

Н. Л. Ричак<sup>1</sup>  
Н. М. Кізілова<sup>1</sup>  
В. А. Майструк<sup>1</sup>  
А. С. Макаренко<sup>1</sup>  
О. С. Прогнімак<sup>1</sup>

## МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ З ВІДКРИТИХ ДЖЕРЕЛ

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

*В останні десятиліття спостерігаються глобальні зміни клімату, а саме підвищення середньорічної температури повітря, танення глетчерів, підвищення випаровування води і солоності вод річок, озер, ставків, зміни звичного способу існування водних, підземних і наземних тварин, а також здоров'я і тривалості життя людей. Оскільки країни світу тісно пов'язані між собою «відкритими межами» повітря і вод, то будь-які локальні забруднення переносяться з потоками повітря, поверхневих і підземних вод до інших країн, земель і материків. Оцінка екологічного стану і прогнози на наступні роки і десятиріччя базуються на даних постійного моніторингу метеорологічними станціями, лабораторіями і дослідницькими групами. Результатом цих зусиль є он-лайн бази даних з відкритим доступом, які дозволяють візуалізувати результати моніторингу і проводити обробку даних новими математичними методами для отримання надійних показників рівня забруднення.*

*В статті на основі обробки даних з відкритих джерел проведений аналіз рівня забруднення повітря в великих містах на території України. Проаналізовані такі показники як: концентрація газів CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, хімічних речовин C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O, CH<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HF, HCl, C, а також твердих частинок TЧ<sub>10</sub>, TЧ<sub>2,5</sub>, які виробляються в промислових циклах з використанням недосконалих (застарілих) засобів виробництва енергії, згоряння вуглеводних палив в двигунах автомобілів тощо. Отримані статистично значущі залежності між парами вищевказаних забруднювальних речовин, як на щоденних залежностях з відкритих джерел (часові ряди), так і на осереднених даних за кожний місяць, по кожному місту, і країні в цілому. Показано, що на рівні країни мають місце статистично достовірні залежності між вмістом NO<sub>2</sub> і NO, CH<sub>2</sub>O, C і CO. Ці залежності відрізняються у різних містах, а також спостерігається періодична залежність. Таким чином, кожне місто має свій власний динамічний статистичний вектор залежностей між вмістом забруднювальних речовин, який вказує на відповідні джерела забруднення. Наведені порівняльні дані забруднень TЧ<sub>2,5</sub> на території України у порівнянні з сусідніми країнами. Зазначена необхідність створення загальної бази даних, визначення методів обробки даних, статистичних індексів і критеріїв оцінювання.*

**Ключові слова:** забруднювальні речовини, забруднення атмосферного повітря, здоров'я населення, глобальні зміни клімату, статистичний аналіз даних.

### Вступ

Якість атмосферного повітря, рівень забруднювальної речовини в атмосферному повітрі, оцінювання — ці питання залишаються актуальними. Вимоги часу, зміни, які відбуваються у довкіллі, загострюють та уточнюють вказані питання. Соціум і довкілля вимагає нових підходів до оцінювання рівня забруднювальних речовин, дієвих рішень для покращення якості атмосферного повітря. Окреслені питання планетарного масштабу. Автори провели математичний аналіз ситуації забруднення атмосферного повітря в Україні у порівнянні з опублікованими результатами дослідження якості атмосферного повітря у сусідніх з Україною країнах Європи.

Офіційні дані вказують на високий рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за індексом забруднення атмосфери (ІЗА) [1], [2]. У 2019 р. він становив 8,2. Це значення вище ніж у

попередньому році — 7,6, причому підвищився цей показник за рахунок вмісту формальдегіду. Основними забруднювачами атмосферного повітря в Україні залишаються підприємства видобувної і переробної промисловості, постачання електроенергії, газу, пари та кондиціонування повітря, всі вони загалом виробляють 92 % від загального обсягу викидів в атмосферне повітря.

Змінилася ситуація у розподілі викидів від різних забруднювачів. Викиди від стаціонарних забруднювачів в Україні поступово знижуються. У 2019 р. зниження відбулося на 2 % у порівнянні з попереднім роком. Насамперед, це зниження вмісту оксиду вуглецю (на 4 %), метану (на 2,1 %), оксиду азоту (на 20,5 %). Розподіл складових від стаціонарних забруднювачів такий: оксид вуглецю — 30,4 %, діоксид сірки та інших сполук сірки — 27,6 %, метан — 18 %, тверді частки (ТЧ) — 12,6 %, сполуки азоту — 9,4 %. Кількість викидів від пересувних забруднювачів, зокрема, від автотранспорту, збільшилась у порівнянні з 2018 р. на 2,2 %. Розподіл складових від пересувних забруднювачів такий: оксид вуглецю — 76 %, діоксид азоту — 10,8 %, неметанові леткі органічні сполуки — 9,9 % та ін. [2].

Актуальність теми підкреслюється також тим, що забруднення атмосферного повітря є пріоритетним чинником ризику для здоров'я населення, причому 80 % захворювань тією чи іншою мірою залежать від якості повітря [2]. До забруднювальних речовин, про негативну дію яких на здоров'я людини отримано найпереконливіші докази, відносяться тверді суспендовані частки, озон, діоксин азоту, діоксин сірки, оксид вуглецю. Саме на кількісних показниках вказаних хімічних компонентів автори зосередили увагу в дослідженні рівнів забруднення атмосферного повітря.

Аналіз зарубіжних публікацій показав, що в останні роки особлива увага приділяється дослідженню забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю CO, діоксидом сірки (SO<sub>2</sub>), оксидами азоту NO, NO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub>, а також твердими частками ТЧ<sub>10</sub> і ТЧ<sub>2,5</sub> [3]. Високі концентрації SO<sub>2</sub> викликають небезпечно для життя скупчення рідини в легенях і астму. Сполуки NO і NO<sub>2</sub> сприяють утворенню кислотних дощів і смогу, а також впливають на вміст тропосферного озону. NO<sub>x</sub> утворюються в результаті хімічної реакції між азотом і киснем під час блискавок (дуже низький відсоток), а також на теплових електростанціях, і в двигунах автомобілів (дуже високий відсоток). Під час спалювання вугілля для виробництва електроенергії в повітря потрапляють три основні забруднювальні речовини: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і ТЧ<sub>10</sub>, — які можуть переноситися на тисячі кілометрів від забруднювача. Тому забруднення атмосферного повітря в результаті роботи теплових електростанцій, в яких енергія вивільняється шляхом спалювання вугілля, є вагомим ризиком для всієї Європи, незалежно від розташування забруднювача. На територіях сучасних мегаполісів в районах з інтенсивним рухом автотранспорту саме сполуки азоту складають значну частку забруднення повітря. Сполуки NO<sub>x</sub> включають азотні кислоти HONO, пентоксид діазоту N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, нітратний радикал NO<sub>3</sub> та інші; NO<sub>x</sub> викликають запалення дихальних шляхів і порушують нормальні клітинні механізми шляхом пошкодження тканин і зниження імунних властивостей організму.

Як зазначалось вище, за рекомендаціями ВООЗ, особливу увагу потрібно приділяти кількісним показникам знаходження ТЧ<sub>10</sub> в атмосферному повітрі. Відомо, що вони утворюються в результаті процесів, пов'язаних з горінням твердого і рідкого видів палив (токсичні речовини бенз(а)пірен, фуран, діоксини та ін.). Частинки ТЧ<sub>2,5</sub> утворюють атмосферні аерозолі, які, за оцінкою ВООЗ, є найшкідливішими для здоров'я людини серед усіх забруднювачів атмосфери. ТЧ<sub>10</sub> потрапляють до легенів і викликають захворювання верхніх дихальних шляхів і супутні проблеми, а частинки ТЧ<sub>2,5</sub> потрапляють у кров, а з нею і до клітин і тканин організму, викликаючи тяжкі захворювання. Близько 80 % передчасних смертей, пов'язаних з викидами теплових електростанцій, що працюють на вугіллі, у Європі викликані впливом ТЧ<sub>2,5</sub>. Згідно зі звітами ВООЗ [4], тривалий вплив ТЧ<sub>2,5</sub> скорочує тривалість життя, а короткочасний вплив високих концентрацій ТЧ<sub>2,5</sub> — збільшує кількість смертей від респіраторних і серцево-судинних захворювань, загострень астми, порушень функції легенів [5], а також від Covid-19 [6]. Щорічно забруднення повітря тепловими електростанціями, що працюють на вугіллі, в Західних Балканах викликає близько 3000 передчасних смертей і близько 4818 — в Туреччині.

Директива 2008/50 Європейського парламенту від 21.05.2008 р. встановлює граничні величини для ТЧ<sub>2,5</sub> як 50 мкг/м<sup>3</sup> — припустима, 100 мкг/м<sup>3</sup> — поріг, 150 мкг/м<sup>3</sup> — тривожна, а також вимагає інформування населення про можливі небезпеки [7]. На жаль, Україна за викидами ТЧ<sub>10</sub> від електростанцій, що працюють на вугіллі, є лідером (з великим відривом) від країн ЄС [8]. Основними забруднювачами SO<sub>2</sub> від електростанцій, що працюють у Європі є: Україна — 27 %, Туреччина — 24 %, Сербія — 15 % і Боснія і Герцеговина — 11 %. Туреччина також має 20 % частку викидів NO<sub>x</sub> від електростанцій, що працюють на вугіллі, за нею йдуть Німеччина — 16 %, Україна — 16 % і Польща — 14 %.

Джерелами утворення твердих часток є деякі типи ґрунтів, їх механічний склад (забруднювачами виступають території Китаю, пустелі Африки), в яких через поступові зміни клімату (підвищення температури і швидкості вітру, зниження кількості опадів і рівня вологості повітря) відбувається вивітрювання твердих часток з ґрунтів.

Створені різні он-лайн ресурси якості повітря в кожній точці Землі з вільним доступом для обробки і вивчення даних дослідниками, з рейтингом найзабрудненіших агломерацій/зон [9] і картою Землі [10]. Система отримує супутникові дані про температуру і вологість повітря, швидкість вітру та інші, і розраховує за допомогою математичної моделі лінії потоку повітря і поточні концентрації  $ТЧ_{10}$  (рис. 1а) і  $ТЧ_{2,5}$  (рис. 1б). На рис. 1в подано зображення від 21.03.2021 р., коли пояс частинок  $ТЧ_{10} + ТЧ_{2,5}$  охопив країни від Північної Африки до Північного Китаю, в яких спостерігався смог і «помаранчеве небо». У Китаї  $ТЧ_{2,5}$  часто створюють щільний смог, який, особливо взимку, покриває Пекін і великі міста на півночі країни на тривалий час, таким чином, що концентрація  $ТЧ_{2,5}$  перевищує норми ВООЗ у 40...50 разів. У результаті чого захворюваність на рак легенів збільшилася на 15 %. [5]. На жаль, відповідні карти на території України (рис. 1г, д) показують лише невеличку кількість зареєстрованих станцій, які постійно надсилають свою інформацію до ресурсу [9] з максимальним затриманням в 15 хв.

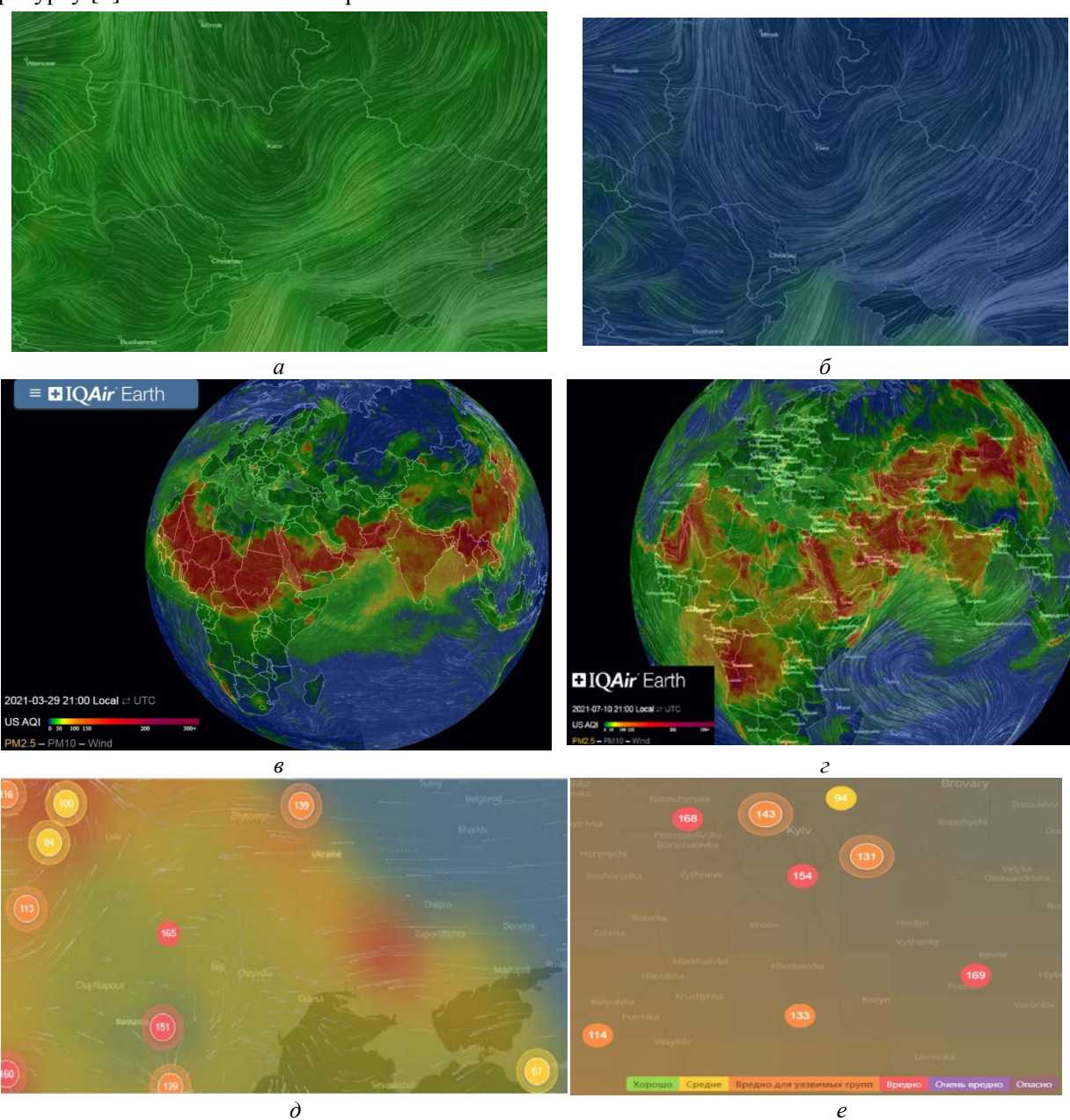


Рис. 1. Розподілення частинок: а —  $ТЧ_{10}$ ; б —  $ТЧ_{2,5}$  на території України станом на 10.07.2021 р.; в — на території Східної півкулі станом на 29.03.2021 р.; з — станом на 10.07.2021 р.; станції на території: д — України; е — Київської області.

Примітка: Дані з відкритого ресурсу [9]

Відповідно до нещодавньої доповіді міжнародного аналітичного центру EMBER з проблем забруднення повітря [10], викиди на території України, Туреччини і Західних країн свідчать про їхній вагомий внесок у забруднення атмосферного повітря. Саме викиди цих країн посідають найвищі місця за усіма типами забруднювачів. Україна очолює антирейтинг країн-забруднювачів європейського повітря і несе відповідальність за 2/3 вмісту твердих частинок у повітрі. За рівнем забруднення  $\text{NO}_x$  лідерами є Німеччина та Польща. Серед 30 найбільших забруднювачів  $\text{TЧ}_{10}$  у Європі, 12 підприємств знаходяться в Україні, 6 — у Туреччині, 4 — у Сербії, по одній — у Боснії, Чорногорії і Північній Македонії. Викиди  $\text{SO}_2$  на підприємствах, які входять в першу 10-ку, складають ~44 % від загальних викидів  $\text{SO}_2$  від електростанцій, що працюють на вугіллі у Європі. Значна кількість викидів  $\text{TЧ}_{10}$  від підприємств цієї галузі надходить від електростанцій в Україні, 8 підприємств якої входять в 10-ку електростанцій, що дають найвищий вміст  $\text{TЧ}_{10}$ . В процесі виробництва тепла теплоелектростанція викидає ~54 %  $\text{SO}_2$  і ~16 %  $\text{NO}_x$ . За даними Європейського агентства з навколишнього середовища [11] (ЄАНС), одні тільки тверді частки стали причиною близько 417 млн передчасних смертей у 41 європейській країні у 2018 р.

Відповідно до даних [10], Україна виробляє 34 % своєї електроенергії на 20 електростанціях, що працюють на вугіллі і побудовані до 1976 р., і жодна з яких не має обладнання для сіркоочистки, крім другого Трипільського блоку (300 МВт електростанції потужністю 1800 МВт), який встановлений як пілотний проект.

Незалежно від місця розташування теплових електростанцій, підприємств добувної і переробної промисловості, транспорту, проблема забруднення атмосферного повітря актуальна для країн світу. Для своєчасного реагування на ці виклики, необхідно проводити постійний моніторинг стану атмосферного повітря, за переліком забруднювальних речовин, щодо яких проводиться оцінювання, складові та показники опадів, постійна робота з глобальною базою даних, створення єдиного он-лайн ресурсу відкритих для доступу даних, розробки спільної з країнами ЄС і світу найпродуктивнішої математичної моделі для прийняття рішень на рівні регіонів і країн.

*Мета статті* — провести статистичний аналіз кількісних характеристик забруднювальних речовин атмосферного повітря на території України і виявити закономірності змін рівня забруднення для порівняння з відповідними даними, моделями і підходами аналізу кількісних характеристик забруднювальних речовин атмосферного повітря у країнах Європи і світу.

### Вибір моделі та методології розв'язання задачі

Для порівняння рівнів забруднювальних речовин в атмосферному повітрі агломерацій України вибрано 16 агломерацій з 4-х регіонів країни (центрального, східного, західного і південного). Для цих агломерацій, у відкритих джерелах, є дані моніторингу забруднювальних речовин у атмосферному повітрі [12] та інші показники [13].

Для статистичного аналізу даних за різними показниками у містах і регіонах світу використовувалися методи статистичного аналізу ресурсу Google Data Studio. Якість повітря в містах України досліджувалася на основі наявних відкритих даних Державного моніторингу якості повітря на території України [12]. Інформація отримана з пунктів державної системи гідрометеорологічних спостережень Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Аналіз даних ресурсу [12] показав, що в агломераціях вимірювалися не всі забруднювальні речовини, які наведені у списку А додатка 2 [2]. Так, в офіційних звітах у більшості агломерацій наведені дані вмісту завислих речовин,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ , у багатьох агломераціях також вказано вміст  $\text{NO}$ , формальдегіду ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), фенолу ( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ ), а у деяких агломераціях — ще й аміаку ( $\text{NH}_3$ ), фтористого водню ( $\text{HF}$ ), хлористого водню ( $\text{HCl}$ ) і сажі ( $\text{C}$ ). Є звіти, де не завжди виконується мінімум зареєстрованих даних, що робить неінформативним порівняльний статистичний аналіз між агломераціями. Тому для проведення розрахунків використані математичні методи аналізу неповних/нечітких даних на базі баєсових функцій і методів інтерполяції, які докладно описані в джерелах [15], [16]. Для порівняльного аналізу даних з ресурсу Google Data Studio і даних вимірювань в агломераціях України [12] розроблений проект в он-лайн сервісі Map of Life з використанням вбудованих в нього баз даних Google Earth і запитів Google BigQuery, які дозволяють використання баєсових підходів до аналізу нечітких даних (fuzzy data analysis). Для кожного забруднювача автоматично перевірялось виконання «нульової гіпотези» за допомогою тесту гаусовості розподілення [17] і, відповідно до результатів тесту, використовувалися різні коефіцієнти кореляції (Пірсона, Спірмена або Кендела) [18].

Відомо, що різні токсичні речовини можуть шкідливо впливати на організм, і у деяких випад-

ках відбувається ефект сумачії/синергізму, наприклад, для фенолу і ацетону, озону, діоксиду азоту і формальдегіду [13], але в цьому дослідженні такі ефекти не розглядалися у зв'язку з відсутністю даних вимірювань вмісту речовин, які зумовлюють ефект синергії.

### Результати математичної обробки і аналізу даних забруднення атмосфери

В результаті відновлення і інтерполяції неповних/нечітких даних з відкритих джерел [8], [9], [11]—[13] з використанням запитів Google Query отримано статистичні розподілення для всіх вищезгаданих забруднювальних речовин в атмосферному повітрі у 16 агломераціях України. Результати для вмісту завислих речовин, який складається з частинок  $TC_{10}$  і  $TC_{2,5}$ , а також крупніших частинок [8], [9], [11], показано на рис. 2. Протягом всього періоду спостережень (січень–жовтень 2020 р., квітень–липень 2021 р.) визначені рівні забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Порогові та тривожні граничні величини виявлені для м. Кривий Ріг і м. Дніпро, що відповідає даним екологічних карт України 2006—2013 рр. [8], [9], [11]—[13], [19], [20]. Криві на рис. 2 показують спільну динаміку коливань (весна–літо–осінь 2020 р.). Але для підтвердження цієї динаміки потрібні триваліші періоди даних спостережень, детальний аналіз погодних і кліматичних умов, рози вітрів, розміщення забруднювачів у місті, шорсткості поверхні урболандшафтних територій, та інші дані.

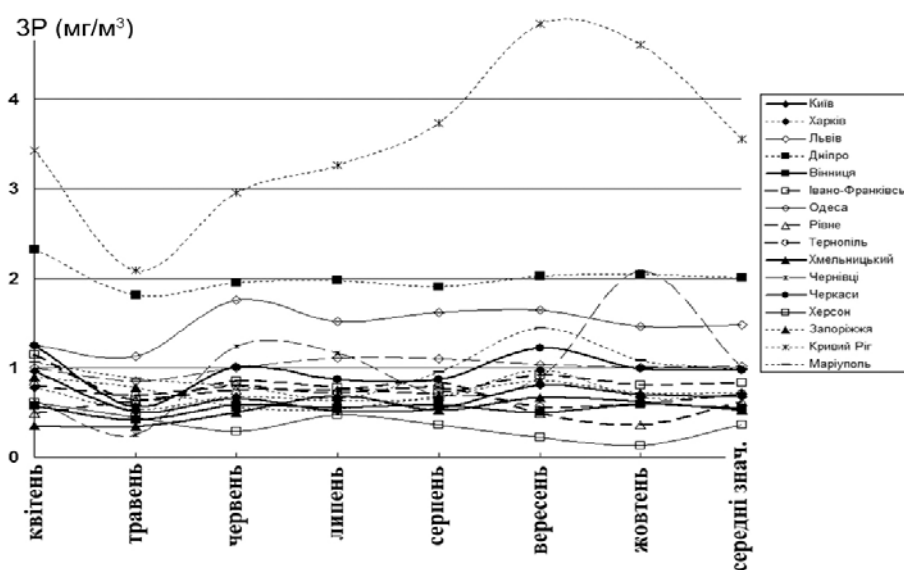


Рис. 2. Вміст ЗР з 04.2020 по 10.2020 р. у 16 агломераціях України; агломерації позначені: центрального регіону — жирними лініями, західного — пунктирними, східного — пунктирними, південного — тонкими

Дані про вміст інших забруднювальних речовин, небезпечних для здоров'я речовин, подано в табл. 1 (в  $mg/m^3$ ). Очевидно, що комбінації забруднювальних речовин залежать від промислових підприємств, наявності ТЕС, які працюють на вугіллі, а також інтенсивності автомобільного трафіку. Таким чином, подальші дослідження на основі даних з табл. 1 можуть бути використані для advanced Google Query запитів з використанням даних про основні забруднювачі. На жаль, на сьогодні невідомі зміни активності відповідних підприємств, станцій та навантаження на автодороги, які пов'язані з падінням/зростанням виробництва, наявністю обмежень, змінами соціальної активності населення в різних регіонах під час тривалої пандемії Covid-19. Саме тому результати, наведені на рис. 2 і в табл. 1, є у певному сенсі пілотним проектом, який дозволить накопичувати подібні результати в он-лайн сервісі Map of Life шляхом додавання подальших вимірювань, незважаючи на можливу нерегулярність вимірювань і неповноту даних завдяки використанню басового підходу. Добре відомо, що саме «великі дані», які збираються протягом тривалого часу з додаванням нових типів вимірювань і з прискореною швидкістю ( $3V = volume + velocity + variety$ ) є основою сучасних технологій «big data analysis» з використанням штучного інтелекту. Аналіз сумарних коефіцієнтів забруднення, які були виміряні, а також їх середніх значень, підтверджує висновок, що активність підприємств, ТЕС і автомобільного трафіку в агломераціях південного, східного і центрального регіонів приводить до дуже високих значень сумарних коефіцієнтів забруднення, тоді як в агломерації західного регіону цей показник майже вдвічі менший (табл. 1).



Таблиця 1

**Вміст різних забруднювальних речовин, небезпечних для здоров'я, в атмосферному повітрі у  
16 агломераціях України в період з квітня по жовтень 2020 р.**

№	Місто	ЗР	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	NO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	C	NH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> O	HF	HCl	Сума	Середнє значення
1	Київ	0,67	1,47	0,52	4,25	1,37	1,33	0,38	0,26	1,82	—	—	12,1	8,4
2	Вінниця	0,54	0,02	0,54	3,35	—	—	—	0,46	2,02	1,10	—	8,0	—
3	Хмельницький	0,53	0,44	0,52	1,28	0,48	0,64	—	0,20	1,16	—	0,15	5,4	—
4	Черкаси	0,97	0,27	0,43	1,07	0,72	—	—	1,91	2,82	—	—	8,2	—
5	Львів	1,02	0,22	0,71	1,24	0,51	—	—	—	2,39	0,57	—	6,7	4,9
6	Івано-Франківськ	0,84	0,17	0,46	1,15	0,51	—	—	—	—	—	—	3,1	—
7	Рівне	0,62	0,02	0,33	0,74	0,33	0,54	—	0,08	2,08	0,59	0,16	5,5	—
8	Тернопіль	0,71	0,12	0,53	1,28	0,47	—	—	—	0,89	—	—	4,0	—
9	Чернівці	0,99	0,05	0,11	0,49	0,06	0,77	—	—	1,25	0,88	0,58	5,2	—
10	Харків	0,70	0,13	0,47	0,74	0,30	0,67	0,42	0,08	0,87	—	—	4,4	10,5
11	Дніпро	2,01	0,25	0,80	2,39	0,80	0,99	—	0,99	5,87	—	—	14,1	—
12	Запоріжжя	0,72	0,14	0,38	1,81	0,86	2,06	—	—	1,73	0,11	0,20	8,0	—
13	Кривий Ріг	3,56	0,32	0,62	1,21	0,38	0,72	—	0,29	6,58	—	—	13,7	—
14	Маріуполь	0,98	0,46	0,29	1,30	—	1,25	—	0,25	7,82	—	—	12,3	—
15	Одеса	1,48	0,87	1,13	1,40	0,61	1,40	1,01	—	4,92	0,88	—	13,7	11,3
16	Херсон	0,36	0,13	0,36	3,50	1,69	1,05	—	—	1,80	—	—	8,9	—

*Примітка:* Агломерації регіонів (центрального, західного, східного і південного) виділені різними кольорами.

Слід зазначити, що порівняння агломерацій у регіонах за всіма параметрами є не зовсім коректним, оскільки відповідні лабораторії не вимірювали деякі із забруднювальних речовин відповідно до [2]. Якщо порівняти сумарні індекси забруднень атмосфери за даними, осередненими за кожний з місяців (протягом квітня–жовтня 2020 р.), і залишити тільки ті з даних, які є ненульовими для всіх досліджених агломерацій (а саме ЗР, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O), то отримаємо табл. 2. З цієї таблиці видно, що за сумарним показником спільних для агломерацій забруднювальних речовин, які вимірювалися в кожному регіоні, найнебезпечнішими для здоров'я мешканців є південний, східний і центральний регіони, тоді як західний є найчистішим.

Таблиця 2

**Вміст забруднювальних речовин в атмосферному повітрі у 16 агломераціях  
України у регіонах у квітні–жовтні 2020 р.**

Регіон	ЗР	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	NO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Середнє значення
Центральний	0,68	0,55	0,50	2,49	0,86	0,99	6,06
Західний	0,83	0,12	0,43	0,98	0,38	0,65	3,39
Східний	1,59	0,26	0,51	1,49	0,58	1,14	5,58
Південний	0,92	0,50	0,75	2,45	1,15	1,23	6,99

Рейтинг (а точніше, антирейтинг) агломерацій за вмістом окремих забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, які містяться у відкритих базах даних, показує, що території відрізняються за їх складом (табл. 3). Сірим кольором відмічені агломерації і показники, за вмістом яких є перевищені граничні величини відповідно до [14]. Очевидно, що деякі з наборів забруднювачів у табл. 3 відповідають певним виробництвам на території агломерації, які, через свої технологічні особливості або відсутність нових засобів для покращення якості повітря, мають спільні викиди забруднювальних речовин. Інші комбінації властиві викидам з технологічних процесів на ТЕС із застарілим обладнанням, або характерні для викидів двигунів автотранспортних засобів на дорогах міст. Таким чином, важливо дослідити всі можливі кореляції між забруднювальними речовинами, щоб отримати надійні індекси, які дадуть можливість виявити найвагоміші забруднювачі у кожній агломерації. Для цього у роботі проведений кореляційний аналіз забруднювальних речовин між собою у агломераціях і в регіоні в цілому. Результати аналізу подано в табл. 4.

Рейтинг міст України за вмістом кожної з вимірюваних забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, усереднених за час спостережень (квітень–травень 2020 р.)

ЗР	SO <sub>2</sub>		CO		NO <sub>2</sub>		NO		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O		C		NH <sub>3</sub>		CH <sub>2</sub> O		HF		HCl		
1	3,56	12	1,47	3	1,13	12	4,25	16	1,69	9	2,06	3	1,01	7	1,91	6	7,82	14	1,10	5	0,58
2	2,01	3	0,87	2	0,80	16	3,50	12	1,37	3	1,40	11	0,42	2	0,99	1	6,58	3	0,88	9	0,20
3	1,48	6	0,46	4	0,71	14	3,35	9	0,86	12	1,33	12	0,38	14	0,46	2	5,87	5	0,88	13	0,16
4	1,02	15	0,44	1	0,62	2	2,39	2	0,80	6	1,25			1	0,29	3	4,92	13	0,59	15	0,15
5	0,99	1	0,32	14	0,54	9	1,81	7	0,72	16	1,05			12	0,26	7	2,82	4	0,57		
6	0,98	7	0,27	10	0,53	3	1,40	3	0,61	2	0,99			6	0,25	4	2,39	9	0,11		
7	0,97	2	0,25	15	0,52	6	1,30	8	0,51	5	0,77			15	0,20	13	2,08				
8	0,84	4	0,22	12	0,52	15	1,28	4	0,51	1	0,72			11	0,08	14	2,02				
9	0,72	8	0,17	11	0,47	10	1,28	15	0,48	11	0,67			13	0,08	12	1,82				
10	0,71	9	0,14	8	0,46	4	1,24	10	0,47	15	0,64					16	1,80				
11	0,70	16	0,13	7	0,43	1	1,21	1	0,38	13	0,54					9	1,73				
12	0,67	11	0,13	9	0,38	8	1,15	13	0,33							5	1,25				
13	0,62	10	0,12	16	0,36	7	1,07	11	0,30							15	1,16				
14	0,54	5	0,05	13	0,33	11	0,74	5	0,06							10	0,89				
15	0,53	14	0,02	6	0,29	13	0,74									11	0,87				
16	0,36	13	0,02	5	0,11	5	0,49														

Примітка: цифри відповідають: 1 — Кривий Ріг, 2 — Дніпро, 3 — Одеса, 4 — Львів, 5 — Чернівці, 6 — Маріуполь, 7 — Черкаси, 8 — Івано-Франківськ, 9 — Запоріжжя, 10 — Тернопіль, 11 — Харків, 12 — Київ, 13 — Рівне, 14 — Вінниця, 15 — Хмельницький, 16 — Херсон.

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляції залежностей між ЗР в атмосферному повітрі, осереднених за весь час спостережень (квітень-жовтень 2020 р.) у 16 агломераціях України

	ЗР	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	NO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	NH <sub>3</sub>	HF
SO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—
CO	0,269	0,393	—	—	—	—	—	—
NO <sub>2</sub>	—	0,425	—	—	—	—	—	—
NO	—	0,354	—	0,912	—	—	—	—
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	—	—	—	0,365	0,388	—	—	—
NH <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0,221	—	—
HF	—	—	—	—	0,331	0,324	0,453	—
HCl	0,248	0,214	0,717	0,327	0,442	—	—	0,547
CH <sub>2</sub> O	0,817	—	0,315	—	—	—	0,901	—
C	0,837	—	0,881	0,279	—	0,245	—	—

Кореляційних аналіз щоденних даних у вигляді часових рядів показав, що вміст завислих речовин (ЗР) корелює з вмістом CO у Івано-Франківську (коефіцієнт кореляції  $k = 0,883$ ) і у Львові ( $k = 0,692$ ), і слабо корелює у Хмельницькому ( $k = 0,366$ ), Кривому Розі ( $k = 0,255$ ) і у Херсоні ( $k = 0,239$ ). В Ужгороді значення ЗР корелюють з вмістом NO ( $k = 0,712$ ) і CH<sub>2</sub>O ( $k = 0,589$ ). У низці агломерацій вміст ЗР корелює з вмістом SO<sub>2</sub>, а саме у Києві ( $k = 0,457$ ), Кривому Розі ( $k = 0,382$ ) і у Тернополі ( $k = 0,236$ ). Для інших агломерацій будь-які узгоджені зміни вмісту ЗР із забруднювальними речовинами відсутні. У агломераціях, де вимірювався вміст сажі (C) в атмосферному повітрі (Київ, Харків, Одеса), кореляція ЗР з C є достовірною ( $k = 0,837$ ). Відсутність деяких значень в табл. 4 означає що або кореляція недостовірна ( $k < 0,2$ ), або у лабораторіях агломерацій не визначений вміст за ЗР. Таким чином, агломераціям властиві відповідні набори забруднювальних речовин, вміст яких є скорельованим, що вказує на характерне джерело забруднення. Як виявлення подібних кореляцій на території області, може бути встановлено, з якого джерела перенесено забруднення разом з вітром, поверхневими водами, частинками ґрунту в повітрі. Це важливо в період глобальних змін клімату, які супроводжуються частими «хвилями тепла», що значно змінює напрямок і швидкість вітру у порівнянні зі сталою «розою вітру» в цій місцевості.

На основі виявлених кореляцій можна стверджувати, що кожна агломерація характеризується деяким вектором значень  $\{C_j\}_{j=1}^n$ , де  $C_j$  — концентрації забруднювальної речовини у повітрі,  $n$  — кількість показників. Дослідження статистично значущих залежностей між вимірюваними забруднювальними речовинами на території агломерацій для цілей здійснення моніторингу атмосферного повітря та управління якістю атмосферного повітря, є важливою складовою для розробки скінченномірних просторів векторів  $\{C_j\}_{j=1}^n$ , які мають мінімально необхідну кількість показників  $C_j$ . Проведені дослідження показують, що значення  $n$  можуть бути зменшені за рахунок існуючих залежностей між  $C_j$ . Так, статистичний аналіз даних показує, що існують статистично достовірні залежності між вмістом  $\text{NO}_2$  і  $\text{NO}$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{C}$  і  $\text{CO}$  (див. табл. 4), якщо оцінювати осереднені дані для агломерацій. Ці залежності по-різному проявляються в агломераціях, регіонах, і в країні в цілому (рис. 3). Значення  $k > 0,75 \dots 0,8$  вважаються достовірними кореляціями, а  $k < 0,2$  — незначущими, але за умови неповноти баз даних результатів вимірювань останні також можуть бути прийняті до уваги як слабкі кореляції для подальшої корекції.

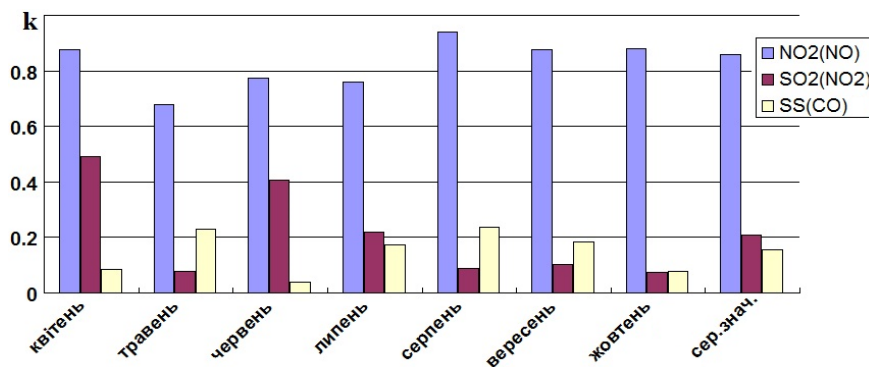


Рис. 3. Значення лінійного коефіцієнта кореляції Пірсона між парами параметрів, які осереднені за кожний місяць спостережень, відповідно

Середньомісячні коливання таких залежностей можуть бути пов'язані як з активністю відповідних забруднювачів (заводи, ТЕЦ, автотрафік та ін.), так і з метеорологічними показниками у кожному місяці року, коли забруднення з окремо взятого забруднювача могли бути розповсюджені у напрямі пануючих вітрів відповідно до температури і вологості повітря, і т.д. Подібні подальші дослідження потребують підходів системної динаміки [21]—[23], які вже добре себе зарекомендували в різних регіонах Європи, Азії і Африки [24]. Важливо, що у випадках високих коефіцієнтів кореляції підвищення і зниження вмістів відповідних пар забруднювальних речовин корельовані, що вказує на єдине джерело їх постачання. Про це свідчать різні залежності, наприклад, у парі  $\text{NO}_2$ — $\text{NO}$ , у різних агломераціях за досліджуваний період (квітень—жовтень 2020 р.) (рис. 4). В Івано-Франківську, Львові і Тернополі ці залежності є статистично достовірними; в агломераціях Рівне, Херсон, Київ, Кривий Ріг — статистично значущими, у агломераціях Дніпро, Запоріжжя, Хмельницький, Одеса — слабка статистична залежність, яка потребує подальшого детальнішого дослідження.

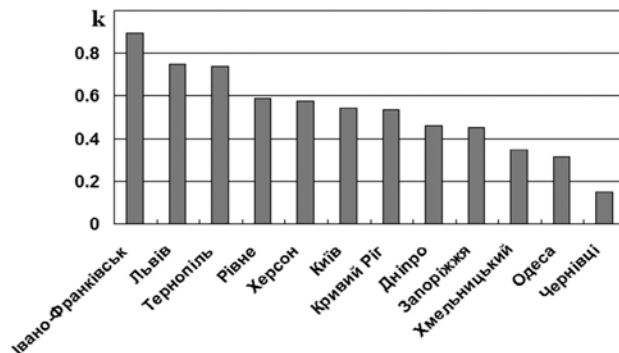


Рис. 4. Кореляції між параметрами  $\text{NO}_2$ — $\text{NO}$ , які осереднені для окремої агломерації за період спостережень (квітень—жовтень 2020 р.)



Новий результат статистичного аналізу, проведений на даних з відкритих джерел, відноситься до кореляцій вмісту окремих забруднювальних речовин. Ці кореляції можуть вказувати, чи забруднювальні речовини, наявні у конкретний момент відбору проби повітря лабораторією, є результатом викиду забруднювачів у певній агломерації (за фактом наявності у відкритих джерелах), чи є результатом, що відображає синергію забруднювачів з інших агломерацій, зон, тощо, завдяки процесам переносу в атмосфері. Математичний апарат цього переносу у вигляді рівнянь турбулентної течії повітря і поверхневих вод використовується в ресурсі [9], що потребує перманентних чисельних розрахунків на потужному кластері. В більшості агломерацій України виявлені тільки залежності між найпростішими за хімічною формулою забруднювальними речовинами (див. рис. 3, 4), тоді як в агломераціях — «промислових гігантах» — виявлені детальні статистично значущі взаємозв'язки між значною кількістю складних хімічних речовин, що вказує на спільні забруднювачі у вигляді конкретних підприємств, ТЕЦ тощо, список яких наведений для кожної агломерації у щорічних доповідях [7], [8], [12]. Результати здійсненого статистичного аналізу з використанням технологій роботи з неповними/нечіткими даними в окремих агломераціях показані на рис. 5.

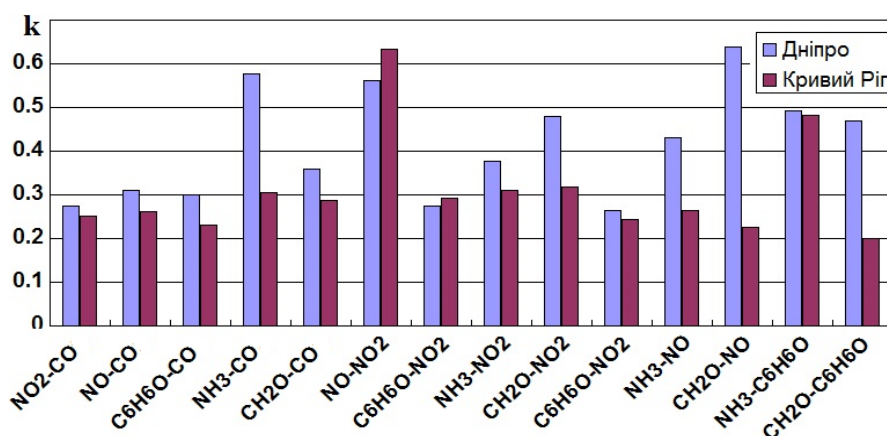


Рис. 5. Кореляції між вказаними парами забруднювальних речовин за період спостережень (квітень-жовтень 2020 р.) у м. Дніпро і Кривий Ріг

Вагомим чинником, який істотно впливає на здоров'я і тривалість життя, є вміст твердих часток ТЧ<sub>2,5</sub> [25]. Дані аналізу вмісту ТЧ<sub>2,5</sub> з відкритих джерел для України та її країн-сусідів показані на рис. 6.

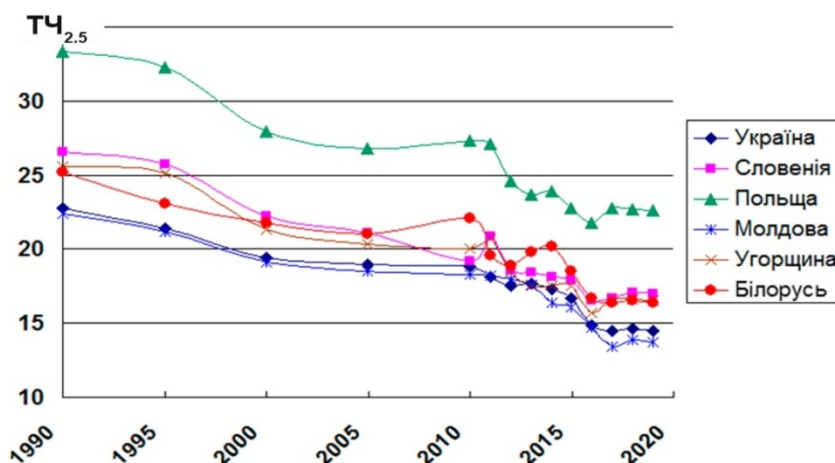


Рис. 6. Концентрація ТЧ<sub>2,5</sub> в атмосферному повітрі України і сусідніх країн з 1990 по 2020 рр.

Значення концентрацій перераховані на кількість населення (на одну особу), і тому на наведені криві впливають як щорічні зміни кількості населення, так і метеорологічні умови, зміни клімату, а також зміни чутливості відповідних методів і сенсорів. Однак, з наведених кривих видно, що локальні зміни клімату впливають на перемішування в атмосфері і на розповсюдження ТЧ<sub>2,5</sub> і ТЧ<sub>10</sub>, принаймні, між сусідніми країнами. Таким чином, слід продовжувати дослідження, спрямовані на удосконалення і розповсюдження нових знань і методів реєстрації й аналізу динаміки вмісту ТЧ<sub>2,5</sub> і ТЧ<sub>10</sub> у атмосферному повітрі, разом з країнами усього світу.

## Висновки

В роботі проведено аналіз забруднення атмосферного повітря у 16 агломераціях України: Кривий Ріг, Дніпро, Одеса, Львів, Чернівці, Маріуполь, Черкаси, Івано-Франківськ, Запоріжжя, Тернопіль, Харків, Київ, Рівне, Вінниця, Хмельницький, Херсон. Дані отримані з відкритих онлайн джерел, як на території України, так і Європи. Дані спостережень зі станцій України нечіткі, тому використовувались відповідні математичні методи аналізу (fuzzy data analysis) на основі байєсових моделей (Bayesian statistics). Для аналізу даних вмісту забруднювальних речовин використовувалися методи статистичного аналізу ресурсу Google Data Studio. Чисельні розрахунки і аналіз даних проведений в он-лайн сервісі Map of Life з використанням вбудованих в нього баз даних Google Earth і запитів Google BigQuery.

В результаті статистичного аналізу даних з відкритих джерел підтверджено спільну динаміку коливань вмісту забруднювальних речовин на території кожної агломерації, що відрізняються для агломерацій південного, центрального, східного і західного регіонів.

Наведено «антирейтинг» агломерацій з найвищим вмістом найнебезпечніших для здоров'я забруднювальних речовин в повітрі.

Подано усереднені дані про вміст забруднювальних речовин у атмосферному повітрі у 16 агломераціях України у період з квітня до листопада 2020 р. Показані кореляції між вмістом окремих речовин у повітрі як для окремо взятої агломерації, так і для країни в цілому (усереднені дані).

За допомогою кореляційного аналізу виявлені групи забруднювальних речовин, вміст яких змінюється майже синхронно. Отримані кореляції, які вказують на можливість встановлення джерел потрапляння забруднювачів, а саме агломерації, викиди з яких потрапили до цієї місцевості або населеного пункту. Для деяких агломерацій ці залежності є статистично достовірними (коефіцієнт кореляції  $k \sim 0,9 \dots 1$ ), а для інших — статистично значущими ( $k \sim 0,7 \dots 0,85$ ).

Таким чином, кожна агломерація характеризується своїм особливим динамічним вектором вмісту забруднювальних речовин. Він вказує на найвагоміші екологічні проблеми в агломерації, територіальній зоні, або регіоні країни. В роботі обґрунтовано необхідність подальших досліджень, спрямованих на удосконалення і розповсюдження нових методів реєстрації вмісту небезпечних для здоров'я забруднювальних речовин разом із сусідніми країнами і країнами всього світу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] КМУ, «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря,» *Постанова від 11 серпня 2019 №827. Київ* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-n>.
- [2] *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2019 році.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mepg.gov.ua/files/docs/Zvit/2021/>.
- [3] J. G. Bartzis, K. K. Kalimeri, and I. A. Sakellaris, "Environmental data treatment to support exposure studies: The statistical behavior for NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> air concentrations in Europe." *Environmental Research*, vol. 181, pp. 108864, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108864>.
- [4] Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://geneva.mfa.gov.ua/posolstvo/2612-who>.
- [5] J. Sielski, K. Kaziród-Wolski, M. A. Jóźwiak, and M. Jóźwiak, "The influence of air pollution by PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and associated heavy metals on the parameters of out-of-hospital cardiac arrest," *Science of the Total Environment*, vol. 788, pp. 147541, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147541>.
- [6] M. A. Zoran, R. S. Savastru, D. M. Savastru, and M. N. Tautan, "Assessing the relationship between surface levels of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Ital," *Science of The Total Environment*, vol. 738, pp. 139825, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>.
- [7] *Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 р. про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_950#](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#).
- [8] European Environmental Agency, *Clean Air For Europe program (CAFE).* [Electronic resource]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/research-projects/clean-air-for-europe-programme-cafe>.
- [9] *World air quality. Air quality and pollution city ranking.*[Electronic resource]. Available: <https://www.iqair.com>.
- [10] *Turkey, Ukraine and Western Balkan countries compete for top spot in coal power air pollution in Europe.* EMBER report. [Electronic resource]. Available: <https://ember-climate.org/commentary/2021/05/25/coal-power-air-pollution/>.
- [11] European Environmental Agency, *Air pollution in Europe.* [Electronic resource]. Available: <https://www.eea.europa.eu/>.
- [12] Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, *Стан атмосферного повітря.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mepg.gov.ua/timeline/Stan-atmosfernogo-povityra.html>.
- [13] *Health Effects Institute. 2020. State of Global Air 2020.* Data source: Global Burden of Disease Study. IHME. - 2020. [Electronic resource]. Available: <https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/plot>
- [14] Міністерства охорони здоров'я України, «Гранично допустимі концентрації (ГДК) і орієнтовно безпечні рівні впливу (ОБРВ) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених пунктів» затверджені *наказами від 09.07.1997 року № 201 і від 10.01.1997 року № 8.* Редакція від 07.08.2014 [Електронний ресурс]. Режим доступу:

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97#Text> .

- [15] J. K. Ghosh, D. Mohan, and T. Samanta, *Introduction to Bayesian Analysis*. Springer-Verlag, New York, 2006, 354 p.
- [16] R. Viertl, "Statistical Methods for Fuzzy Data," *Wiley Series in Probability and Statistics*, 2011, 268 p.
- [17] P. J. Restle, M. B. Weissman, and R. D. Black, "Tests of Gaussian statistical properties," *Journal of Applied Physics*, vol. 54, pp. 5844, 1983.
- [18] V. Barnett, *Environmental Statistics: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, 2005, 320 p.
- [19] Global Alliance on Health and Pollution (GAHP). [Electronic resource]. Available: <https://www.pollution.org/> .
- [20] *Center for Disease Control and Prevention (CDC). Air Quality*. [Electronic resource]. Available: <https://www.cdc.gov/nceh/tracking/topics/AirQuality.htm> .
- [21] Н. М. Кізілова, Н. Л. Ричак., І Ю. І. Руднєв, «Підхід системної динаміки до контролю за якістю води на урбанізованих територіях», *Системи обробки інформації*, вип. 4(159), с.87-92, 2019. <https://doi.org/10.30748/soi.2019.159.10> .
- [22] Н. М. Кізілова, і Н. Л. Ричак, «Інформаційне супроводження системи менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях», *Системи обробки інформації*, вип. 4(163), с. 37-47, 2020. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.04>.
- [23] Н. Л. Ричак, і І. Табачна, «Тенденції формування рівня забруднення атмосферного повітря урбанізованого середовища. Людина та довкілля», *Проблеми неоекології*, № 3-4, с. 120-127, 2014.
- [24] J. Duggan, *System Dynamics Modeling with R. Lecture Notes in Social Networks book series*. Springer, 2016.
- [25] *Health Effects Institute. 2020. State of Global Air 2020*. Data source: Global Burden of Disease Study 2019. IHME, 2020. [Electronic resource]. Available: <https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/table> .

Рекомендована кафедрою системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.07.2021

**Ричак Наталія Львівна** — канд. геогр. наук, доцент, доцент кафедри екології та менеджменту довкілля Навчально-наукового інституту екології, e-mail: [rychak@ukr.net](mailto:rychak@ukr.net) ;

**Кізілова Наталія Миколаївна** — д-р фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри прикладної математики факультету математики і інформатики;

**Майструк Владислава Андріївна** — студентка факультету математики і інформатики, e-mail: [vladamaystruk@gmail.com](mailto:vladamaystruk@gmail.com) ;

**Макаренко Андрій Сергійович** — студент факультету математики і інформатики, e-mail: [andreymakarenko02.22.20@gmail.com](mailto:andreymakarenko02.22.20@gmail.com) ;

**Прогнімак Олександра Сергіївна** — студентка факультету математики і інформатики, e-mail: [aleksandra.prognimak@gmail.com](mailto:aleksandra.prognimak@gmail.com) .

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

**N. L. Rychak**<sup>1</sup>  
**N. M. Kizilova**<sup>1</sup>  
**V. A. Mastruk**<sup>1</sup>  
**A. S. Makarenko**<sup>1</sup>  
**O. S. Prognimak**<sup>1</sup>

## Mathematical Analysis of Air Pollution on the Territory of Ukraine Using Open Data Sources

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkov National University

*In recent decades, the global climate change determined as the increase in average annual air temperature, melting glaciers, increased evaporation of water and salinity of rivers, lakes, ponds, changes in the habitat of aquatic, groundwater and terrestrial animals, and human health and life expectancy, has been accepted as a fact. Because the countries of the world are closely linked by "open borders" of air and water, any local pollution is transferred with the flow of air, surface and groundwater to other countries, lands and continents. Environmental assessment and forecasts for the coming years and decades are based on continuous monitoring data from meteorological, climatic, chemical and biochemical stations, laboratories and research groups. The result of these efforts is an online database with open access, which allows to visualize the monitoring results and process the data with new mathematical methods to obtain reliable indicators of the state of pollution.*

*The article analyzes the state of air pollution in large cities in Ukraine on the basis of data processing from open sources. Indicators such as concentrations of gases CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, chemicals C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O, CH<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HF, HCl, C, as well as solid particles PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, which are produced in industrial cycles using imperfect (obsolete) means, energy production, combustion of hydrocarbon fuels in car engines, etc are analyzed. Statistically significant relationships between pairs of the above parameters were obtained both on daily dependencies from open sources (time series) and on averaged data for each month, each city, and the country as a whole. It is shown that at the national level the city has statistically significant relationships between NO<sub>2</sub> and NO, CH<sub>2</sub>O, C and CO. These dependencies differ in different cities and vary depending on the season (i.e. meteorological indicators). Thus, each city has its own dynamic statistical vector of dependencies between the content of measured substances, which indicates the sources of pollution in the form of enterprises, thermal power plants, road traffic and so on. Comparative data of PM<sub>2.5</sub> pollution on the territory of Ukraine in comparison with neighboring countries are given. The need to create a common database with a single list of major pollutants, data processing methods, statistical indices and evaluation criteria is discussed.*

**Keywords:** air pollution, microparticles, public health, global climate change, statistical data analysis.

**Rychak Nataliya L.** — Cand. Sc. (Geogr.), Associate Professor, Associate Professor of Ecology and Environmental Management of the Educational and Scientific Institute of Ecology, e-mail: rychak@ukr.net ;

**Kizilova Natalia M.** — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Professor of Applied Mathematics of the Faculty of Mathematics and Informatics, e-mail : n.kizilova@gmail.com ;

**Maistruk Vladyslava A.** — Student of the Department of Mathematics and Informatics, e-mail: vladamaystruk@gmail.com ;

**Makarenko Andrii S.** — Student of Department of Mathematics and Informatics, e-mail: andreymakarenko02.22.20@gmail.com ;

**Prognimak Oleksandra S.** — Student of the Department of Mathematics and Informatics e-mail: aleksandra.prognimak@gmail.com

**Н. Л. Рычак<sup>1</sup>**  
**Н. Н. Кизилова<sup>1</sup>**  
**В. А. Майструк<sup>1</sup>**  
**А. С. Макаренко<sup>1</sup>**  
**А. С. Прогнимак<sup>1</sup>**

## Математический анализ загрязнения атмосферного воздуха на территории Украины с использованием открытых источников данных

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

*В последние десятилетия наблюдаются глобальные изменения климата, а именно повышение среднегодовой температуры воздуха, таяние глетчеров, повышенное испарение воды и солености вод рек, озер, прудов, изменения привычного образа существования водных, подземных и наземных животных, а также здоровья и продолжительности жизни людей. Поскольку страны тесно связаны между собой «открытыми границами» воздуха и вод, любые локальные загрязнения переносятся с потоками воздуха, поверхностных и подземных вод в другие страны, земли и материи. Оценка экологического состояния и прогнозы на последующие годы и десятилетия базируются на данных постоянного мониторинга метеорологических, климатических, химических и биохимическими станциями, лабораториями и исследовательскими группами. Результатом этих усилий стали созданные он-лайн базы данных с открытым доступом, которые позволяют визуализировать результаты мониторинга и проводить обработку данных новыми математическими методами для получения надежных показателей состояния загрязнения.*

*В статье на основе обработки данных из открытых источников приведен анализ загрязненности воздуха в крупных городах на территории Украины. Проанализированы такие показатели как концентрации газов CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, химических веществ C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O, CH<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HF, HCl, C, а также твердых частиц TЧ<sub>10</sub>, TЧ<sub>2,5</sub>, которые производятся в промышленных циклах с использованием несовершенных (устаревших) средств производства энергии, сгорания углеводородных топлив в двигателях автомобилей и др. Получены статистически значимые зависимости между парами вышеуказанных параметров как на ежедневных зависимостях из открытых источников (временные ряды), так и на усредненных данных за каждый месяц, по каждому городу, и стране в целом. Показано, что на уровне страны имеют место статистически достоверные зависимости между содержанием NO<sub>2</sub> и NO, CH<sub>2</sub>O, C и CO. Эти зависимости отличаются в разных городах и меняются в зависимости от сезона (т. е. метеорологических показателей). Таким образом, каждый город имеет свой собственный динамический статистический вектор зависимостей между содержанием измеряемых веществ, который указывает на источники загрязнений в виде предприятий, ТЭЦ, автомобильного трафика и т. п. Приведены сравнительные данные загрязнений воздуха наночастицами TЧ<sub>2,5</sub> на территории Украины по сравнению с соседними странами. Отмечена необходимость создания общей базы данных с единым списком загрязняющих веществ, методами обработки данных, статистическим индексами и критериями оценки.*

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, микрочастицы, здоровья населения, глобальные изменения климата, статистический анализ данных.

**Рычак Наталия Львовна** — канд. географ. наук, доцент, доцент кафедры экологии и менеджмента окружающей среды Учебно-научного института экологии, e-mail: rychak@ukr.net ;

**Кизилова Наталья Николаевна** — д-р. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики факультета математики и информатики, e-mail : n.kizilova@gmail.com;

**Майструк Владислава Андреевна** — студент факультета математики и информатики, e-mail: vladamaystruk@gmail.com ;

**Макаренко Андрей Сергеевич** — студент факультета математики и информатики, e-mail: andreymakarenko02.22.20@gmail.com ;

**Прогнимак Александра Сергеевна** — студент факультета математики и информатики, e-mail: aleksandra.prognimak@gmail.com