

УДК 551.510.42, PACS 92.00.00, 89.60.Gg:

## СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ НАПЕРЕДОДНІ ПОВНОМАСШТАБНОГО РОСІЙСЬКОГО ВТОРГНЕННЯ. ЧАСТИНА 1: ПРИЗЕМНИЙ ВМІСТ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

М. В. Савенець, І. В. Дворецька, Т. В. Козленко,  
К. М. Комісар, А. П. Уманець, Н. С. Жемера

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,  
пр-т. Науки, 37, 03028, Київ, Україна, [savenets@uhmi.org.ua](mailto:savenets@uhmi.org.ua)

Робота присвячена дослідженню приземного забруднення атмосфери в Україні для встановлення базового стану якості атмосферного повітря напередодні повномасштабного російського вторгнення. Аналіз проведено для 5 забруднюючих домішок (пилу, діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) та формальдегіду ( $\text{CH}_2\text{O}$ )) на 126 постах спостережень у 39 містах. Виявлено, що найчастіше атмосферне повітря у містах зазнавало небезпечних перевищень за вмістом пилу,  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ . У той же час вміст  $\text{SO}_2$ , зазвичай, не досягав небезпечних концентрацій. Найбільша повторюваність перевищення максимально разових граничних показників характерна для промислово навантажених міст, де небезпечні рівні забруднення спостерігалися у 15–60% випадків залежно від домішки. Концентрації пилу та  $\text{NO}_2$  у найзабрудненіших містах на порядок перевищували вміст забруднюючих речовин у менших обласних центрах без потужної промисловості. Різниця у середніх концентраціях  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  та  $\text{CH}_2\text{O}$  між постами у різних містах складала 3-5 рази. Встановлено закономірності сезонної мінливості забруднюючих речовин на постах спостережень. Характерним є слабо виражена сезонність за винятком  $\text{CH}_2\text{O}$  та пилу. Проаналізовано міжрічну мінливість та тренди забруднюючих речовин і їх викидів. Виявлено неузгодженість тенденцій забруднюючих речовин та викидів в останні роки. На фоні зменшення викидів, концентрації забруднюючих речовин часто продовжували зростати. Проаналізовано вплив атмосферних явищ та характеристик вітру на формування високих та низьких рівнів забруднення атмосферного повітря. Аналіз показав значну роль локальних умов формування поля забруднення поблизу постів. Зміна концентрацій домішок на різних постах одного міста може бути різною за однакових атмосферних явищ. Вплив вітру також формує відмінне поле забруднення в межах одного міста. Залежно від забруднюючої речовини, від 12% до 22% постів характеризуються переважаючим впливом одного джерела викидів (або групи джерел), в той час як інші пости характеризуються значною варіативністю концентрацій, що надходять з різних напрямків. Досліджений стан якості атмосферного повітря може бути використано як базовий для порівняння та оцінки наслідків воєнних дій в Україні на основі даних приземного вмісту забруднюючих речовин. Наголошено на важливості актуалізації інформації щодо умов розташування наземних постів спостережень.

**Ключові слова:** пости спостережень; забруднюючі речовини; концентрації; викиди; атмосферне повітря.

### 1. ВСТУП

Формування забруднення атмосферного повітря є достатньо мінливим процесом [1,2], що сильно реагує на перерозподіл джерел викидів та зміну метеорологічних умов [3]. Будь-який науковий аналіз, а також прийняття управлінських рішень щодо покращення стану якості атмосферного повітря та відслідковування ефективності прийнятих заходів потребує наявності базових періодів відносно яких проводиться порівняння та оцінка змін у

концентраціях забруднюючих речовин [4,5]. У лютому 2022 року відбулося повномасштабне російське вторгнення на територію України, що суттєво вплинуло на забруднення атмосферного повітря. З одного боку, з'явилися нові джерела викидів забруднюючих речовин, пов'язаних із воєнними діями. З іншого боку, руйнування інфраструктурних та промислових об'єктів, знищення міст та масове переміщення населення в інші райони фактично змінили просторовий розподіл антропогенних джерел викидів. Вже сьогодні існує нагальна потреба постійного

моніторингу зміни забруднення атмосферного повітря під час війни, що активно проводиться державними відомствами [напр., 6,7], громадськістю [напр., 8] та науковцями [9-11]. Через деякий час постане проблема оцінки наслідків воєнних дій та необхідність прийняття рішень щодо післявоєнного розвитку базуючись на інформації про зміни, що відбулися. За цих умов, важливо мати поняття про базовий стан якості атмосферного повітря, який був напередодні повномасштабного російського вторгнення, що стане відправною точкою оцінки наслідків та змін, що відбулися із джерелами викидів. При цьому, враховуючи обмеженість спостережень за забрудненням атмосферного повітря поза містами, важливим є встановлення такого базового стану на основі як наземних даних, так і супутникових спостережень, що дозволять охопити всю територію України.

Тема якості атмосферного повітря в Україні завжди була вкрай актуальною, враховуючи розвиток промисловості та вплив викидів забруднюючих речовин, що дозволяє сформувати достатньо повну картину про історичну зміну якості атмосферного повітря та проаналізувати існуючі тенденції у концентраціях. Уявлення про забруднення атмосфери в Україні були сформовані науковцями на теренах колишнього Радянського Союзу [12-14]. Значних змін зазнали джерела викидів у 1990-х рр. внаслідок економічного спаду, що вплинуло і на якість атмосферного повітря [15,16]. З 2000-х рр. почали активно розвиватися різноманітні напрямки досліджень актуального стану забруднення як для всієї території України [16,17], так і для окремих регіонів та міст [18-20]. У останнє десятиріччя до аналізу стали активно залучатися новітні методи досліджень із залученням супутникового зондування, сучасних математичних моделей, та методів вимірювань [21-24], тощо. Усі ці дослідження дозволяють простежити поступову еволюцію забруднення атмосферного повітря в Україні. В той же час, початок активних воєнних дій у 2022 році поставив необхідність окреслення того стану атмосферного повітря на території України, який спостерігався у попередні роки та міг би стати базовим для майбутньої оцінки наслідків та планування післявоєнного розвитку.

Метою даної роботи є оцінка типових статистичних характеристик забруднення атмосферного повітря напередодні повномасштабного російського вторгнення, здійсненого для основних забруднюючих

речовин (пилу, діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), формальдегіду ( $\text{CH}_2\text{O}$ )), що вимірювалися на мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО). Важливим є формування уявлення про базовий стан забруднення атмосфери, оцінка якого здійснена індивідуально для усіх постів спостережень. Необхідно враховувати, що зміна активності джерел викидів та формування перешкод (забудови та рослинності) поблизу тих чи інших постів часто залишалися незафіксованими, в тому числі відсутні узагальнення щодо умов розташування постів на сучасному етапі. Як наслідок, ще однією задачею роботи стало формування розуміння щодо кількості постів на яких поле забруднення формується під впливом локальних умов. Це дозволить у майбутньому відокремлювати зміни забруднення атмосферного повітря внаслідок перерозподілу джерел викидів, в тому числі й спричинених воєнними діями, на фоні змін спричинених впливом метеорологічних та кліматичних умов території. У даній статті представлено першу частину досліджень, що охоплює дані приземного вмісту забруднюючих речовин на основі наземних вимірювань.

## 2. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконані на основі даних наземних спостережень на постах моніторингу мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря, отримані із архівів ЦГО. Аналіз середніх значень, повторюваності перевищення граничних нормативних показників, сезонної мінливості та залежності від метеорологічних величин проведено на основі строкових спостережень (01, 07, 13, 19 години) за пилом,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$  за період 2019–2020 рр. Загалом залучено 126 постів у 39 містах. Детальні характеристики постів спостережень та карта просторового розподілу міст із наявними наземними спостереженнями представлено у Savenets et al. (2022) [23]. Дослідження міжрічної мінливості та обчислення трендів здійснено на основі осереднених концентрацій забруднюючих речовин за рік над містами за період 2008–2020 рр. Період обрано із розрахунку отримання статистично значущих трендів, що найкращим чином відобразатиме зміну забруднення атмосферного повітря в сучасних умовах. Тому,

період менше кліматичного, але перевищує 10 років, що згідно рекомендацій Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) достатній для проведення кліматологічної оцінки [25]. За цей період часу використано дані загальних (стаціонарні + пересувні джерела) викидів забруднюючих речовин із національних доповідей та регіональних звітів про стан навколишнього природного середовища Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [26]. Метеорологічні умови проаналізовано на основі строкових спостережень за атмосферними явищами (дощ, мряка, сніг, туман та туман з опадами) та напрямком і швидкістю вітру, здійсненими у строки спостережень за забрудненням атмосферного повітря. Метеорологічні характеристики обрані з метою врахування типових умов, що сприяють накопиченню та виведенню (осажденню й розсіюванню) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. У архівах ЦГО частина даних на постах спостережень супроводжується метеорологічною інформацією на постах. У разі відсутності такої інформації, вказуються дані отримані на метеорологічних станціях.

Розрахункові характеристики у роботі здійснено за загальноприйнятими статистичними обчисленнями. Середні показники за досліджуваний період, місяць або рік обчислено як середнє арифметичне. Тренди концентрацій та викидів обчислено методом найменших квадратів. Чіткість прояву сезонної мінливості визначено за співвідношенням дисперсії концентрацій, що описують сезонну мінливість, до дисперсії вихідних значень. Аналіз повторюваності небезпечних перевищень граничних максимально разових нормативних показників проведено за національними показниками. По-перше, відмінність від міжнародних показників є досить несуттєвою, що не матиме вплив на отримані значення повторюваності перевищень. По-друге, національні нормативи більш придатні для аналізу даних, отриманих на основі вимірювань мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря (зокрема щодо пилу). За національними нормативами максимально разова гранично допустима концентрація (ГДК м.р.) складає 0.2 мг/м<sup>3</sup> для NO<sub>2</sub>, 5 мг/м<sup>3</sup> для CO, 0.035 мг/м<sup>3</sup> для CH<sub>2</sub>O, 0.5 мг/м<sup>3</sup> для SO<sub>2</sub> та 0.5 мг/м<sup>3</sup> для пилу [27].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Історично склалося, пости моніторингу мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря в Україні розташовуються у промислових містах. При цьому, місце розташування переважної більшості постів обиралося з метою отримання інформації щодо негативного впливу тих чи інших підприємств промисловості. З часом, частину підприємств було закрито, частина модернізувала виробництво, а навколо постів спостережень з'явилися нові джерела викидів (переважно автошляхи). Як наслідок, на сьогодні дані про стан забруднення атмосферного повітря у містах описують дещо інше поле забруднення, ніж передбачалося в період облаштування постів спостережень. Враховуючи початок значного руйнування об'єктів промисловості у 2022 році внаслідок агресії російської федерації в Україні, важливим є фіксація основних характеристик стану якості атмосферного повітря, що стане базовим для оцінки наслідків воєнних дій. Серед таких характеристик є середні концентрації на постах спостережень та повторюваність перевищень максимально разових концентрацій. Аналіз строкових вимірів та нормативи максимально разових концентрацій будуть більш інформативними та обґрунтованими, враховуючи максимум 4-разовий забір проб за добу на мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря. У тому числі, важливо дотримуватися статистично правильного порівняння, використовуючи ГДК м.р. для порівняння із строковими вимірами, ГДК с.д. – із осередненими значеннями за деякий період часу.

#### 3.1 Рівні забруднення атмосферного повітря у містах України

Для міст території України характерна значна відмінність рівнів забруднення, де переважно для високого середнього вмісту забруднюючих речовин характерна й вища повторюваність перевищень граничних нормативних значень (рис. 1-5). Пости спостережень на рис. 1-5 проранжовано за повторюваністю перевищення максимально разових концентрацій в сторону зменшення показника. Загалом, найчастіше небезпечні рівні забруднення спостерігаються для пилу (рис. 1), NO<sub>2</sub> (рис. 2) та CO (рис. 3), що фіксувалися приблизно на половині із наявних постів спостережень, та перевищуючи повторюваність у 30% у деяких містах.

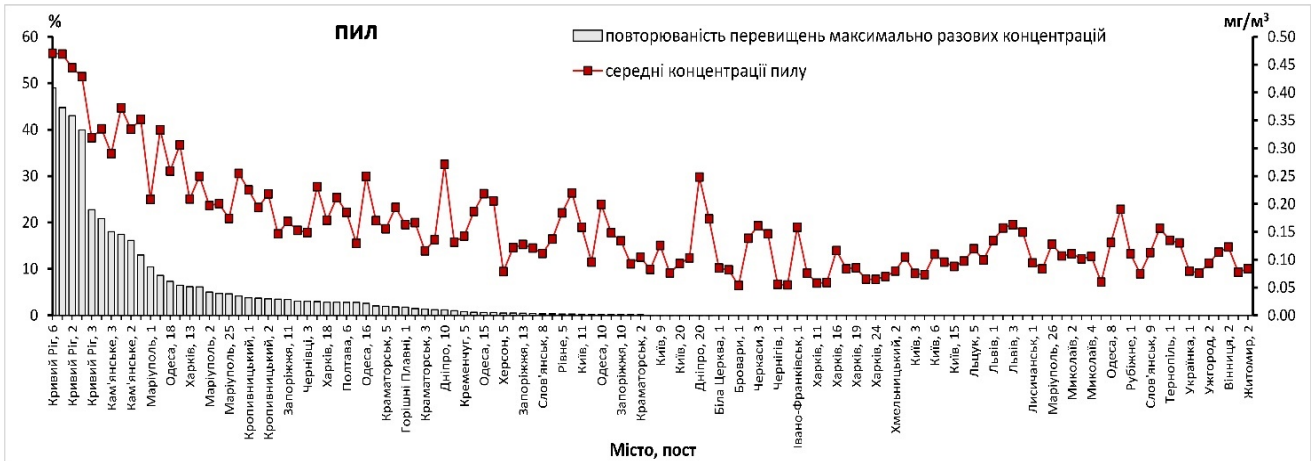


Рис. 1 - Середні концентрації пилу за період 2019–2020 рр. та повторюваність перевищення ГДК м.р. на постах  
Fig. 1 - Average concentrations of dust for 2019–2020 and the frequency of maximal threshold levels exceedance at monitoring sites

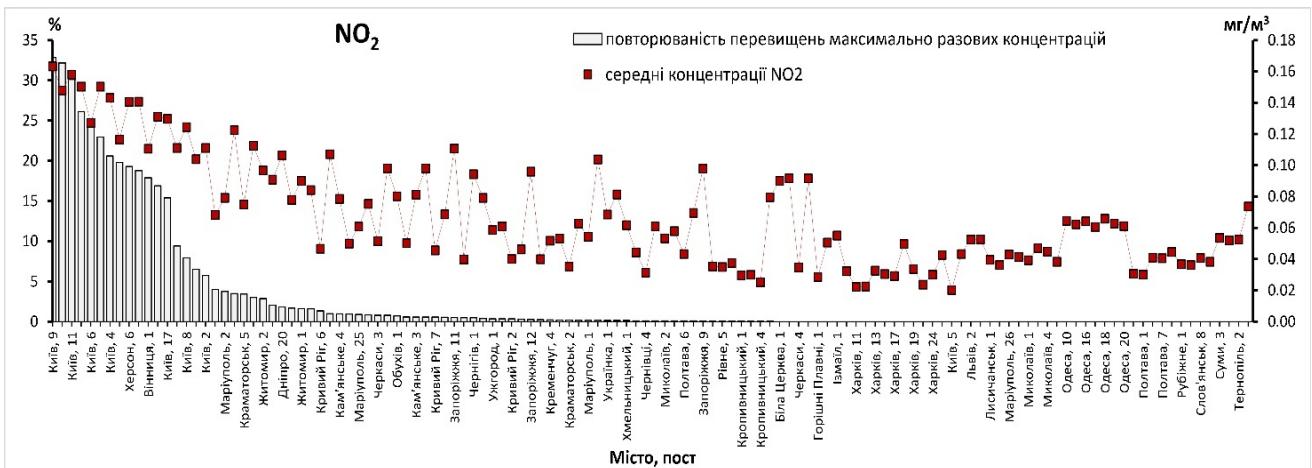


Рис. 2 - Середні концентрації NO<sub>2</sub> за період за період 2019–2020 рр. та повторюваність перевищення ГДК м.р. на постах  
Fig. 2 - Average concentrations of NO<sub>2</sub> for 2019–2020 and the frequency of maximal threshold levels exceedance at monitoring sites

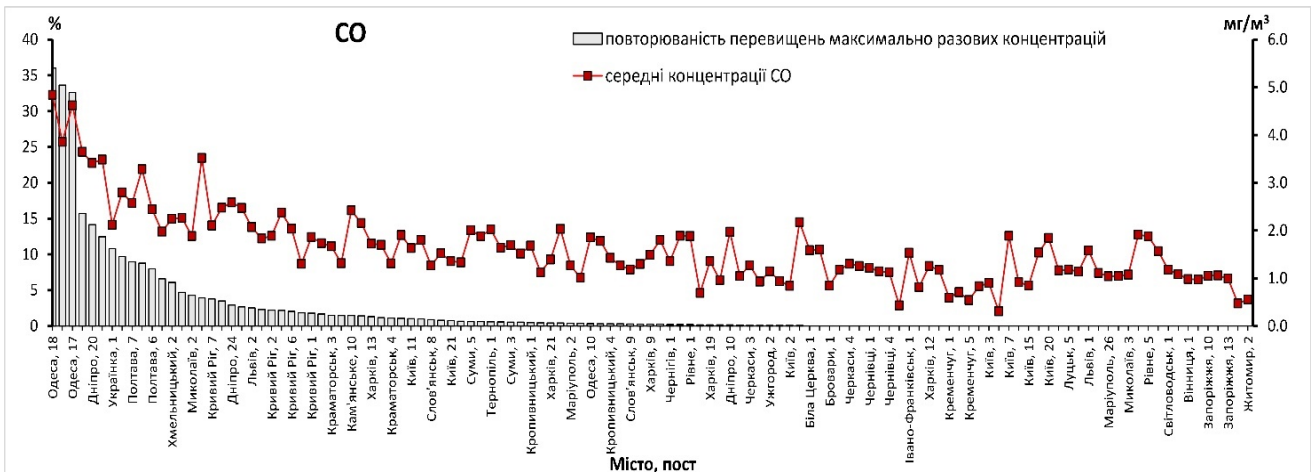


Рис. 3 - Середні концентрації CO за період за період 2019–2020 рр. та повторюваність перевищення ГДК м.р. на постах  
Fig. 3 - Average concentrations of CO for 2019–2020 and the frequency of maximal threshold levels exceedance at monitoring sites

Найменша повторюваність небезпечних концентрацій спостерігається для SO<sub>2</sub> (рис. 4), що в останні роки фіксувалося тільки на 5 із 126 проаналізованих постах спостережень з повторюваністю близько 0.1%. Вміст CH<sub>2</sub>O,

будучи далеко не найбільш проблемною домішкою для більшості міст України, характеризувався надто небезпечними рівнями у Маріуполі (рис. 5), де вкрай небезпечні





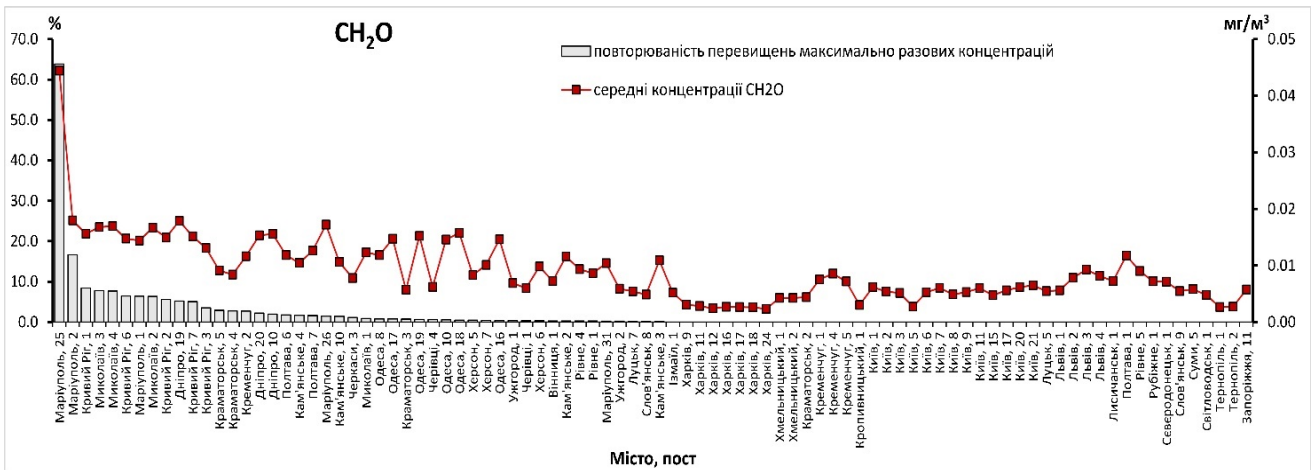


Рис. 5 - Середні концентрації  $\text{CH}_2\text{O}$  за період за період 2019–2020 рр. та повторюваність перевищення ГДК м.р. на постах  
 Fig. 5 - Average concentrations of  $\text{CH}_2\text{O}$  for 2019–2020 and the frequency of maximal threshold levels exceedance at monitoring sites

### 3.2 Часові зміни приземного вмісту забруднюючих речовин у містах України

В останнє десятиріччя перед початком повномасштабного російського вторгнення на територію України спостерігалось посилення неузгодженості між даними інвентаризації викидів та концентраціями забруднюючих речовин, виміряних на постах державної мережі спостережень. Так, у переважній більшості проаналізованих міст викиди усіх забруднюючих речовин поступово зменшувалися. У найбільш забруднених містах України, де проводяться спостереження за забрудненням атмосферного повітря, викиди пилу зменшувались в середньому зі швидкістю 0.5–2.5 тис. т/рік, викиди  $\text{SO}_2$  – 0.5–4.0 тис. т/рік, викиди  $\text{NO}_2$  – 0.1–1.1 тис. т/рік,  $\text{CO}$  – 1.3–4.5 тис. т/рік,  $\text{CH}_2\text{O}$  – 2.0–10.0 тис. т/рік. На рис. 6–10 представлено динаміку викидів забруднюючих речовин у містах (з найпотужнішими викидами) для кожної домішки (стовпчикові діаграми), для яких побудовані лінійні тренди (пунктирні лінії відповідного кольору). Обчислені тренди показали значущість зменшення викидів у більшості міст території України, подекуди досягаючи  $R^2 > 0.7$ .

Поряд із загальним зменшенням викидів, концентрації забруднюючих речовин не змінювалися, а часто й зростали. Так, на фоні міжрічних коливань вмісту забруднюючих речовин, переважно спостерігалися позитивні тенденції, в тому числі і у містах з викидами менше 1 тис. т на рік. Більш того, неузгодження між викидами та концентраціями простежується не тільки для тенденцій, але і для рівнів забруднення. З рис. 6–10 можна видно, що менші викиди не завжди узгоджуються з нижчими

концентраціями забруднюючих речовин (криві на графіках). Серед досліджуваних домішок найкращого узгодження з викидами та найбільшого зменшення у містах зазнають концентрації  $\text{CO}$  та  $\text{CH}_2\text{O}$ , досягаючи зменшення до  $-0.2 \text{ mg/m}^3 \text{ рік}^{-1}$  та  $-0.001 \text{ mg/m}^3 \text{ рік}^{-1}$  відповідно. У той же час, вміст пилу,  $\text{SO}_2$ , та  $\text{NO}_2$  переважно зростає, із найбільш стрімким трендом до  $0.02 \text{ mg/m}^3 \text{ рік}^{-1}$ ,  $0.001 \text{ mg/m}^3 \text{ рік}^{-1}$  та  $0.004 \text{ mg/m}^3 \text{ рік}^{-1}$  відповідно.

На жаль, відсутність додаткових вимірювань протягом доби та потенційні недоліки інвентаризації викидів не дозволяють отримати точне підтвердження причин неузгодженості даних. Факт зростання вмісту забруднюючих речовин на більшості досліджуваних постів свідчить про недосконалість проведення інвентаризації викидів. Враховуючи, що на сьогодні більшість постів спостережень розташовуються поблизу автошляхів, автотранспорт може відігравати ключову роль у тенденціях до зростання забруднення атмосфери останнього десятиріччя. Цей вплив потенційно може перевищувати наслідки зменшення викидів від промислових джерел, особливо у містах із великою чисельністю населення та у обласних центрах з відсутніми значними промисловими викидами. Зменшення концентрацій зазнають переважно сполуки із вмістом вуглецю ( $\text{CO}$  та  $\text{CH}_2\text{O}$ ), що може підтверджувати зменшення використання твердого палива у промисловості та узгодження із загальними тенденціями до зменшення викидів. Проте, зростання вмісту  $\text{NO}_2$  та пилу потребує більшої уваги до ролі автотранспорту у формуванні забруднення міст України.

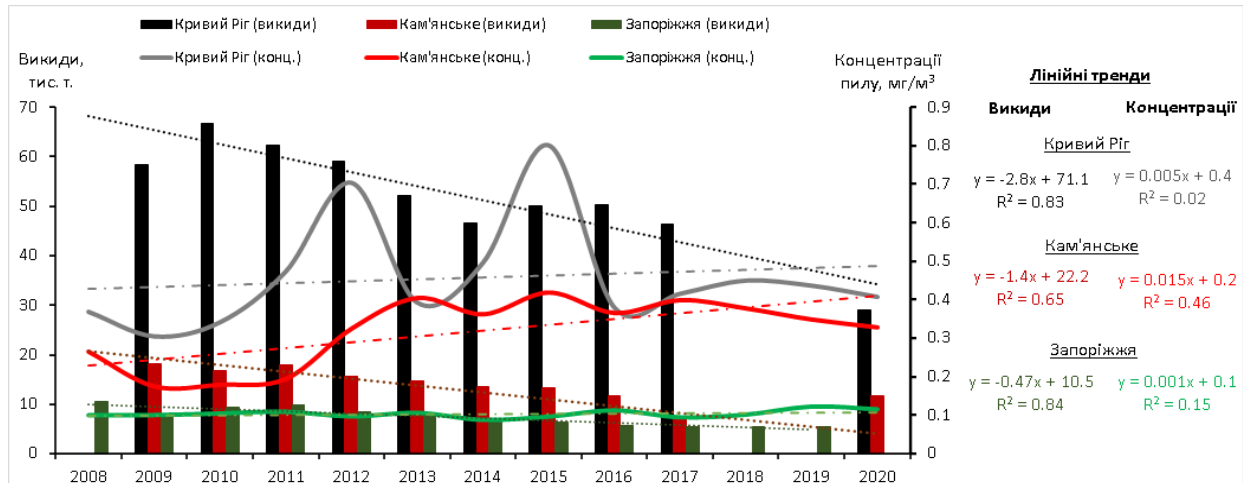


Рис. 6 - Часові зміни викидів (стовпчики) та концентрацій (криві) пилу, і їх тренди на прикладі Кривого Рогу, Кам'янського та Запоріжжя

Fig. 6 - Temporal changes of emissions (bars) and concentrations (curves) of dust, and their trends in the example of Kryvyi Rig, Kamianske, and Zaporizhzhia

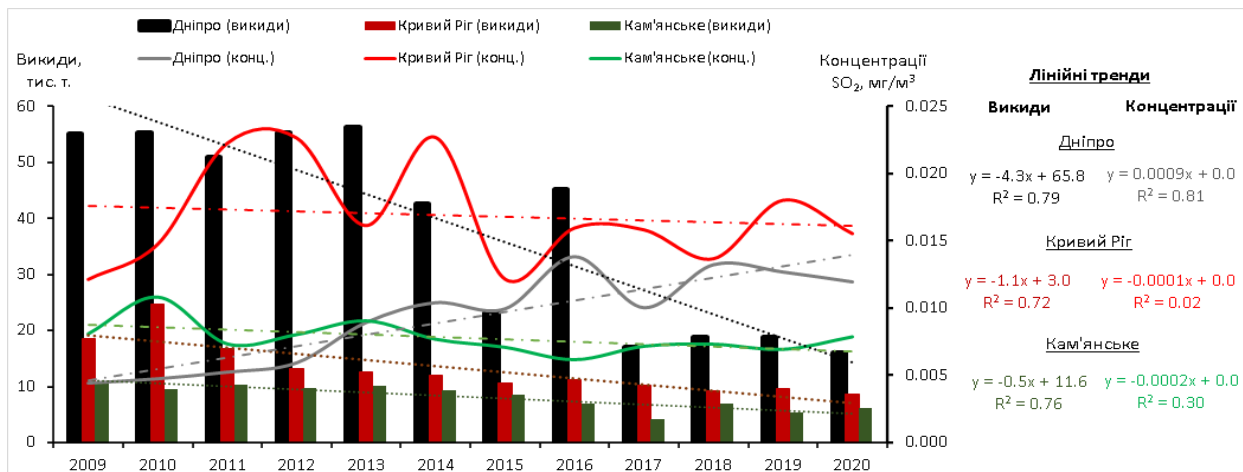


Рис. 7 - Часові зміни викидів (стовпчики) та концентрацій (криві) SO<sub>2</sub>, і їх тренди на прикладі Дніпра, Кривого Рогу та Кам'янського

Fig. 7 - Temporal changes of emissions (bars) and concentrations (curves) of SO<sub>2</sub>, and their trends in the example of Dnipro, Kryvyi Rig, and Kamianske

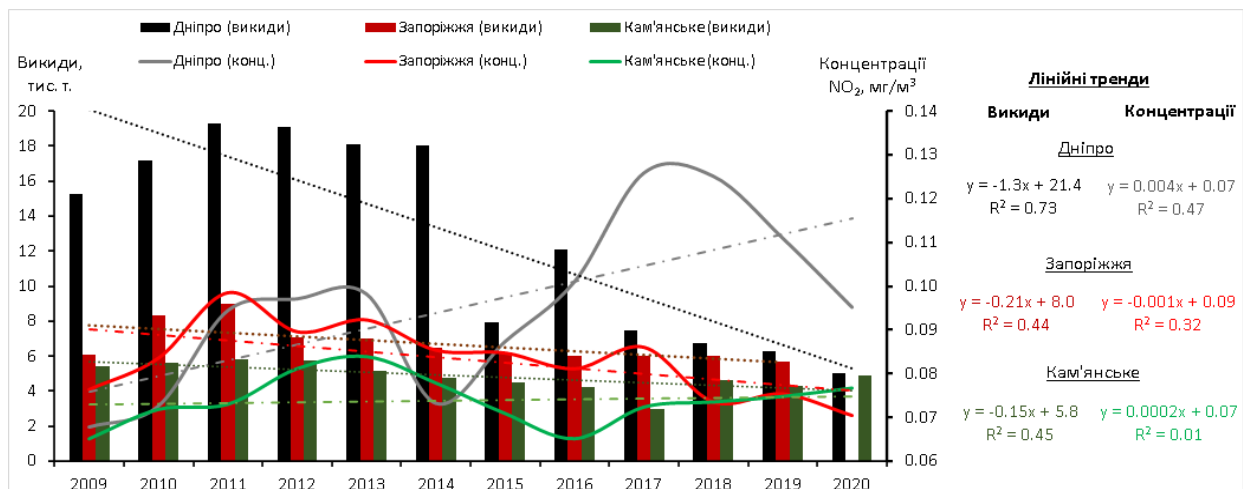


Рис. 8 - Часові зміни викидів (стовпчики) та концентрацій (криві) NO<sub>2</sub>, і їх тренди на прикладі Дніпра, Запоріжжя та Кам'янського

Fig. 8 - Temporal changes of emissions (bars) and concentrations (curves) of NO<sub>2</sub>, and their trends in the example of Dnipro, Zaporizhzhia, and Kamianske

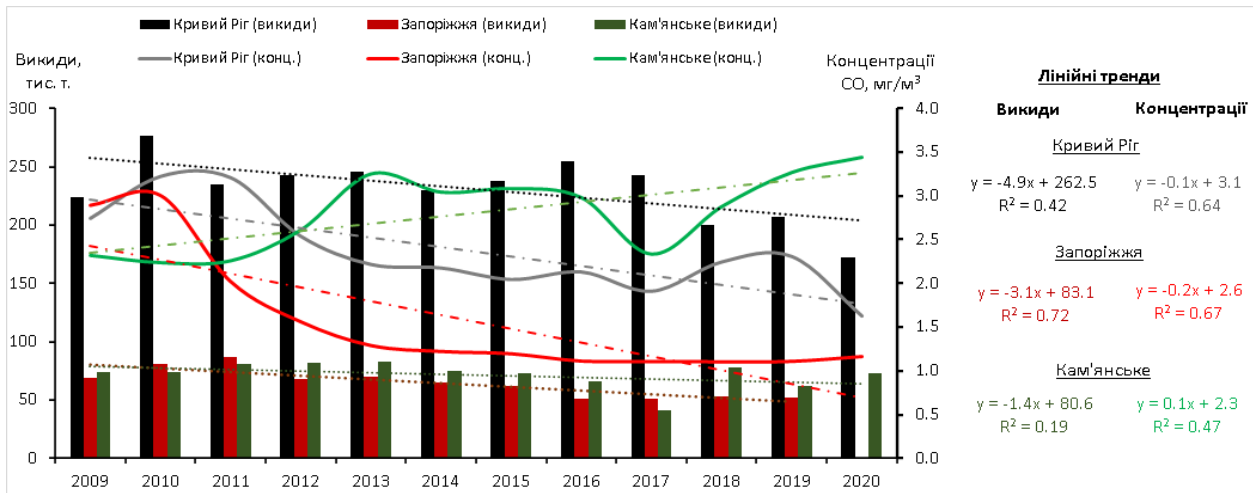


Рис. 9 - Часові зміни викидів (стовпчики) та концентрацій (криві) CO, і їх тренди на прикладі Дніпра, Запоріжжя та Кам'янського

Fig. 9 - Temporal changes of emissions (bars) and concentrations (curves) of CO, and their trends in the example of Dnipro, Zaporizhzhia, and Kamianske

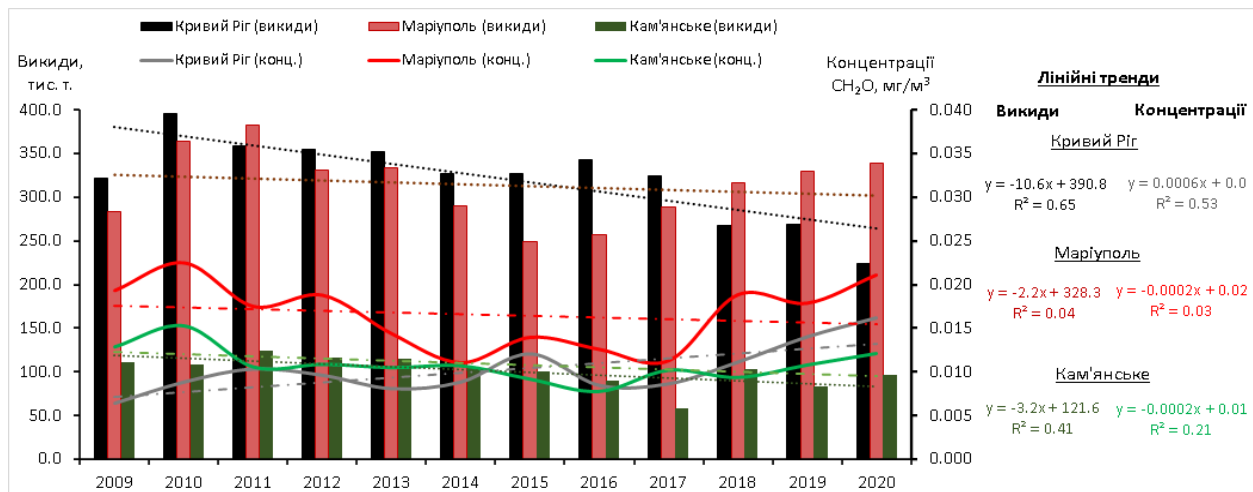


Рис. 10 - Часові зміни викидів (стовпчики) та концентрацій (криві) CH<sub>2</sub>O, і їх тренди на прикладі Кривого Року, Маріуполя та Кам'янського

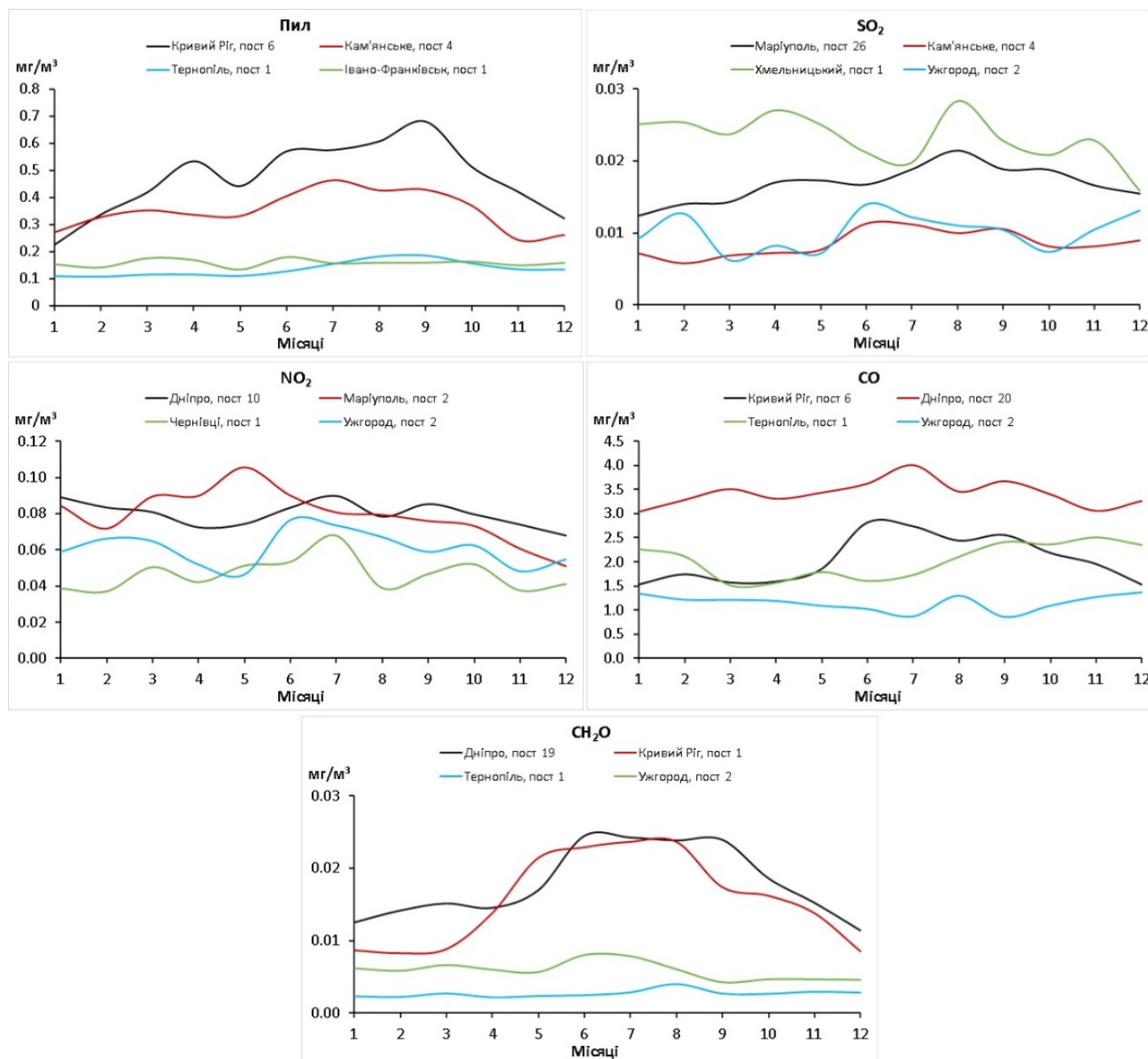
Fig. 10 - Temporal changes of emissions (bars) and concentrations (curves) of CH<sub>2</sub>O, and their trends in the example of Kryvyi Rig, Mariupol, and Kamianske

Протягом останнього десятиріччя, сезонна мінливість забруднюючих речовин у містах України слабо виражена і для більшості домішок її прояв залежить від антропогенних чинників. Більша сезонна відмінність характерна для міст із високими концентраціями забруднюючих речовин. На рис. 11 зображено річний хід забруднюючих речовин у містах із характерними високими (>10 тис. т на рік) та з низькими (<1 тис. т на рік) викидами. По-перше, час від часу спостерігається неузгодженість концентрацій з викидами, зокрема яскравий приклад для SO<sub>2</sub> на рис. 11. По-друге, у містах із вищими концентраціями мінімуми та максимуми річного ходу виражені чіткіше. Так, сезонна мінливість пояснює 20-30% дисперсії вмісту пилу у забруднених містах, та 5-15% у більш чистих

містах; для SO<sub>2</sub> – 10-30% у забруднених і 5-10% у більш чистих містах, для CH<sub>2</sub>O – 20-50% у забруднених та 5-10% у більш чистих містах. Зворотна залежність характерна для NO<sub>2</sub> та CO, де у забруднених містах сезонність пояснює 5-10% і 5-25% дисперсії вмісту домішки відповідно, а у більш чистих містах – 10-15% та 10-30% відповідно.

Сезонні максимуми найчастіше простежуються у теплий сезон року, переважно влітку. Зазвичай, формування літніх максимумів забруднюючих речовин більше залежить від впливу метеорологічних умов, зокрема через менш інтенсивне осадження та більш інтенсивні фотохімічні реакції. Цей прояв характерний для найзабрудненіших міст (рис. 11), тому більш виражена зміна концентрацій забруднюючих





**Рис. 11** - Річний хід вмісту забруднюючих речовин у містах із високими (чорна та червона криві) та низькими (зелена та блакитна криві) викидами

**Fig. 11** - Annual variability of pollutants' concentrations in cities with high (black and red curves) and low (green and blue curves) emissions

речовин від метеорологічних умов там, де вміст більший, тобто більша кількість речовини зазнає впливу. У частині міст України концентрації SO<sub>2</sub> та CO найвищі у холодний період року. У таких містах сезонні відмінності формуються переважно періодичним антропогенним чинником, пов'язаним із більшими викидами протягом опалювального сезону внаслідок спалювання твердого палива.

Загалом, сезонна мінливість найкраще прослідковується для CH<sub>2</sub>O та пилу (рис. 11). Концентрації CH<sub>2</sub>O багато у чому формуються

не внаслідок прямих викидів, а в результаті його фотохімічного утворення в атмосфері з інших забруднюючих речовин. Таким чином, сезонна мінливість і літні максимуми CH<sub>2</sub>O у найзабрудненіших містах узгоджуються із притоком сонячного випромінювання на земну поверхню. Літні максимуми пилу у сезонному ході обумовлені переважно меншою повторюваністю атмосферних явищ, що призводять до вологого осадження, що буде показано на рис. 12.

Наявність лише чотирьох строків спостережень на добу не дозволяє перейти до дослідження добової мінливості забруднюючих речовин. Згідно наявних досліджень в інших країнах, години формування максимумів та мінімумів добового ходу забруднюючих речовин не узгоджуються із строками спостережень на українській мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря. Подібні оцінки стануть можливі після переоснащення мережі спостережень згідно Директив ЄС та після зміни обладнання й методів відбору проб.

### 3.3 Роль метеорологічних умов у формуванні забруднення міст України та наявні неузгодженості

Просторово-часовий розподіл забруднюючих речовин, переважна більшість яких надходить від антропогенних джерел викидів, значно залежить від метеорологічних умов. При цьому, зміна концентрацій за тих чи інших метеорологічних умов (визначених найчастіше на метеорологічних станціях на відстані від постів спостережень) дозволяє зробити висновок, що чи поле забруднення атмосферного повітря сформоване під дією локальних чинників поблизу поста спостережень, чи характеризується залежністю від факторів в межах міста або регіону. Зміни концентрацій, що не узгоджуються із очікуваними фізичними механізмами, найчастіше будуть вказувати на локальність умов формування поля забруднення в тих чи інших урбанізованих районах міста, а інколи і на мікрометеорологічний вплив окремої вулиці чи ділянки де встановлено пост спостережень. Проведено дослідження атмосферних явищ (дощ, мряка, сніг, туман та туман з опадами) та проаналізовано вітровий вплив на забруднення атмосферного повітря.

Найвагоміший вплив атмосферних явищ на забруднення атмосферного повітря має місце взимку, коли спостерігається значна їх повторюваність та різноманітність (рис. 12). Як наслідок, саме у зимовий період, поле забруднення зазнає найбільшого динамічного впливу, в той час як у літній період роль хімічного перетворення домішок буде переважати над впливом атмосферних явищ. Повторюваність атмосферних явищ проаналізовано для кожного міста, де є пости спостережень за забрудненням атмосферного повітря. На рис. 12 наведено приклад для міст Київ та Ужгород.

За переважною більшістю процесів, вплив

метеорологічних умов на забруднення атмосферного повітря є добре вивченим. Тому, на основі наявних даних добре визначати неузгодженості, що свідчатимуть про дуже локальні умови формування забруднення на тих чи інших постах спостережень. Велику роль при цьому відіграватимуть наявність даних безпосередньо на постах, а не на метеостанції. Враховуючи точковість атмосферних явищ (опади та тумани), використання даних метеостанцій часто є непридатними для аналізу впливу метеорологічних факторів на забруднюючі речовини.

На рис. 13 наведено кількість постів, де найвищі середні концентрації забруднюючих речовин формуються під впливом певного атмосферного явища. Так, вони впливають на концентрації забруднюючих речовин через процеси їх накопичення та виведення [28]. Розуміння впливу метеорологічних явищ повинно базуватися і на знаннях про фізичні та хімічні перетворення молекул забруднюючих речовин [29]. Зокрема, опади (дощ, мряка та сніг) виступають як механізми вологого осадження, але тільки для тих забруднюючих речовин, які хімічно взаємодіють із водяною парою. Наприклад, для пилу,  $\text{NO}_2$  та  $\text{SO}_2$  виведення з опадами відбувається, в той час як  $\text{CO}$  хімічно не реагує із водяною парою та не виводиться із атмосфери з опадами [30]. Із туманами ситуація досить заплутана та потребує обережного підходу до аналізу. З одного боку, тумани також є механізмом вологого осадження домішок, тобто сприяють зменшенню концентрацій [29-31]. З іншого боку, метеорологічні умови при яких формуються тумани є сприятливими і для накопичення забруднюючих речовин [31,32] (досить часто зустрічається помилкова думка, що безпосередньо тумани сприяють накопиченню забруднюючих речовин, що базується на кореляції туманів із концентраціями деяких домішок. Насправді ж, кореляція між туманами і накопиченням деяких домішок зумовлена тим, що умови середовища є сприятливими для перебігу обох процесів). Проведений аналіз виявив, що неузгодженість між зафіксованими спостереженнями та реальними фізичними процесами характерна для 20–40% постів залежно від забруднюючих речовин. Це не означає, що є помилки у вимірних даних, проте це свідчить, що за історичний період змінився розподіл джерел викидів або перешкод (будівлі, дерева, тощо) та їх впливу на поле забруднення поблизу постів.

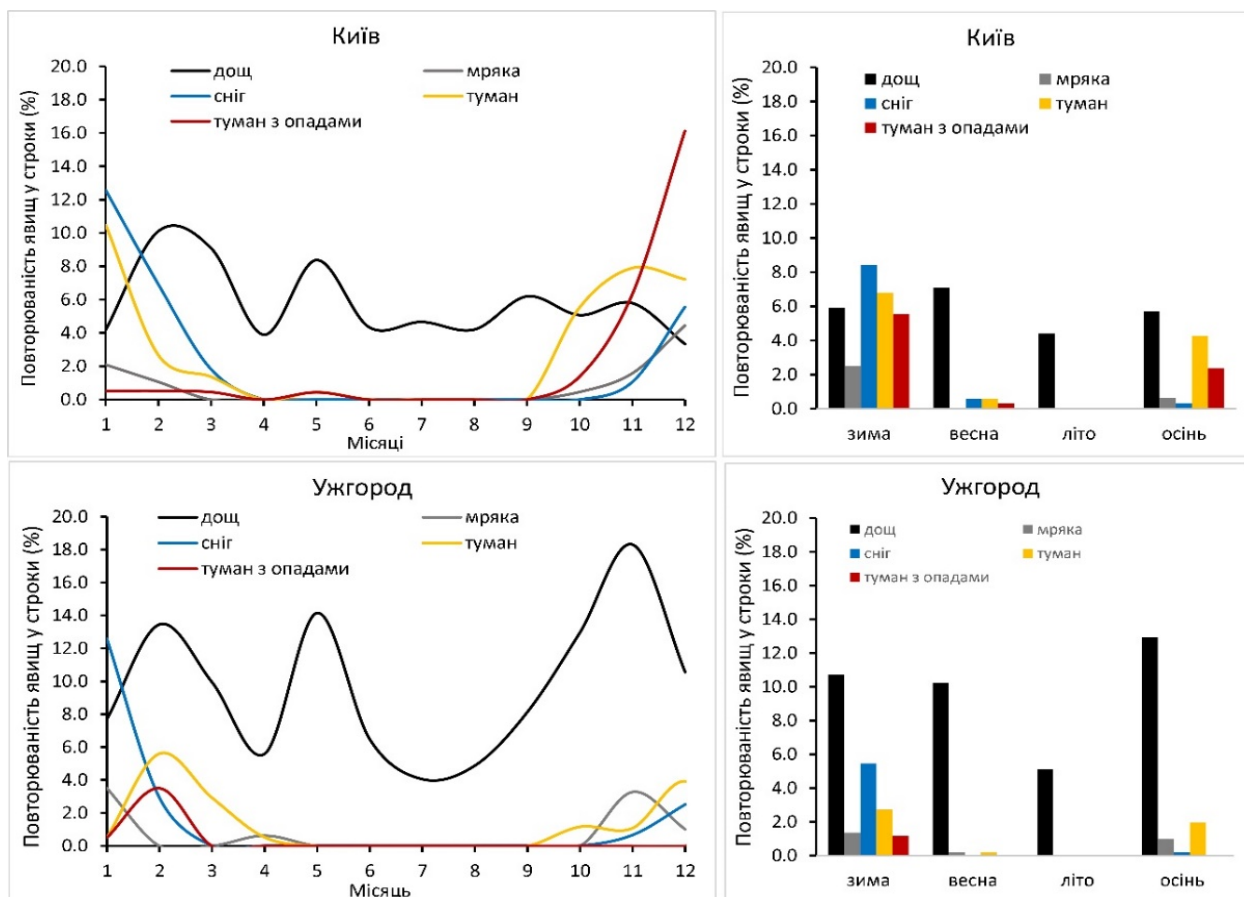


Рис. 12 - Повторюваність атмосферних явищ у строки вимірювання забруднення атмосферного повітря по місяцям та сезонам

Fig. 12 - Frequency of atmospheric phenomena in the hours of air quality measurements distributed by months and seasons

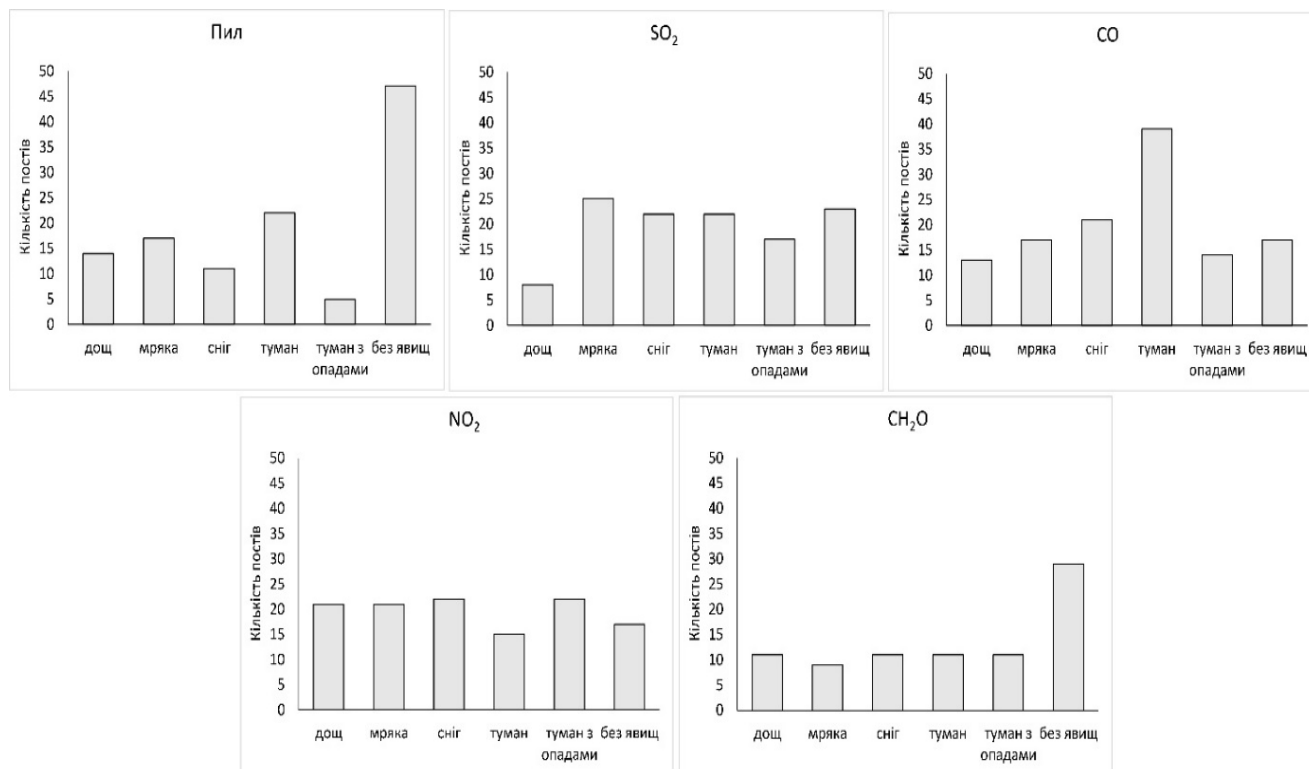


Рис. 13 - Кількість постів на яких за певних атмосферних явищ спостерігаються максимальні середні рівні забруднення

Fig. 13 - Amount of monitoring sites where the highest average concentrations correspond to certain phenomena

Наприклад, не існує фізичного механізму при якому пил буде накопичуватися за умов дощу, мряки чи снігу. На рис. 13 ми бачимо, що близько 50 постів (14 для пилу, 6 для SO<sub>2</sub>, 20 для NO<sub>2</sub>, 10 для CH<sub>2</sub>O) суперечать загальновідомим фізичним закономірностям. Тобто, умови формування забруднення на цих постах, найімовірніше, стали досить локальними, тому є нагальною потреба у оновленні інформації про умови рослинності, забудови та джерел викидів навколо постів. Тільки тоді стане можливим пояснити неузгодження даних із реальними природними процесами, та надати необхідні коригування до аналізу даних. Загалом, формування концентрацій NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub> поблизу постів вже мало узгоджуються із метеорологічними процесами, в той же час на більшості постів спостерігаються очікувані закономірності для пилу, CO та CH<sub>2</sub>O.

На рис. 14 наведено кількість постів, де найнижчі середні концентрації забруднюючих речовин формуються під впливом певного атмосферного явища. Формування мінімальних концентрацій краще узгоджується із метеорологічними процесами, ніж формування високих рівнів забруднення. Загалом, лише 10–25% постів не узгоджуються із фізичними механізмами формування низьких концентрацій забруднюючих речовин.

Таким чином, при аналізі атмосферних явищ стає очевидним, що основну проблему для виявлення закономірностей впливу метеорологічних умов на стан забруднення атмосферного повітря являють собою випадки формування високих рівнів забруднення. Звичайно, тут накладається залежність від надходження значної кількості викидів антропогенних джерел, що може переважати вплив метеорологічних умов. Проте, розв'язання цих проблем можливе після актуалізації опису розташування постів спостережень.

Поряд із атмосферними явищами, чи не найбільшу роль на розповсюдження та виведення забруднюючих речовин належить вітру. Поле забруднення на постах спостережень часто формується під впливом різних джерел викидів, причому в один сезон переважати можуть викиди від одного джерела, а в інший сезон – іншого (навіть якщо обидва джерела діють неперервно протягом року). Все це відбувається через зміну переважаючого напрямку вітру протягом року. Поле вітру суттєво змінюється всередині міста під впливом рельєфу, забудови та міської рослинності. Такі зміни поля вітру можуть бути незначними, як

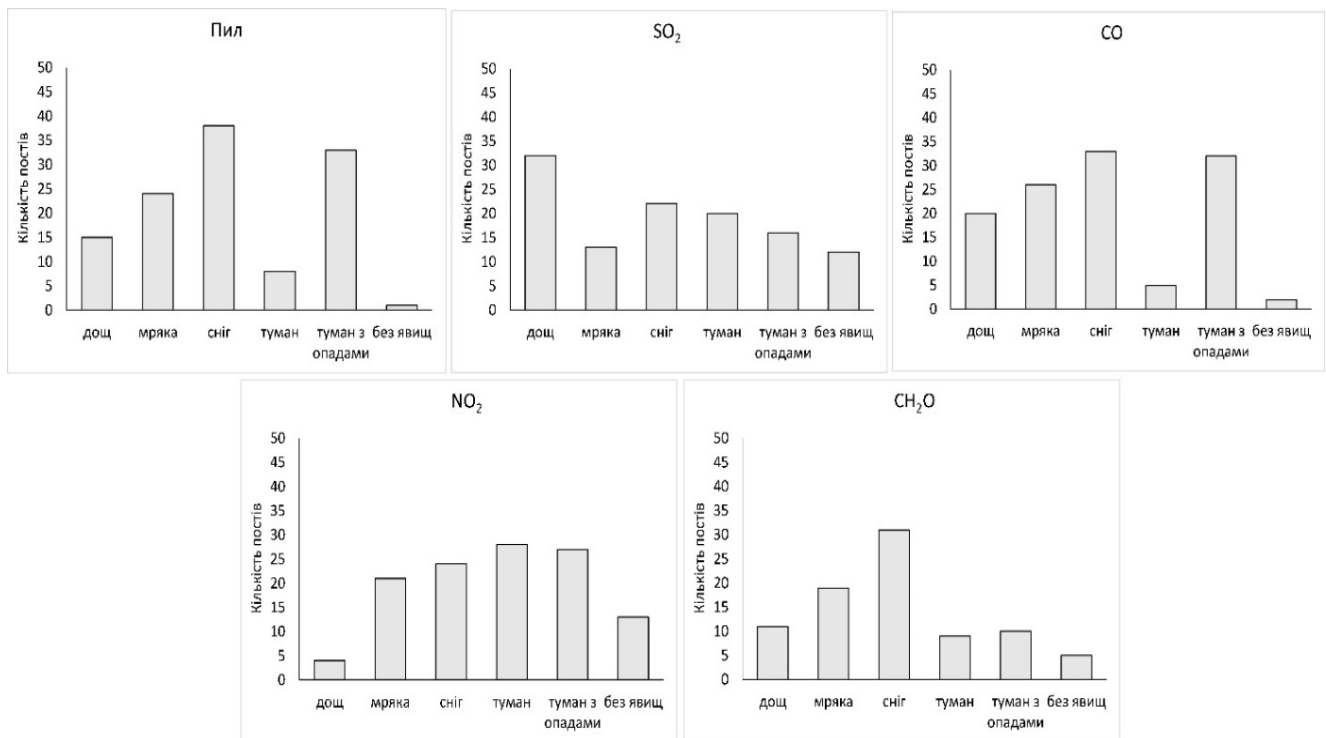
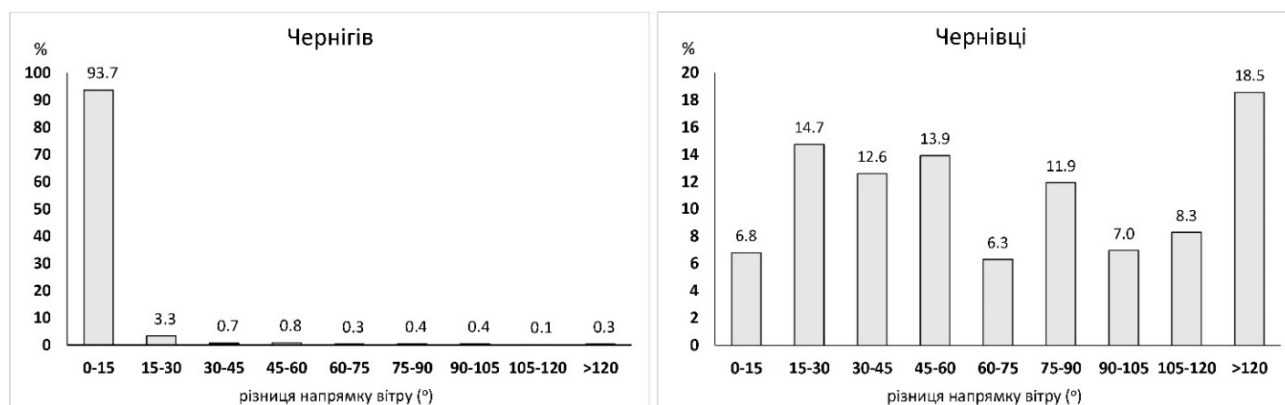


Рис. 14 - Кількість постів на яких за певних атмосферних явищ спостерігаються мінімальні середні рівні забруднення  
 Fig. 14 - Amount of monitoring sites where the lowest average concentrations correspond to certain phenomena



**Рис. 15** - Різниця у напрямку вітру між метеорологічною станцією та постами спостережень на прикладі Чернігова та Чернівців

**Fig. 15** - Differences in wind direction between meteorological station and air quality monitoring sites in the example of Chernihiv and Chernivtsi

наприклад у Чернігові, де майже у 94% вітер на постах спостережень не відхиляється від вітру на метеостанції більше ніж на  $15^{\circ}$ . В той же час, за умов складного рельєфу місцевості, як наприклад в Чернівцях, дані метеорологічної станції є абсолютно непридатними для аналізу забруднення у місті. Різниця у напрямку вітру для Чернівців розподілена рівномірно між усіма напрямками вітру. Часто спостерігаються умови прямо протилежних вітрів через вплив рельєфу та забудови (рис. 15).

Загалом, на сьогодні лише 13 міст із 39 використовують дані вітру на постах спостережень. Це вкрай негативно впливає на можливості дослідження забруднення атмосферного повітря у містах. Зазвичай, у містах кожен пост спостережень характеризується власними особливостями формування забруднення. Відмінність між постами чітко простежується на рис.16 на прикладі міста Львова. На наведених біваріативних графіках для досліджуваних забруднюючих речовин показано залежність середньої концентрації від умов надходження повітря з певного напрямку (осі на графіках) за певних швидкостей вітру (концентричні кола на графіках, м/с).

Наведені графіки відображають залежність концентрацій забруднюючих речовин від напрямку та швидкості вітру. Так, одні речовини можуть формуватися за умови низьких швидкостей вітру без чіткого розмежування за напрямками (напр., CO, Львів, пост №1 на

рис. 16). Це означає, що найбільше забруднення вмістом CO на цьому посту виникає внаслідок впливу джерела викидів безпосередньо поруч із постом спостережень. У той же час, вміст пилу, SO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>O формуються при високих швидкостях вітру південно-східного напрямку. Це вказує на те, що концентрації цих забруднюючих речовин сформовані від джерел на відстані, і ці джерела, ймовірно, є високими.

Аналіз усіх наявних даних, показав, що кожен пост характеризується власними локальними особливостями формування поля забруднення. Загальні закономірності впливу регіональних факторів не переважають впливу локальних умов. У свою чергу, для виконання тих чи інших прикладних задач, необхідно проводити детальну класифікацію постів. На сучасному етапі із 129 проаналізованих постів, від 12% до 22% постів (залежно від забруднюючої речовини) характеризуються переважаючим впливом одного із джерел (або групи джерел) викидів. Для пилу це 29 постів у 17 містах, для NO<sub>2</sub> – 16 постів у 14 містах, для CO – 16 постів у 12 містах, для SO<sub>2</sub> – 33 поста у 17 містах, для CH<sub>2</sub>O – 23 поста у 18 містах. Ці пости придатні для широкого кола досліджень. Інші пости – розташовуються у суттєво видозмінених умовах, де високі концентрації формуються від численних джерел викидів, і відображають виключно локальні умови. Тому дослідження на їх основі можуть бути проведені для вузького кола задач.



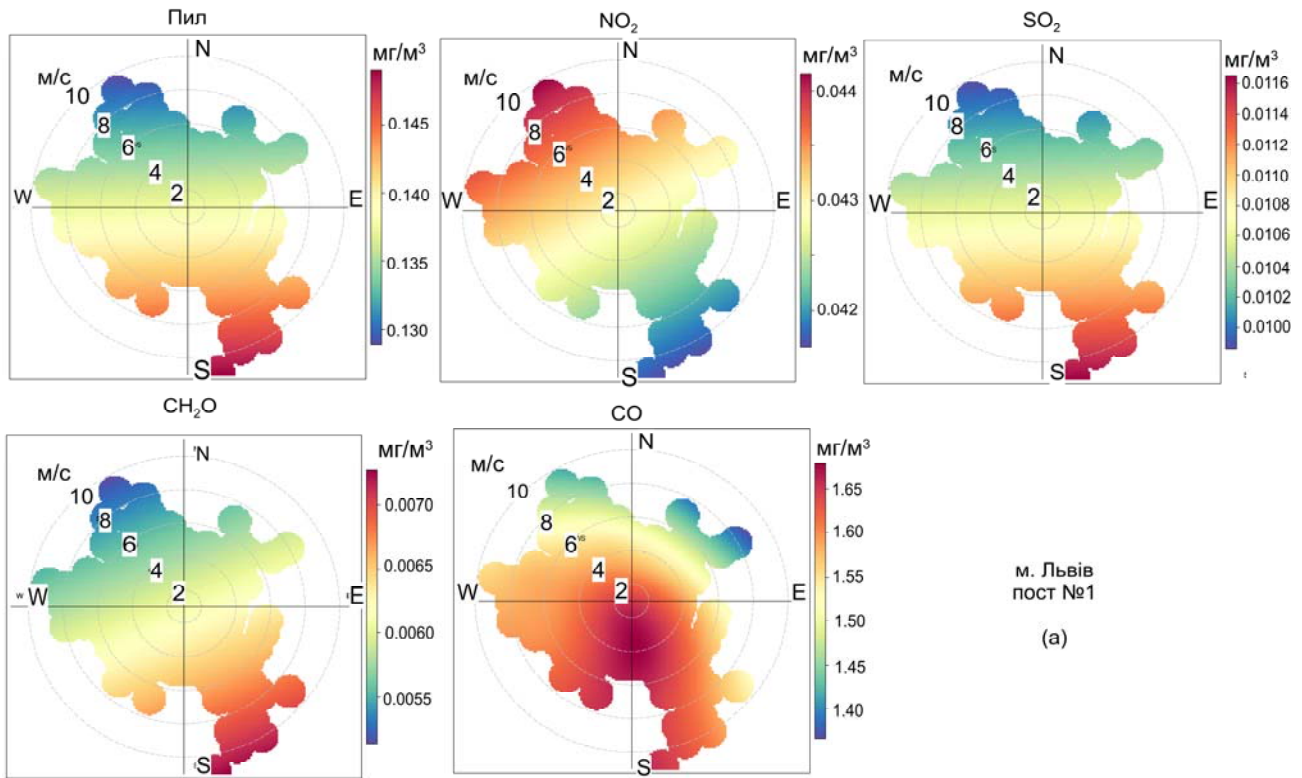


Рис. 16 - Залежність середнього вмісту пилу, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO та CH<sub>2</sub>O від напрямку та швидкості вітру у Львові, на посту №1 (а)

Fig. 16 - Dependencies of average concentration of dust, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and CH<sub>2</sub>O on wind speed and direction at monitoring site №1(a) in Lviv

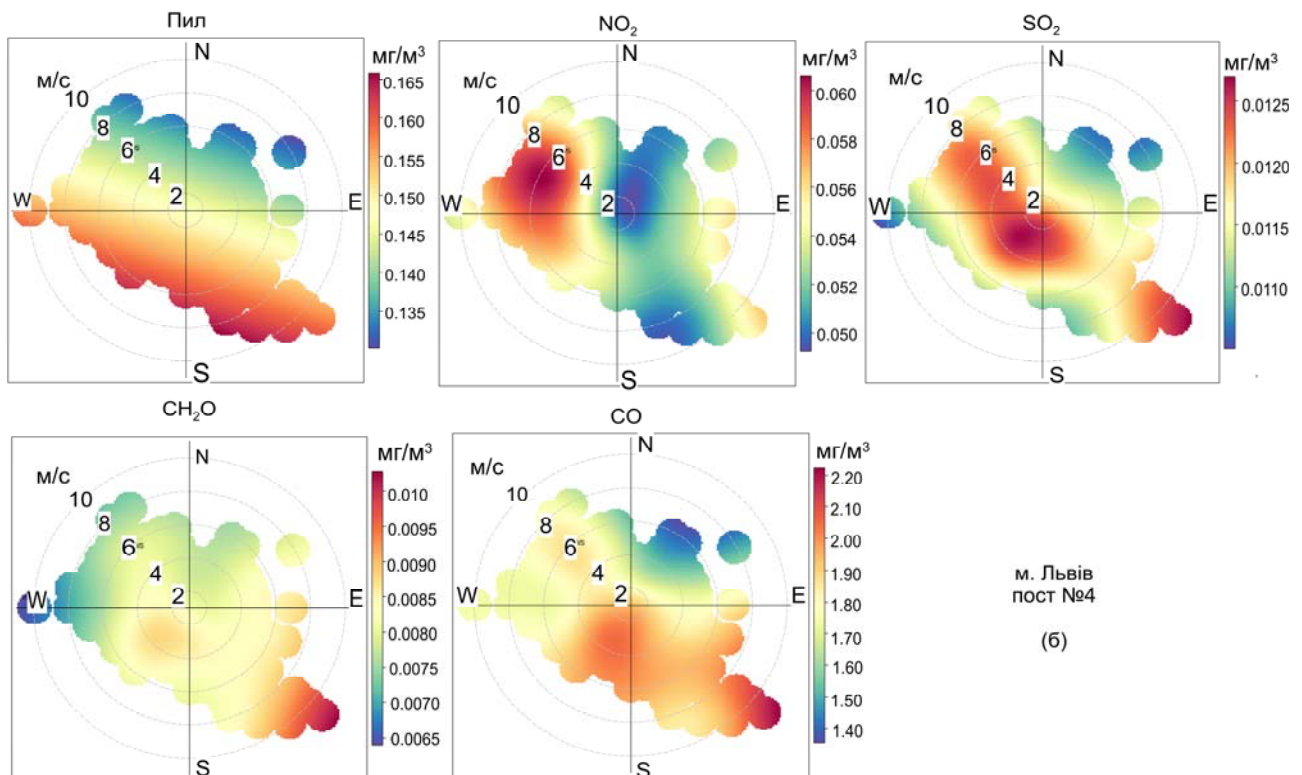


Рис. 16 – Продовження: на посту №4 (б)

Fig. 16 – Continued: at monitoring site №4 (b)

### 3.4 Обговорення

В останнє десятиріччя науковці, що досліджують забруднення атмосферного повітря в Україні стикаються із рядом проблем та викликів. У першу чергу дискретність вимірювань на постах моніторингу (4 строки на добу) обмежує встановлення закономірностей формування поля забруднення атмосферного повітря у містах, яке б дозволяло синхронізуватися з актуальними напрямками досліджень забруднення атмосферного повітря у світі. Громадські мережі моніторингу, дискретність вимірів яких дозволяє проводити більш розширений аналіз, характеризується власними обмеженими можливостями, що пов'язані із відсутністю еталонних станцій моніторингу для валідації й верифікації датчиків, як того вимагає ВМО [33]. Окремі науково-дослідні установи мають власні станції моніторингу, проте мова не йде про мережу спостережень. Поряд із проблемою дискретності накладаються проблеми точності методів забору проб, що досі використовуються, розташування постів спостережень, та інші проблеми на мережі. При цьому, просторове покриття вимірюваннями є вкрай лімітованим.

До проблем організації мережі спостережень за станом забруднення атмосферного повітря додаються й динамічні зміни урбанізованого середовища. Так, стрімке зростання автотранспорту та розвиток автошляхів призводить до проблем врахування викидів від транспорту та до появи нових автомобільних доріг поблизу постів спостережень. Ці особливості наголошувалися у попередніх дослідженнях різних авторів проведених в Україні [19,20,23]. Як показали результати досліджень у даній статті, все це посилює неузгодженість між інвентаризацією викидів та концентраціями забруднюючих речовин. У дослідженнях на території України наголошуються проблеми обмеженості набору забруднюючих речовин [18] та обмеженість інформації щодо навколишніх умов розташування постів спостережень [23]. Ці проблеми ускладнюють виявлення закономірностей формування забруднення специфічними домішками, узгодженням наземних даних із супутниковою інформацією та результатами моделювання. У представлених результатах показано, що умови формування поля забруднення поблизу постів спостережень часто є локальними, а відсутність детальнішої

інформації впливає на можливості пояснення виявлених закономірностей.

За наведених проблем із мережею спостережень, розташуванням постів та обмеженості технічної інформації, зростає залежність результатів від потенційного неправильного врахування метеорологічних умов. Моделювання проведене для умов території України [21,24] показує наскільки вагомий внесок можуть мати сприятливі синоптичні умови до накопичення домішок у приземному шарі, і наскільки прояв метеорологічних умов може мати «плямисту» структуру. Нами було показано, що в Україні метеорологічні умови по різному впливають на забруднення атмосферного повітря в різних частинах міста. І для цього надзвичайно важливо мати метеорологічну інформацію, виміряну безпосередньо на постах спостережень за забрудненням атмосферного повітря.

Наявність описаних проблем призводить до складності узагальнення стану якості атмосферного повітря та формування «базових» періодів, з якими можна проводити порівняння. Особливо гостро постала ця проблема з початком повномасштабного російського вторгнення, коли існує потреба у оцінці наслідків військових дій для забруднення атмосферного повітря. Проте, будь-які дані стають вкрай важливими за умов війни, адже кількість точок спостережень значно зменшуються через руйнування, неможливість проведення спостережень, та інших причин. Незважаючи на це, можливо відібрати такі характеристики забруднення атмосферного повітря напередодні війни, які б мали змогу бути використаними як базові для порівняння й розуміння наслідків військових дій. Серед можливих параметрів нами було обрано повторюваність перевищень гранично-допустимих максимально разових концентрацій та середній вміст забруднюючих речовин. Ці два показники разом дозволятимуть аналізувати наслідки руйнування / тимчасової зупинки промислових підприємств, та загальний вплив зміни автотранспорту на стан якості атмосферного повітря у містах. Обчислені тренди для викидів та концентрацій забруднюючих речовин дозволять оцінити наскільки визначальною стала війна в Україні на загальну динаміку забруднення атмосферного повітря. У майбутньому із урахуванням проблем передвоєнного стану, наслідків військових дій, та тенденцій післявоєнного розвитку України,

важливим буде встановлення оновленої мережі спостережень, яка б надала змогу ліквідувати переважну частину недоліків щодо дискретності, просторового розподілу постів спостережень, та ширшим набором забруднюючих речовин.

#### 4. ВИСНОВКИ

У роботі встановлено основні статистичні характеристики забруднення атмосферного повітря вмістом пилу, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> та CH<sub>2</sub>O на 126 постах спостережень напередодні повномасштабного російського вторгнення на територію України. Визначено, що якість атмосферного повітря у містах, зазвичай, зазнавала негативного впливу від однієї – двох основних домішок. Найчастіше це характерно для пилу, NO<sub>2</sub> та CO, в той час як вміст SO<sub>2</sub> зрідка досягає небезпечних рівнів (не більше 0.1% випадків перевищення граничних показників). Повторюваність перевищення максимально разових нормативних показників може досягати 15-33% для NO<sub>2</sub>, 20-50% для пилу, 30-35% для CO, 30-60% для CH<sub>2</sub>O переважно у містах із найбільш розвинутою промисловістю – Кривому Розі, Маріуполі, Кам'янському, Миколаєві, Дніпрі, Києві, Одесі, тощо. Середні концентрації забруднюючих речовин у цих містах на порядок перевищують значення в обласних центрах з менш розвинутою промисловістю для пилу й NO<sub>2</sub>, та в 3-5 рази для CO, SO<sub>2</sub> та CH<sub>2</sub>O.

В останні роки спостерігається неузгодженість у тенденціях між даними викидів та концентраціями забруднюючих речовин. Поряд із зменшенням викидів, спостерігається переважна відсутність змін, а часто і зростання концентрацій, що свідчить про неадекватність інвентаризацій викидів. Враховуючи, що більшість постів спостережень розташовані поблизу автошляхів, недостатнє врахування впливу викидів від автотранспорту може бути причиною сформованої неузгодженості. Для забруднюючих речовин в українських містах характерна слабо виражена сезонність, за винятком CH<sub>2</sub>O та пилу, для яких більш чітко простежується формування літніх максимумів у порівнянні із зимовими мінімумами.

Метеорологічні умови справляють значний вплив на формування поля забруднення атмосферного повітря. Значна повторюваність атмосферних явищ протягом холодного періоду року сприяє більш динамічним змінам концентрацій забруднюючих речовин у цей час. Поряд із загальними фізично-обґрунтованими

закономірностями впливу атмосферних явищ на вміст забруднюючих речовин, до 25% постів (залежно від забруднюючої речовини) характеризуються нетиповими залежностями, що свідчить про локальність умов формування поля забруднення поблизу існуючих постів спостережень. Аналіз вітрових характеристик показав, що формування високих та низьких концентрацій відрізняється для різних постів в межах одного міста, що також підтверджує визначальну роль локальних умов місцевості, де розташовані пости. Цей факт потрібно обов'язково враховувати при дослідженні зміни забруднення атмосферного повітря у майбутньому, для відокремлення причин пов'язаних зі зміною у розподілі джерел викидів від впливу метеорологічних умов.

Досліджений стан якості атмосферного повітря може бути використано як базовий для порівняння та оцінки наслідків воєнних дій в Україні на основі даних приземного вмісту забруднюючих речовин, що дозволить більш точно врахувати необхідні заходи під час післявоєнного відновлення інфраструктури та промисловості України. Отримані результати вказують на необхідність проведення та постійного оновлення опису навколишніх умов в яких розташовані пости спостережень в майбутньому під час удосконалення мережі спостережень за забрудненням атмосферного повітря. Зокрема, важливим є використання метеорологічних даних у точках відбору проб, а також наявність інформації про висоту та відстань до основних перешкод (забудова та рослинність), і опис найближчих низьких та усіх високі джерела викидів в межах міста.

#### ПОДЯКИ

Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи №9/21 «Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань» (2021–2023 рр., номер державної реєстрації 0121U109319). Автори висловлюють подяку працівникам Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського ДСНС України за надання вихідних даних для проведення досліджень.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban

- agglomeration / Wang Y. et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. P. 126822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822>
2. Zhou S., Lin R. Spatial-temporal heterogeneity of air pollution: The relationship between built environment and on-road PM<sub>2.5</sub> at micro scale. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 76. Pp. 305-322. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.004>
  3. Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999–2016) in Seoul, South Korea / Seo J. et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18. Pp. 16121–16137. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16121-2018>
  4. Comparison of Current and Future PM<sub>2.5</sub> Air Quality in China Under CIMP6 and DPEC Emission Scenarios / Cheng J. et al. *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, Is. 11. P. e2021GL093197. <https://doi.org/10.1029/2021GL093197>
  5. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions / Sokhi R. S. et al. *Environment International*. 2021. Vol. 157. P. 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>
  6. Інформація зі зведених результатів діяльності оперативного штабу, що діє на базі Держекоінспекції. Державна екологічна інспекція України. URL: <https://www.dei.gov.ua/posts/2226> (дата звернення: 11.01.2023).
  7. Шкода довкіллю України завдана російською збройною агресією. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://drive.google.com/file/d/11LFDr0sthMfdiqgH20QT4HIEp2z2GRoY/view> (дата звернення: 11.01.2023).
  8. Повітря війни. Чисте повітря для України. URL: <https://cleanair.org.ua/event/war-air-conference/> (дата звернення: 11.01.2023).
  9. Savenets M. Remotely visible atmospheric NO<sub>2</sub> changes in Ukraine due to the Ukrainian – Russian war using TROPOMI data. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University: Book of abstracts of International Conference, October 18–21, Kyiv, Ukraine, 2022*. P. 102.
  10. Yatsenko Y. Atmospheric diffusion of PM<sub>2.5</sub> as a result of a fire at an oil depot in Chernihiv. *XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, 15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine.
  11. War Impact on Air Quality in Ukraine / Zalakeviciute R. et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (21). Pp. 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
  12. Коршенко Ф. В. Распределение концентраций примесей в воздушном бассейне Киева. *Труды УкрНИИ Госкомгидромета*. 1980. Вып. 180. С. 106-110.
  13. Рыбченко А. А. О связи загрязнения воздуха с метеорологическими факторами по результатам наблюдения в отдельном пункте. *Труды УкрНИИ Госкомгидромета*. 1982. Вып. 188. С. 75-82.
  14. Хомяк Я. В., Гутаревич Ю. Ф., Скорченко В. Ф. Влияние дорожных условий на загрязнение придорожного приземного слоя воздуха автомобильным транспортом. *Вісник АН УССР*. 1980. №5. С.70-75.
  15. Кіптенко Є. М., Козленко Т. В. Прогнозування рівнів високого забруднення атмосферного повітря у містах України. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 288-298
  16. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України / Баштаннік М. П. та ін. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2014. Вип. 266. С.70-93
  17. Yatsenko Y., Shevchenko O., Snizhko S. Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*. 2018. Vol. 3 (82). Pp. 87-95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>
  18. Чугай А. В., Сафранов Т. А. Особливості забруднення атмосферного повітря міст Північно-Західного Причорномор'я. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2020. Вип. 52. С. 251-260. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-18>
  19. Шевченко О., Сніжко С., Данілова Н. Забруднення атмосферного повітря міста Києва двоокисом азоту. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. Вип. 16. С. 6-16. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.01>
  20. Air pollution of the largest cities in the Volyn region: preconditions, consequences and ways of solution of this problem / Melniichuk M et al. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*. 2022. Vol. 56. Pp. 214-224. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-16>
  21. Галицька Є., Данилевський В., Сніжко С. Динаміка аерозолів у атмосфері над Східною Європою за даними AERONET під впливом погодних умов протягом літа 2010. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. Вип. 17. С. 5-16. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.01>
  22. Influence of aerosols on atmospheric variables in the HARMONIE model / Palamarchuk I et al. *Atmospheric Research*. 2016. Vol. 169. Pp. 539-546. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.001>
  23. Comparison of TROPOMI NO<sub>2</sub>, CO, HCHO, and SO<sub>2</sub> data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine / Savenets et al. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29, Is.6. Pp. e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
  24. Enviro-HIRLAM model estimates of elevated black carbon pollution over Ukraine resulted from forest fires / Savenets et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22, Is. 24. Pp. 15777–15791. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15777-2022>
  25. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No.1203. 29 p.
  26. Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/timeline/Nacionalni-dopovidi-pro-stan-navkolishnogo-prirodno-go-seredovishcha-v-Ukraini.html> (дата звернення: 12.01.2023).
  27. Руководящий документ РД 52.04-186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Москва : Госкомгидромет СССР. 1991. 695 с.
  28. Elminir J. K. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of The Total Environment*. 2005. Vol. 350, Is. 1–3. Pp. 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
  29. Seinfeld J. H., Pandis S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd Edition. Wiley. 2016. 1152 p.
  30. Barrie L. A., Schemenauer R. S. Pollutant wet deposition mechanisms in precipitation and fog water. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1986. Vol. 30. Pp. 91–104. <https://doi.org/10.1007/BF00305178>
  31. Contribution of Fog in Changing Air Quality: Extremities and Risks to Environment and Society. *Extremes in Atmospheric Processes and Phenomenon: Assessment, Impacts and Mitigation. Disaster Resilience and Green Growth* / edited by: P. Saxena, A. Shukla, A. K. Gupta. Springer. Singapore, 2022. Pp. 87–111. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7727-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7727-4_5)
  32. Lakra K., Avishek K. A review on factors influencing fog



formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rend Lincei Sci Fis Nat.* 2022. Vol. 33(2). Pp. 319-353. <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>.

33. WMO. Statement on the low-cost sensors for atmospheric composition. URL: <https://community.wmo.int/meetings/statement-low-cost-sensors-atmospheric-composition> (Accessed: 25.01.2023).

## REFERENCES

- Wang, Y. et al. (2021). Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 298, p. 126822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126822>
- Zhou, S. & Lin, R. (2019). Spatial-temporal heterogeneity of air pollution: The relationship between built environment and on-road PM<sub>2.5</sub> at micro scale. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, pp. 305-322. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.004>
- Seo, J. et al. (2018). Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999–2016) in Seoul, South Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, pp. 16121–16137. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16121-2018>
- Cheng, J. et al. (2021). Comparison of Current and Future PM<sub>2.5</sub> Air Quality in China Under CMIP6 and DPEC Emission Scenarios. *Geophysical Research Letters*, 48(11), p. e2021GL093197. <https://doi.org/10.1029/2021GL093197>
- Sokhi, R.S. et al. (2021). A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions. *Environment International*, 157, p. 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>
- Informatsiia zi zvedenykh rezultativ diyalnosti operatyvnoho shtabu, shcho diye na bazi Derzhkoinspetsii. Derzhavna ekolohichna inspektsiia Ukrainy [Information from combined results on the activity of Operational Headquarters that is based on State Environmental Inspectorate. The State Environmental Inspectorate of Ukraine]. Available at <https://www.dei.gov.ua/posts/2226> (Accessed: 11.01.2023) (in Ukr).
- Shkoda dovkilliu Ukrainy zavdana rosiiskoiu zbroynoiu ahresieiu. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [A damage to environment caused by Russian military invasion in Ukraine. The Ministry of environment and natural resources of Ukraine]. Available at: <https://drive.google.com/file/d/11LFDr0sthMfdiqgH20QT4HIEp2z2GRoY/view> (Accessed: 11.01.2023). (In Ukr.)
- Povitria viiny. Chyste dovkillia dlia Ukrainy [The air of war. Clean environment for Ukraine]. Available at: <https://cleanair.org.ua/event/war-air-conference/> (Accessed: 11.01.2023). (in Ukr.)
- Savenets, M. (2022) Remotely visible atmospheric NO<sub>2</sub> changes in Ukraine due to the Ukrainian – Russian war using TROPOMI data. Book of abstracts of International Conference: *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*, October 18–21, Kyiv, Ukraine, p. 102.
- Yatsenko, Y. (2022). Atmospheric diffusion of PM<sub>2.5</sub> as a result of a fire at an oil depot in Chernihiv. XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 15–18 November, Kyiv, Ukraine.
- Zalakeviciute, R. et al. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, 14(21), p. 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>.
- Korshenko, F.V. (1980). Raspredeleniye kontsentratsiy primesey v vozdushnom bassejne Kiyeva [The distribution of pollutants' concentrations in the atmospheric air in Kyiv]. *Trudy UkrNIGMI [The papers of UkrNIGMI]*, 180, pp. 106-110. (in Russ.)
- Rybchenko, A.A. (1982). O svyazi zagriazneniya vozduha s meteorologicheskimi faktorami po rezultatam nabliudeniya v otdel'nom punkte [Towards a relationship between air pollution and meteorological factors at a certain point]. *Trudy UkrNIGMI [The papers of UkrNIGMI]*, 188, pp. 75-82. (in Russ.)
- Homiak, Ya.V., Gutarevich, Yu.F. & Skorchenko, V.F. (1980). Vplyv dorozhnikh umov na zabrudnennia navkolyshnioho seredovyscha avtomobil'nym transportom [The impact of road conditions on environmental pollution by mobile transport]. *Visnyk AN USSR [Visnyk AN USSR]*, 5, pp.70-75. (in Ukr.)
- Kiptenko, Y.,M. & Kozlenko, T.V. (2002). Prohnozuvannia rivniv vysokoho zabrudnennia atmofernoho povitria u mistakh Ukrainy [The prediction of high atmospheric air pollution levels in Ukrainian cities]. *Naukova pratsi UkrNDGMI [Scientific papers of UkrNDGMI]*, 250, pp. 288-298. (in Ukr.)
- Bashtannik, M.P. et al. (2014). Stan zabrudnennia atmofernoho povitria na terytorii Ukrainy [Air pollution state on the territory of Ukraine]. *Naukova pratsi UkrNDGMI [Scientific papers of UkrNDGMI]*, 266, pp. 70-93 (in Ukr.)
- Yatsenko, Y., Shevchenko, O. & Snizhko, S. (2018). [Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(82). pp. 87-95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11> (in Ukr.)
- Chugai, A.V. & Safranov, T.A. (2020). [Features of air pollution the cities of the North-Western Black Sea region]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”*, 52, pp. 251-260. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-18> (in Ukr.)
- Shevchenko, O., Snizhko, S., & Danilova, N. (2015). [Air pollution by nitrogen dioxide in Kiev city]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 16, pp. 6-16. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.01> (in Ukr.)
- Melniichuk, M. et al. (2022). Air pollution of the largest cities in the Volyn region: preconditions, consequences and ways of solution of this problem. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*, 56, pp. 214-224. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-16>
- Galytska, E., Danylevsky, V. & Snizhko, S. (2016). [Aerosols dynamics in the atmosphere over Eastern Europe by means of AERONET according to weather conditions during summer 2010]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 17, pp. 5-16. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.01> (in Ukr.)
- Palamarchuk, I. et al. (2016) Influence of aerosols on atmospheric variables in the HARMONIE model. *Atmospheric Research*, 169, pp. 539-546. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.001>
- Savenets, M. et al. (2022). Comparison of TROPOMI NO<sub>2</sub>, CO, HCHO, and SO<sub>2</sub> data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29 (6), pp. e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
- Savenets, M. et al. (2022). Enviro-HIRLAM model estimates of elevated black carbon pollution over Ukraine resulted from forest fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (24), pp. 15777–15791. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15777-2022>



25. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No.1203.
26. Natsionalni dopovidi pro stan navkolishnioho pryrodnoho seredovishcha v Ukraini. Ministerstvo zahystu dokillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [National reports about environmental state in Ukraine. The Ministry of environment and natural resources of Ukraine] Available at: <https://mepr.gov.ua/timeline/Nacionalni-dopovidi-pro-stan-navkolishnogo-prirodnogo-seredovishcha-v-Ukraini.html> (Accessed: 12.01.2023) (in Ukr.)
27. Rukovodyashchiiy document RD 52.04-186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Guidance document RD 52.04-186-89. Guidance on atmospheric air pollution control]. Goskomhidromet USSR, 1991 (in Russ.)
28. Elminir, J.K. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of The Total Environment*, 350 (1–3), pp. 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
29. Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd Edition. Wiley.
30. Barrie, L.A. & Schemenauer, R.S. (1986). Pollutant wet deposition mechanisms in precipitation and fog water. *Water, Air, and Soil Pollution*, 30, pp. 91–104. <https://doi.org/10.1007/BF00305178>
31. Saxena, P., Shukla, A. & Gupta, A.K. (eds) (2022) Contribution of Fog in Changing Air Quality: Extremities and Risks to Environment and Society. In *Extremes in Atmospheric Processes and Phenomenon: Assessment, Impacts and Mitigation. Disaster Resilience and Green Growth*. Springer, pp. 87–111. Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7727-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7727-4_5)
32. Lakra, K., & Avishek, K. (2022). A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rend Lincei Sci Fis Nat*, 33 (2), pp. 319-353. <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>.
33. WMO. *Statement on the low-cost sensors for atmospheric composition*. Available at: <https://community.wmo.int/meetings/statement-low-cost-sensors-atmospheric-composition> (Accessed: 25.01.2023).

## STATUS OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE PRIOR TO THE FULL-SCALE RUSSIAN INVASION. PART 1: GROUND-LEVEL CONTENT OF POLLUTANTS

M. V. Savenets, I. V. Dvoretzka, T. V. Kozlenko, K. M. Komisar, A. P. Umanets, N. S. Zhemera

*Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and  
the National Academy of Sciences of Ukraine,  
37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine, [savenets@uhmi.org.ua](mailto:savenets@uhmi.org.ua)*

The paper is dedicated to examination of atmospheric air pollution in Ukraine that is aimed at establishing basic air quality conditions prior to the full-scale Russian invasion. Analyses cover five air pollutants (dust, sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), and formaldehyde (CH<sub>2</sub>O)) across 126 monitoring stations in 39 cities. It was found that the most dangerous excess of air pollution levels in cities was associated with dust, NO<sub>2</sub>, and CO. At the same time, SO<sub>2</sub> content usually did not reach dangerous levels. The highest frequency of exceeding the threshold one-time levels was common for the cities with well-developed industrial facilities. Dangerous air pollution was observed in 15–60% of cases, depending on a pollutant. Dust and NO<sub>2</sub> concentrations of the most polluted cities were 10 times higher than their concentrations in smaller cities having no significant industrial emissions. The difference in average CO, SO<sub>2</sub>, and CH<sub>2</sub>O concentrations among monitoring stations constituted 3–5 times. We studied the patterns of pollutants' seasonal variability recorded at the monitoring stations. Normally, no significant seasonality except for CH<sub>2</sub>O and dust was observed. The interannual variability of pollutants, emissions, and their trends were analyzed for the period since 2008. We identified a certain discrepancy in trends between pollutants' concentrations and emission data over the last years. Pollutant content often continued to grow concurrently with emission reductions. The impact of atmospheric phenomena and wind parameters was studied mainly in terms of its role in formation of high and low atmospheric pollution levels. The analysis indicated a crucial role of local conditions in the formation of an atmospheric pollution field next to monitoring stations. Varying atmospheric pollution values across different monitoring stations within a specific city can be different even under the influence of the same atmospheric phenomena. The wind impact also formed different patterns of atmospheric pollution within same city. 12% to 22% of all monitoring stations (depending on a pollutant) indicated a prevailing impact of a single emission source (or a combined impact of a group of sources). At the same time, air pollution at other monitoring stations was highly variable, with elevated pollution levels being transported from numerous directions. The analysis of the air pollution-affected condition presented in the paper could be used as a basis for comparing ground-level pollution and assessing the warfare consequences in Ukraine. The research emphasizes the importance of updating the information about ground-based monitoring stations.

**Keywords:** monitoring stations; pollutants; concentrations; emissions; atmospheric air.

Подання до редакції : 01. 02. 2023  
Надходження остаточної версії : 27. 02. 2023  
Публікація статті : 29. 06. 2023