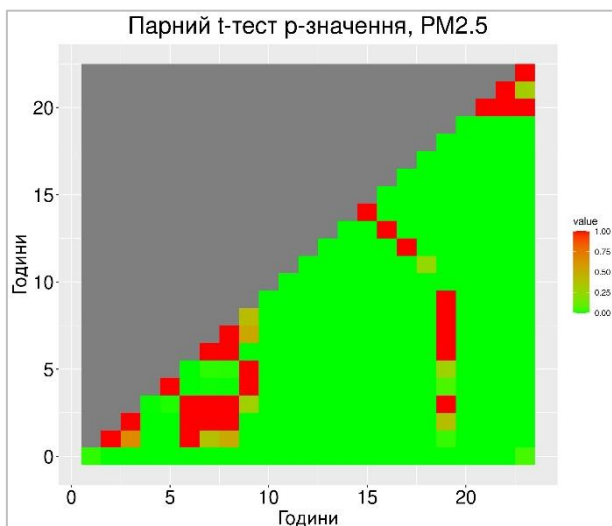
63. Ziernicka-Wojtaszek A., Zuśka Z., Kopcińska J. Assessment of the effect of meteorological conditions on the concentration of suspended PM_{2.5} particulate matter in central Europe. *Sustainability*. 2024. Vol. 16 (11). P. 479–492.

64. Zuśka Z., Kopcińska J., Dacewicz E., Skowera B., Wojkowski J., Ziernicka-Wojtaszek A. Application of the Principal Component Analysis (PCA) method to assess the impact of meteorological elements on concentrations of particulate matter (PM₁₀): a case study of the mountain valley (the Sącz Basin, Poland). *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Vol. 674–683.

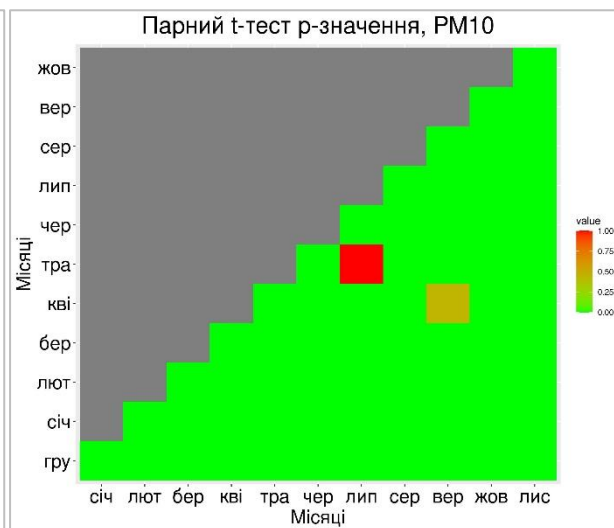
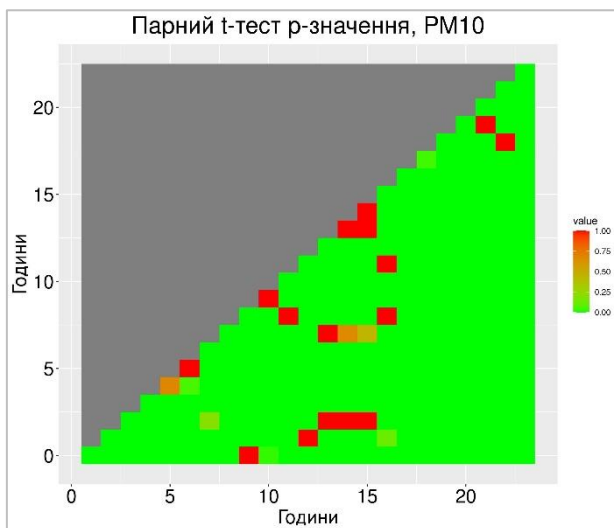
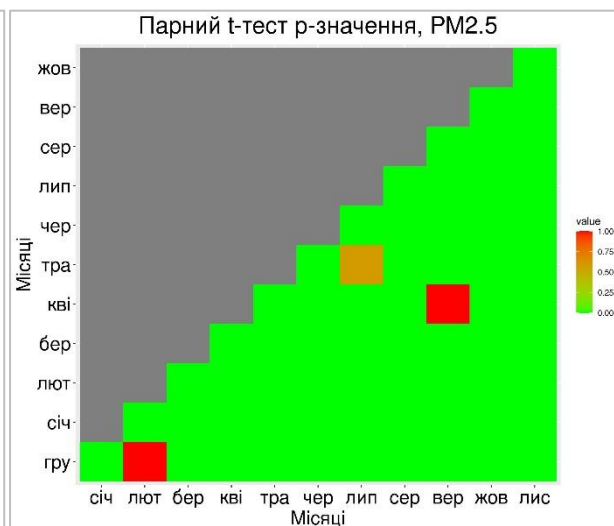
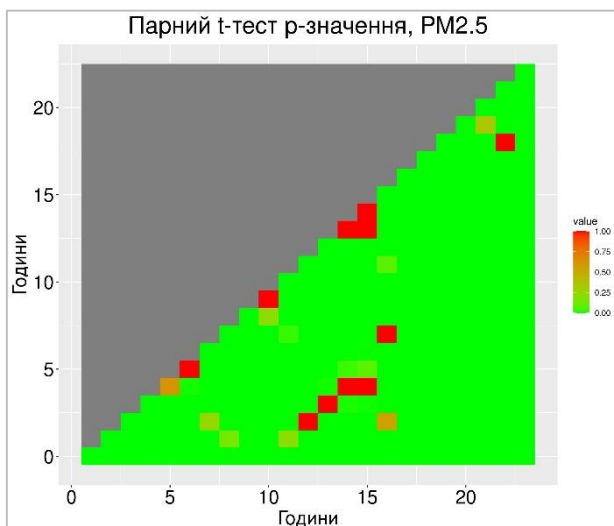
ДОДАТКИ



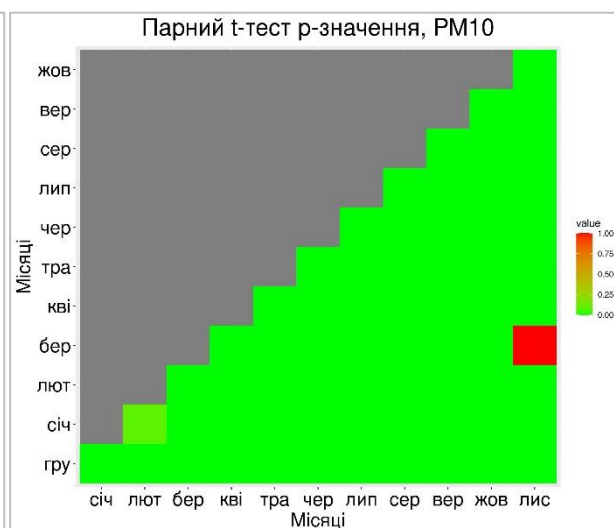
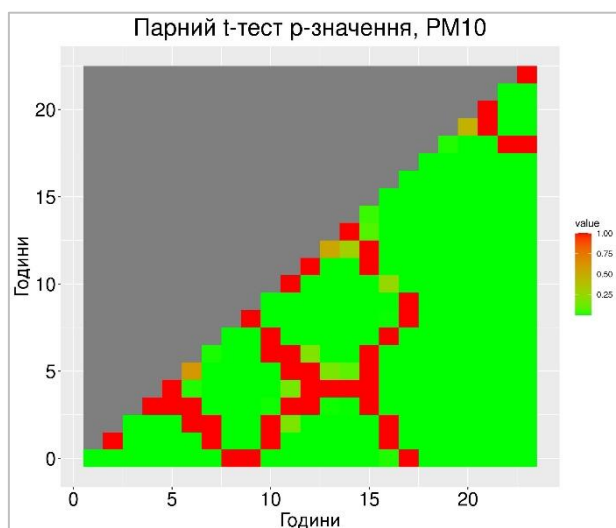
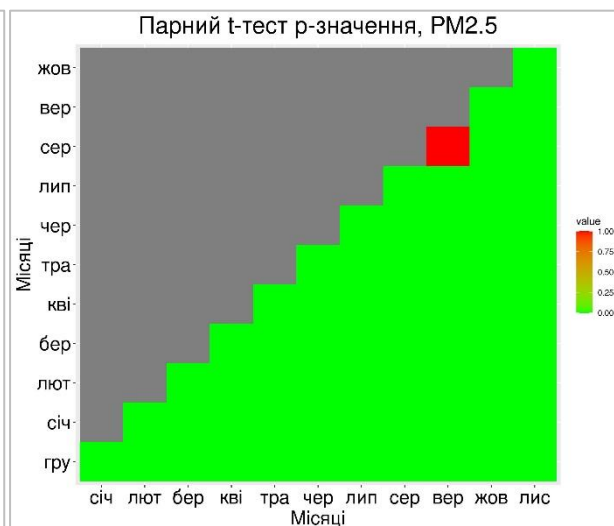
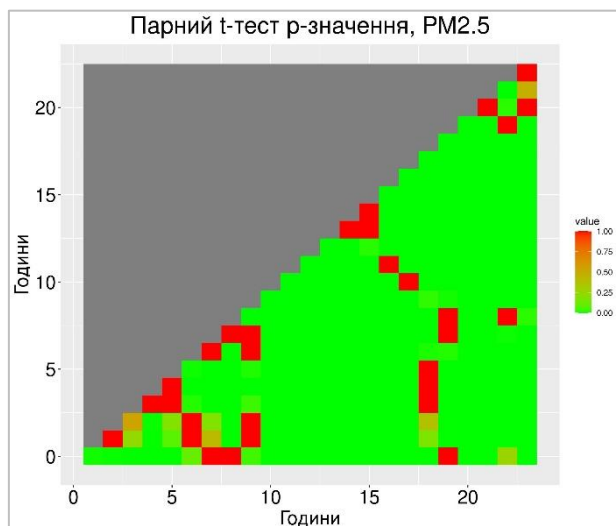
Б) вул. Степана Смаль-Стоцького, 4



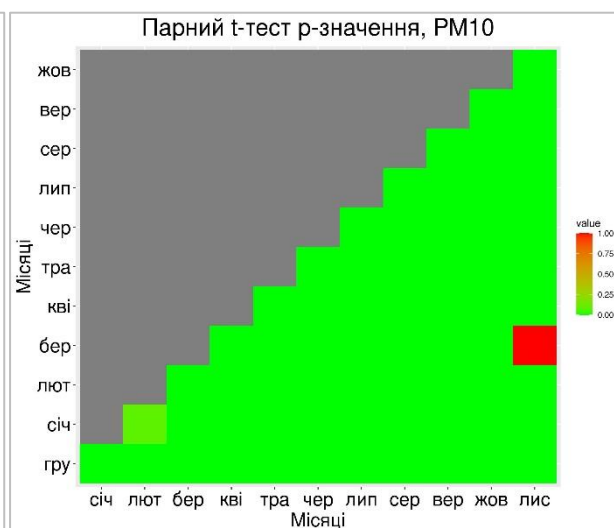
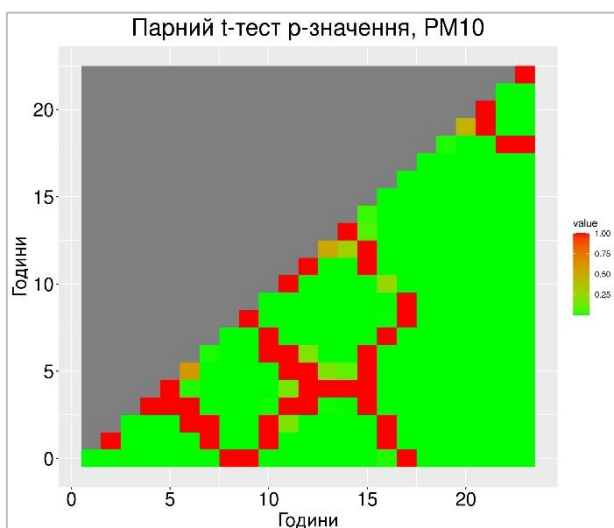
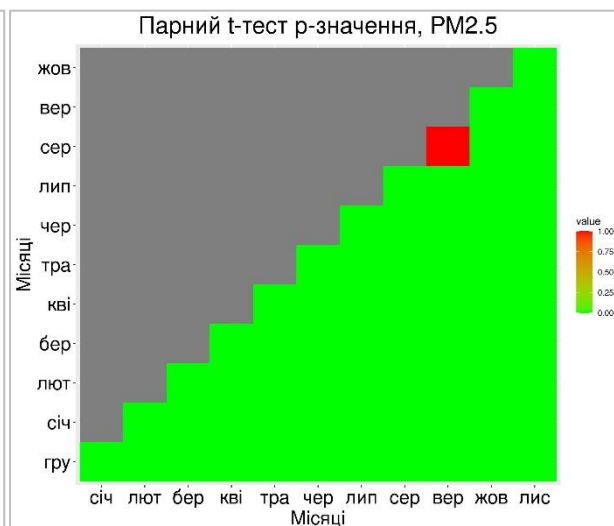
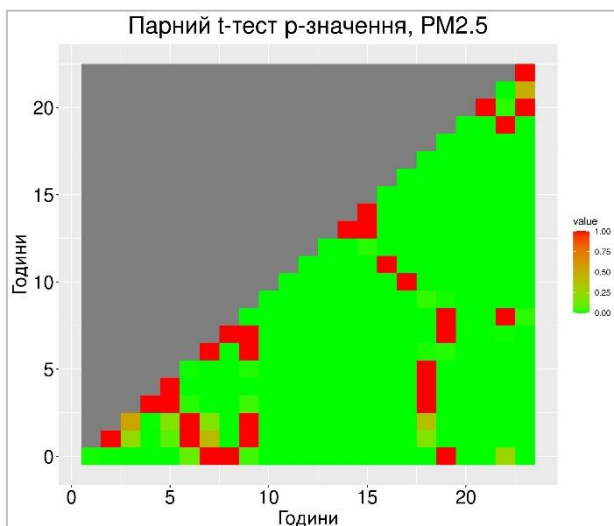
В) вул. Горіхівська, 16



Г) вул. Володимира Винниченка, 9А



Д) вул. Пилипа Орлика, 1А



ДОДАТОК Б**Техніка безпеки**

Дану роботу ми виконували за допомогою комп'ютера. При цьому потрібно дотримуватись техніки безпеки.

Відповідні робочі місця заборонено облаштовувати у підвальних або цокольних приміщеннях будинків. Приділити увагу забезпеченню достатнім для здійснення роботи рівнем освітлення.

Особливої уваги потребують заходи дотримання протипожежної безпеки, електромережі мають бути забезпечені від виникнення короткого замикання, а також від перепадів мережевої напруги. У приміщенні, де одночасно де використовують 5 комп'ютерів, на доступному та помітному місці встановлюють аварійний резервний вимикач, який повністю вимикає електронне живлення приміщення (Охорона праці..., 2020).

Основним обладнанням робочого місця користувача комп'ютера є монітор, системний блок та клавіатура. Робочі місця мають бути розташовані на відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін на відстані 1 м, між собою на відстані не менше 1,5 м (Гусак, Любимова, 2017).

Робочі місця слід розташовувати відносно джерела природного світла (вікон) таким чином, щоб світло падало збоку, переважно зліва. Також робоче місце має відповідати сучасним вимогам ергономіки:

- стіл повинен мати висоту поверхні 680 - 800 мм., ширину 600 – 1400 мм. і глибину 800 - 1000 мм. (такі параметри забезпечують можливість виконання операцій в зоні досяжності працівника);
- робочий стілець робочий стілець має бути підйомно-поворотним, з можливістю регулювання висоти, бажано зі стаціонарними або змінними підлікотниками і напівм'якою нековзкою поверхнею сидіння, що легко чиститься і не електризується;

Працюючи за комп'ютером, рекомендовано дотримуватися правил тривалості роботи, правильної постави, розміру шрифтів та зображень, вимог до приміщення тощо (Золотопуп, 2016; Марчишина, 2019).