

УДК 502.31:504.05

Stanislav Adamenko, Post-Graduate of Department of Ecology

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua

Liudmyla Arkhylova, Doctor of Technical Science, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943>

e-mail: konsevich@ukr.net

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

STUDY OF PATTERNS OF PM_{2.5} AND PM₁₀ CHANGES IN THE ATMOSPHERIC AIR OF IVANO-FRANKIVSK REGION

Abstract. *The purpose of this research is to analyse the temporal patterns of changes in concentrations of dust particles – aerosols, regression modeling of the interdependence of PM_{2.5} and PM₁₀ at the level of instantaneous, average hourly, average daily and average weekly concentrations, and assessment of the impact of the anthropogenic component of dust pollution of atmospheric air in the Ivano-Frankivsk region on regularities of the temporal distribution of these shares. The database for the study included measurements of the concentration of PM₁₀, PM_{2.5} every hour at four Ecocity public monitoring stations: in the central part of the city of Ivano-Frankivsk, in the village of Bovshiv within the influence of the Burshtyn TPP, in the village of Broshniv-Osada within the influence of the woodworking enterprise "SVISS KRONO" and within the recreational territory of the village of Mykulychyn, Nadvirnyan district. The general regularity of the temporal distribution of PM₁₀, PM_{2.5} was established for all posts for daily fluctuations – the highest concentrations are observed at night, the lowest – during the period of maximum daily temperatures. It has been proven by actual data that the greater the level of atmospheric air pollution (the greater the anthropogenic component of PM), the higher the daily concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and the more often the one-time standards of solid suspended particles are exceeded. According to the data of monitoring stations from the territories with different anthropogenic influence, functional dependences of PM_{2.5} content on PM₁₀ content were obtained for instantaneous values, hourly average values, daily average values, and weekly average values. The scientific novelty of the conducted research consists in the establishment of identical functional interdependence of temporal changes in concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ dust particles within a conditionally clean area and within the limits of the influence of stationary sources of pollution with a high level of direct regression dependence and a coefficient of determination greater than 0.9 in all cases. This allows us to conclude that the temporal patterns of changes in both PM_{2.5} and PM₁₀ will not differ in clean and polluted air conditions for the Ivano-Frankivsk region. In conditions of incomplete data on the temporal distribution of the concentration of PM₁₀, the obtained equations can be used to forecast the temporal distribution of the concentration of PM_{2.5}.*

Keywords: *time regularities, concentrations of dust particles, functional dependencies.*

С.Я. Адаменко, Л.М. Архипова

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІН $PM_{2,5}$ ТА PM_{10} В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ПРИКАРПАТТЯ

Анотація. Мета даного дослідження – проведення аналізу часових закономірностей змін концентрацій пилових часток – аерозолів, регресійне моделювання взаємозалежності $PM_{2,5}$ та PM_{10} на рівні миттєвих, середньогодинних, середньодобових та середньотижневих концентрацій та оцінка впливу антропогенної складової пилового забруднення атмосферного повітря в Івано-Франківській області на закономірності часового розподілу цих часток.

База даних для дослідження включала виміри концентрації PM_{10} та $PM_{2,5}$ через кожну годину на чотирьох станціях громадського моніторингу Есосіту: в центральній частині м. Івано-Франківська, в с. Бовшів в межах впливу Буришинської ТЕС, в селищі Брошнів-Осада в межах впливу деревообробного підприємства «СВИСС КРОНО» та в межах рекреаційної території с. Микуличин Надвірнянського району. Встановлена загальна закономірність часового розподілу PM_{10} , $PM_{2,5}$ для всіх постів для добових коливань – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур. Доведено фактичними даними, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова PM), тим вищі добові концентрації PM_{10} , $PM_{2,5}$ і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток.

За даними станцій моніторингу з території із різним антропогенним впливом були отримані функціональні залежності вмісту $PM_{2,5}$ від вмісту PM_{10} для миттєвих значень, середньогодинних значень, середньодобових значень та середньотижневих значень. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у встановленні ідентичних функціональних взаємозалежностей часових змін концентрацій частинок пилу $PM_{2,5}$ та PM_{10} в межах умовно чистої території та в межах впливу стаціонарних джерел забруднення із високим рівнем прямої регресійної залежності та коефіцієнтом детермінації більше 0,9 у всіх випадках. Це дозволяє зробити висновок про те, що часові закономірності змін як $PM_{2,5}$, так і PM_{10} не будуть відрізнятися в умовах чистого повітря і забрудненого для Івано-Франківської області. В умовах неповних даних за часовим розподілом концентрації PM_{10} за отриманими рівняннями можна здійснювати прогноз часового розподілу концентрації $PM_{2,5}$.

Ключові слова: часові закономірності, концентрації пилових часток, функціональні залежності.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.47-58>

Вступ

До основних антропогенних забруднювачів повітря, що мають значний ризик для здоров'я, відносять тверді мікрочастинки діаметром 10; 2,5 мікрона та менше (PM_{10} ; $PM_{2,5}$) [1]. Тверді частинки PM – також відомі як частки атмосферних аерозолів, атмосферні тверді частинки, тверді частинки або завислі тверді частинки (ТЧ або PM) – є мікроскопічними частинками з твердої або рідкої речовини, що знаходяться в завислому стані в атмосферному повітрі [2].

Доведена їх небезпека для організму людини полягає у здатності глибоко проникати в легені й потрапляти в кров; спричиняти захворювання як серцево-судинної, так і дихальної системи; провокувати інсульт, рак легенів і хронічну обструктивну хворобу легень [3].

Вміст цих речовин у повітрі нормується рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [4], в яких безпечними вважаються рівні $PM_{2,5}$ 5 мкг/м^3 (ці рівні періодично переглядаються, останній перегляд ВООЗ від 22 вересня 2021 року). Внутрішні українські нормативи з огляду на Євроінтеграційний курс повинні відповідати європейським директивам [5]. Директива 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря для Європи» встановлює граничне середньорічне значення для $PM_{2,5}$ на рівні 20 мкг/м^3 . Діюче в ЄС середньодобове граничне значення PM_{10} складає 50 мкг/м^3 (за умови не більше 35 перевищень на рік) [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Джерелами утворення пилових часток є природна та антропогенна діяльності. $PM_{2,5}$ і PM_{10} можуть адсорбувати на своїх поверхнях інші шкідливі речовини й викликати додаткові негативні наслідки для здоров'я після їх потрапляння в організм людини [7]. Атмосферні аерозолі є продуктом складної сукупності фізико-хімічних процесів у атмосфері [8]. Велика кількість аерозолів утворюється в результаті природних процесів [9]. До природних джерел належать аерозолі морської солі, вулкани, лісові пожежі, пилові бурі, рослинність і біологічні аерозольні частинки [10]. Антропогенні джерела твердих мікрочастинок включають викиди транспортних засобів, спалювання твердого палива і побутової біомаси, промислові викиди, сільськогосподарську діяльність [11, 12].

У середньому ґрунтовий покрив та рослинний світ дають понад 40% атмосферних аерозолів, водна поверхня – 10-20%, промислові підприємства – до 20%, транспорт – трохи більше 10% [13]. Максимальний антропогенний внесок припадає на енергетику та транспорт, які дають 2/3 загальної кількості частинок антропогенного походження [14, 15].

У багатьох регіонах світу виявлені чіткі сезонні закономірності динаміки концентрації $PM_{2,5}$ і PM_{10} [16, 17]. Науковцями різних країн встановлено, що просторово-часові коливання концентрацій $PM_{2,5}$ і PM_{10} є результатом різних типів і компонентів антропогенних впливів переважно від спалювання палива [18, 19, 20]. Але головною причиною просторово-часових коливань концентрацій $PM_{2,5}$ і PM_{10} є природні чинники, серед яких атмосферні процеси мають провідну роль [21, 22]. Іноді відбуваються зміни природних джерел викидів через екстремальні погодні явища, такі як лісові пожежі та пилові бурі, що переносяться вітром [23, 24]. Провідними джерелами антропогенних глобальних викидів $PM_{2,5}$ і PM_{10} у всьому світі є спалювання викопного палива в комунальному господарстві, промисловості та для виробництва електроенергії [25]. Основними джерелами високих рівнів твердих мікрочастинок у великих містах є як викиди транспортних засобів, так і викиди від систем центрального опалення [26, 27].

Мета роботи

Це дослідження має на меті проаналізувати часові закономірності зміни концентрацій пилових часток, змодельовати взаємозалежність $PM_{2.5}$ і PM_{10} та оцінити антропогенну складову пилового забруднення атмосферного повітря в Івано-Франківській області.

Матеріали і методи

База даних для дослідження включала виміри концентрації PM_{10} та $PM_{2.5}$ разом із температурою повітря, атмосферним тиском, відносною вологістю повітря через кожну годину по кожному параметру зі станцій громадського моніторингу Esocity в центральній частині м. Івано-Франківська, в с. Бовшів поблизу Бурштинської ТЕС, в селищі Брошнів-Осада поблизу деревообробного підприємства та в межах рекреаційної території с. Микуличин Надвірнянського району. Поблизу останньої станції спостереження відсутні стаціонарні джерела забруднення та автомагістралі.

Виклад основного матеріалу

Початковий аналіз проводився за даними станції м. Івано-Франківська. Середньогодинні значення концентрації частинок пилу $PM_{2.5}$ та PM_{10} були отримані із загальної кількості більше 7000 значень за 2019 р. зі станції громадського моніторингу в центральній частині міста Івано-Франківська. Статистичний розподіл середньогодинних значень (кожен значення отримано як середнє арифметичне з понад 600 показників цієї години протягом року) доводить, що концентрація $PM_{2.5}$ має тенденцію до зниження протягом ранкових і денних годин, досягаючи мінімуму близько 16-17 години, а потім починає швидко зростати ввечері та досягає максимальних значень близько опівночі (23-24 години) (рис. 1). Мінімальне та максимальні значення в межах урбанізованої території (станція розташована в центрі м. Івано-Франківська) коливаються від 6,5 до 15 $мкг/м^3$, що знаходиться в допустимих межах якості повітря (табл. 1).



Рис. 1. Добові зміни концентрації частинок пилу $PM_{2.5}$ в м. Івано-Франківську

Таблиця 1. Нормування пилового забруднення атмосферного повітря, мкг/м³ [4, 5, 6]

Речовина	Час осереднення	Україна	ЄС	США	ВООЗ
PM10	24 год.	0,05	0,05	0,15	0,05
	1 рік	-	0,04		0,02
PM2,5	24 год.	0,025	-	0,035	0,025
	1 рік	-	0,025	0,015	0,015

Для оцінки релевантності отриманих результатів аналогічний розподіл середньогодинних значень за 18 жовтня 2022 року був отриманий зі станцій, які розташовані (рис. 2):

- в с. Бовшів поблизу Бурштинської ТЕС – найбільшого забруднювача атмосферного повітря на Прикарпатті (ряд 1);
- в селищі Брошнів-Осада (ряд 3) поблизу діючого деревообробного підприємства, що входить в п’ятірку найбільших забруднювачів атмосферного повітря на Прикарпатті;
- в межах рекреаційної території Надвірнянського району (ряд 2) – контрольна точка без антропогенної складової забруднення повітря;
- в межах м. Івано-Франківська (ряд 4) (та ж станція №1 – урбанізована територія із забрудненням від транспорту без перевищення нормативних показників).

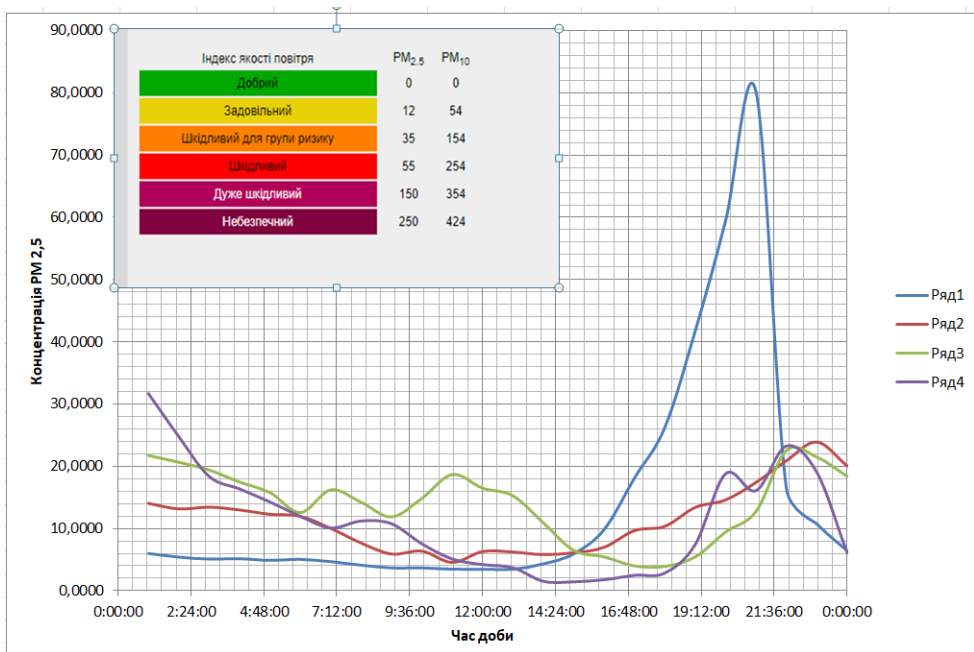


Рис. 2. Порівняння закономірностей добової зміни концентрацій PM_{2,5} в точках з різним рівнем антропогенного навантаження

Particulate matter (PM) – це мікроскопічні тверді частинки. Фактично – це все те, що є у повітрі, що не є газом і складається з величезного різноманіття хімічних сполук та матеріалів, деякі з яких можуть бути токсичними [3, 21].

Аналіз отриманих даних показує, що в межах рекреаційної території спостерігається найнижчий рівень концентрації $PM_{2,5}$ та аналогічний (див. рис. 1) добовий розподіл середньогодинних значень, отриманий з масиву декількох тисяч вимірювань. Загальна закономірність для всіх постів для конкретної доби – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур.

Порівняння даних постів моніторингу підтверджує висновок про те, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова PM), тим вищі добові концентрації і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток. Підтвердженням є максимальні пікові значення, що спостерігались на станції в с. Бовшів (на відстані до 3 км від стаціонарних джерел забруднення Бурштинської ТЕС), які сягали 80 мкг/м^3 , що за індексом якості повітря відповідає дуже шкідливому рівню для громадського здоров'я.

Антропогенне забруднення деревообробного підприємства в закономірностях добових змін $PM_{2,5}$ проявилось не стільки у перевищенні максимальних граничних концентрацій, скільки у зміні нормального розподілу. Тут спостерігаються декілька пікових значень (див. рис. 2). Можемо стверджувати, що ранкове підвищення з 6 до 14 години є аномальним для загальних закономірностей добових коливань аерозолів в атмосферному повітрі Прикарпаття і пов'язано із викидами деревообробного підприємства (станція моніторингу розташована на відстані 1,5 км від стаціонарних джерел викидів).

Надалі спробуємо порівняти отримані середньогодинні значення для $PM_{2,5}$ та PM_{10} (рис. 3). Очікувана гіпотеза подібного розподілу підтвердилась, чого і слід було очікувати, оскільки PM_{10} включає $PM_{2,5}$.



Рис. 3. Порівняння середньогодинних змін концентрацій частинок пилу $PM_{2,5}$ та PM_{10} в м. Івано-Франківську

PM_{10} має також тенденцію до зниження протягом ранкових і денних годин, досягаючи мінімуму о 17 годині, а потім швидко зростає в часі та досягає максимальних значень о 24 годині. Мінімальне та максимальні значення в межах м. Івано-Франківська коливаються від 12,5 до 27 мкг/м^3 , що знаходиться в межах задовільної якості повітря.

Для порівняння добових змін і взаємозалежності концентрацій часток PM_{2,5} та PM₁₀ були проаналізовані дані за добу 31 жовтня 2022 р. зі станції в с. Бовшів, що відображають забруднення від Бурштинської теплової електростанції за переважаючою розою вітрів (рис. 4).

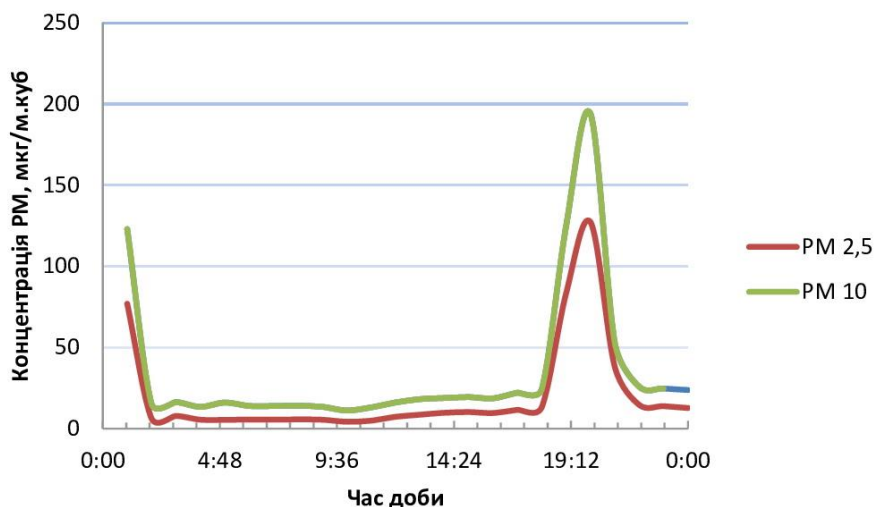


Рис. 4. Взаємозалежність миттєвих змін концентрацій частинок пилу PM_{2,5} та PM₁₀ в межах впливу стаціонарних джерел забруднення БуТЕС

Амплітуда добових значень PM₁₀ коливається від мінімального значення 18 мкг/м³ о 13 годині до 194 мкг/м³ о 20 годині, при цьому перевищення добових допустимих значень спостерігається також з 19 до 21 години, а також опівночі. Амплітуда добових значень PM_{2,5} коливається від мінімального значення 8 мкг/м³ о 13 годині до 127 мкг/м³ о 20 годині, при цьому перевищення добових допустимих значень спостерігається також з 19 до 21 години та опівночі.

Отже, наведені дані зі станції моніторингу, де спостерігається суттєве техногенне забруднення атмосферного повітря пиловими частками від спалювання вугілля на тепловій електростанції, доводять чітку взаємозалежність часток PM₁₀ та PM_{2,5}. Обчислений коефіцієнт кореляції складає 0,99.

Обидва показники (PM_{2,5} та PM₁₀) мають схожі денні тренди, де концентрація зменшується вдень і збільшується ввечері та вночі. Хоча абсолютні значення для PM₁₀ вищі за PM_{2,5}, обидва показники мають схожі форми денних циклів. Ці спостереження вказують на те, що джерела і процеси, які впливають на денні концентрації PM_{2,5} та PM₁₀, є подібними або взаємопов'язаними.

Отже, проведено дослідження взаємозалежності добових змін концентрацій частинок пилу PM_{2,5} та PM₁₀ в межах умовно чистої території та в межах впливу стаціонарних джерел забруднення показує високий рівень прямої кореляційної залежності на рівні більше 0,95. Це дозволяє зробити висновок про те, що часові закономірності змін як PM_{2,5} так і PM₁₀ не будуть відрізнятися в природних умовах чистого повітря і антропогенно

перетвореного. Тобто, в умовах неповних даних за часовим розподілом концентрації PM10 можна здійснювати прогноз часового розподілу концентрації PM2,5 і навпаки.

Використаємо лінійну регресію (дані станції с. Микуличин), щоб знайти математичну залежність між середньогодинними значеннями PM2,5 та PM10 для рекреаційної території. У цьому аналізі PM10 буде виступати як незалежна змінна, а PM2,5 – як залежна. Математична залежність між середніми годинними значеннями PM2,5 та PM10 описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5501 \times PM_{10} - 0,0757, \quad (1)$$

де PM2,5 і PM10 вимірюються у мкг/м³.

Коефіцієнт детермінації R^2 для цієї моделі становить приблизно 0,9794, що свідчить про лінійний зв'язок між PM2,5 та PM10 на погодинному рівні.

В подальшому ми розглянули середньодобові значення для PM2,5 та PM10 для станції в с. Брошнів-Осада, що відображають періодичні забруднення від стаціонарних джерел деревообробного комбінату (рис. 5).

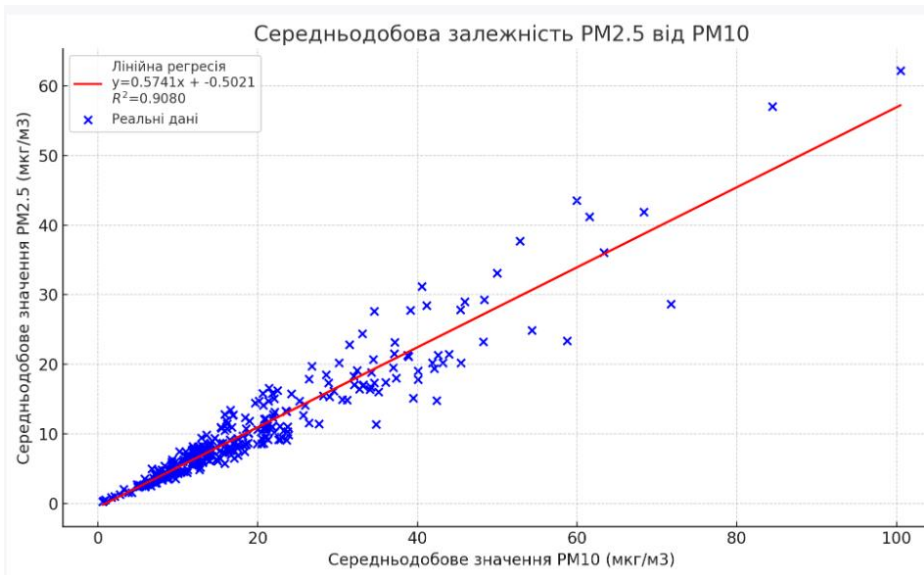


Рис. 5. Залежність середньодобових змін концентрацій частинок пилу PM2,5 та PM10 для території з антропогенним навантаженням

Середньодобові зміни концентрацій частинок пилу пов'язані лінійною залежністю із коефіцієнтом регресії 0,9. Математична залежність між середньодобовими значеннями PM2,5 та PM10 описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5741 \times PM_{10} - 0,5021. \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 для цієї моделі становить приблизно 0,9080, що свідчить про високий рівень зв'язку між PM2,5 та PM10 на рівні середньодобових значень.

Для оцінки взаємозв'язку середньотижневих значень були використані дані з рекреаційної незабрудненої території (станція в с. Микуличин Надвірнянського району). Після обчислення середньотижневих значень для PM_{2,5} та PM₁₀ було побудовано графічне представлення залежності між PM₁₀ та PM_{2,5} (рис. 6). За допомогою лінійної регресії встановлено математичну залежність (3).

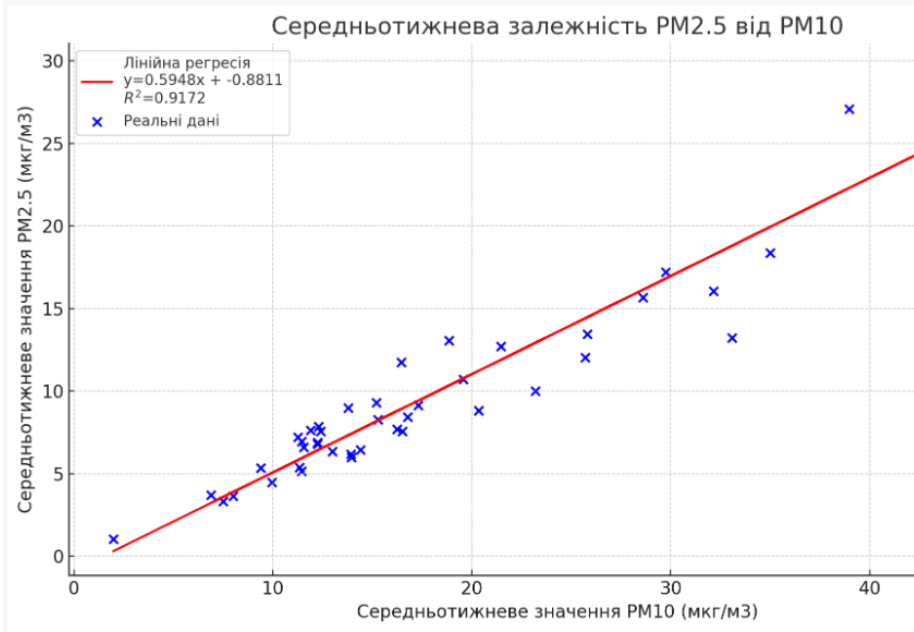


Рис. 6. Залежність середньотижневих змін концентрацій частинок пилу PM_{2,5} та PM₁₀ для рекреаційної території без антропогенного навантаження

На графічному представленні усіх залежностей PM_{2,5} від PM₁₀ сині крапки представляють реальні значення, червона лінія представляє лінійну регресію між цими значеннями.

Отримана математична залежність між середньотижневими значеннями PM_{2,5} та PM₁₀ описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5948 \times PM_{10} - 0,8811. \quad (3)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 для цієї моделі становить приблизно 0,9172, що підтверджує високий рівень зв'язку між PM_{2,5} та PM₁₀ на тижневому рівні.

Висновки

Отже, в результаті проведених досліджень було доведено, що добовий розподіл концентрацій пилу в часі обох показників PM_{2,5} та PM₁₀ має схожі тренди і закономірності, де концентрація зменшується вдень та зростає вночі. Для урбанізованої території м. Івано-Франківська та рекреаційних територій Прикарпаття на прикладі даних станції с. Микуличин абсолютні значення концентрацій не перевищують встановлених норм доброї та задовільної якості

повітря за Індексом якості повітря. Добові зміни показників PM_{2,5} та PM₁₀ в межах впливу стаціонарних джерел забруднення деревообробного підприємства та Бурштинської теплової електростанції демонструють значні коливання із виходом за межі встановлених нормативів. Найвищі миттєві перевищення концентрацій аерозолів спостерігаються вночі.

Загальна закономірність для всіх постів для конкретної доби – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур. Порівняння даних постів моніторингу підтверджує висновок про те, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова РМ), тим вищі добові концентрації і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток. Підтвердженням є максимальні пікові значення, що спостерігались на станції в с. Бовшів (на відстані до 3 км від стаціонарних джерел забруднення Бурштинської ТЕС), які сягали 80 мкг/м³, що за індексом якості повітря відповідає дуже шкідливому рівню для громадського здоров'я.

За даними станцій моніторингу з територій із різним антропогенним впливом були отримані функціональні залежності вмісту РМ_{2,5} від вмісту РМ₁₀ для миттєвих значень, середньогодинних значень, середньодобових значень та середньотижневих значень. У всіх випадках значення коефіцієнтів детермінації для регресійних моделей складає більше 0,9.

Проведене дослідження часових змін і взаємозалежності аерозольних часток в атмосферному повітрі дозволяє зробити висновок, що джерела і процеси, які впливають на характер розподілу концентрації РМ_{2,5} та РМ₁₀, є подібними та взаємопов'язаними. Ймовірно, часові зміни концентрацій аерозолів підпорядковуються добовим змінам метеорологічних параметрів. Дослідження цього є предметом наших подальших досліджень.

REFERENCES

1. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Retrieved from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
2. Liu, Y., Ma, H., Zhang, N., & Li, Q. (2022). A systematic literature review on indoor PM_{2.5} concentrations and personal exposure in urban residential buildings. *Heliyon*. 2022 Aug 10;8(8):e10174. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10174>
3. Golik, Yu.S., Maksyuta, N.S., Shevchenko, S.V., & Chepurko, A.O. (2021). Experimental study of atmospheric air pollution by PM_{2.5} and PM₁₀ dust particles. In *Collection of materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Ecology. Environment Energy Saving", dedicated to the 203rd anniversary of the Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University (December 2-3, 2021)* (pp. 105-111). Poltava: NUPP (in Ukrainian). [Голік Ю.С., Максютя Н.С., Шевченко С.В., Чепурко А.О. Експериментальне дослідження забруднення атмосферного повітря пиловими частинками РМ_{2.5} та РМ₁₀. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», присвяченої 203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2-3 грудня 2021 року). Полтава: НУПП, 2021, С. 105-111].
4. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334>

5. Europe's air quality status. (2022). European Environment Agency. Retrieved 2024, April, 22 from <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022>
6. Exceedance of air quality standards in Europe. European Environment Agency. Retrieved 2024, April, 22 from <https://www.eea.europa.eu/ims/exceedance-of-air-quality-standards>
7. Liu, C., Chen, R., Sera, F., et al. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *The New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
8. Calderón-Garcidueñas, L., Stommel, E.W., Rajkumar, R.P., et al. (2021). Particulate air pollution and risk of neuropsychiatric outcomes. What we breathe, swallow, and put on our skin matters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11568. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111568>
9. Piao, M.J., Ahn, M.J., Kang, K.A. et al. (2018). Particulate matter 2.5 damages skin cells by inducing oxidative stress, subcellular organelle dysfunction, and apoptosis. *Arch Toxicol*, 92, 2077–2091. <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2197-9>
10. Liu, Q., Xu, C., Ji, G., et al. (2017). Effect of exposure to ambient Pm2.5 pollution on the risk of respiratory tract diseases: A meta-analysis of cohort studies. *The Journal of Biomedical Research*, 31(2), 130–142. <https://doi.org/10.7555/JBR.31.20160071>
11. Zhao, J., Gao, Z., Tian, Z., et al. (2013). The biological effects of individual-level Pm(2.5) exposure on systemic immunity and inflammatory response in traffic policemen. *Occupational and environmental medicine*, 70(6), 426–431. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012100864>
12. Wang, Y., Xiong, L., & Tang, M. (2017). Toxicity of inhaled particulate matter on the central nervous system: Neuroinflammation, neuropsychological effects and neurodegenerative disease. *Journal of applied toxicology*, 37(6), 644–667. <https://doi.org/10.1002/jat.3451>
13. Du, Y., Xu, X., Chu, M., Guo, Y., & Wang, J. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence. *Journal of thoracic disease*, 8(1), 8–19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>
14. Aryal, A., Harmon, A.C., & Dugas, T.R. (2021). Particulate matter air pollutants and cardiovascular disease: Strategies for intervention. *Pharmacology & therapeutics*, 223, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107890>
15. Kastury, F., Smith, E., & Juhasz, A.L. (2017). A critical review of approaches and limitations of inhalation bioavailability and bioaccessibility of metal (loid)s from ambient particulate matter or dust. *Science of The Total Environment*, 574, 1054–1074. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.056>
16. Ali, M.U., Liu, G., Yousaf, B. et al. (2019). A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ Geochem Health*, 41, 1131–1162. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0203-z>
17. Alemayehu, Y.A., Asfaw, S.L., & Terfie, T.A. (2020). Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks. *Environmental science and pollution research international*, 27(22), 27491–27506. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09132-1>
18. Yu, W., Ye, T., Zhang, Y., et al. (2023). Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: a machine learning modelling study. *Lancet Planet Health*, 7, 209–218. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00008-6)
19. McDuffie, E.E., Martin, R.V., Spadaro, J.V. et al. (2021). Source sector and fuel contributions to ambient PM_{2.5} and attributable mortality across multiple spatial scales. *Nature communications*, 12(1), 3594. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y>
20. Chen, G., Guo, Y., Yue, X. et al. (2021). Mortality risk attributable to wildfire-related PM_{2.5} pollution: a global time series study in 749 locations. *The Lancet. Planetary health*, 5(9), 579–587. [https://doi.org/doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00200-X](https://doi.org/doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00200-X)

21. Weagle, C.L., Snider, G., Li, C. et al. (2018). Global sources of fine particulate matter: interpretation of PM_{2.5} chemical composition observed by SPARTAN using a global chemical transport model. *Environmental Science & Technology*, 52(20), 11670-11681. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B01658>
22. Dabek-Zlotorzynska, E., Celo, V., Ding, L., et al. (2019). Characteristics and sources of PM_{2.5} and reactive gases near roadways in two metropolitan areas in Canada. *Atmospheric Environment*, 218, 116980. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116980>
23. Park, E.H., Heo, J., Kim, H., & Yi, S.M. (2020). Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul. *Chemosphere*, 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
24. Heydari, S., Tainio, M., Woodcock, J., & de Nazelle, A. (2020). Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas using a multilevel Bayesian meta-regression approach. *Environment international*, 141, 105800. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105800>
25. Li, J., & Tartarini, F. (2020). Changes in air quality during the COVID-19 lockdown in Singapore and associations with human mobility trends. *Aerosol Air Qual. Res.*, 20, 1748–1758. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0303>
26. Bao, R., & Zhang, A. (2020). Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. *Sci. Total Environ.*, 20(731), 139052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139052>
27. World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>

Стаття надійшла до редакції 10.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 30.08.2024

The article was received 10.06.2024 and was accepted after revision 30.08.2024

Адаменко Станіслав Ярославович

аспірант кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Адреса робоча: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

e-mail: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua

Архипова Людмила Миколаївна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Адреса робоча: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943> **e-mail:** konsevich@ukr.net