

# МОНІТОРИНГ І ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

**Л.М. Надточій**

ORCID: 0000-0003-3038-5960  
onoslyuda@uhmi.org.ua

**Н.С. Жемера**

ORCID: 0009-0001-9350-4915  
zemerda@ukr.net

**М.В. Савенець**

ORCID: 0000-0001-9429-6209  
savenets@uhmi.org.ua

Український гідрометеоро-  
логічний інститут  
ДСНС України та НАН України,  
Київ, Україна

УДК 551.510.42

DOI: <https://doi.org/ua/10.15407/Meteorology2025.08.114>

## ЗМІНИ СТАТИСТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ТА ВАРІАТИВНОСТІ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ УРБАНІЗОВАНИХ РАЙОНІВ ВНАСЛІДОК ПОВНОМАСШТАБНОГО РОСІЙСЬКОГО ВТОРГНЕННЯ

Повномасштабне російське вторгнення призвело до численних змін стану атмосферного повітря. Наявність оцінок усереднених змін вмісту забруднюючих речовин часто не дозволяє ідентифікувати характерні наслідки воєнних дій через накладання протилежних за впливом факторів. У даній статті на основі супутникових спостережень Sentinel-5 Precursor за 2019–2024 рр. проведено аналіз статистичної структури та варіативності загального вмісту діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ) та формальдегіду ( $\text{HCHO}$ ) в атмосферному повітрі урбанізованих районів. За три роки війни встановлено переважне зменшення вмісту  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ , зростання  $\text{SO}_2$ , та різні зміни  $\text{HCHO}$ , що відображають як наслідок руйнування промисловості, так і появу додаткової емісії через перехід на менш екологічні типи палива та роботу дизель-генераторів. На фоні зміни середніх показників, статистична структура розподілу значень залишилася без суттєвих змін для  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ , проте із незначним зростанням повторюваності додаткових відхилень  $\text{CO}$  в інтервалі до  $+1\sigma$ . Вміст  $\text{SO}_2$  зазнав зменшення повторюваності додаткових і від'ємних відхилень, що чітко вказує на зменшення варіативності в атмосфері.  $\text{HCHO}$  став менш варіативним у діапазоні значних відхилень від середнього з більшою повторюваністю незначних варіацій близьких до середніх значень. Отримані результати доповнюють простежувані зміни загального вмісту забруднюючих речовин у містах за час повномасштабного російського вторгнення, що є важливим для фіксації наслідків воєнних дій в умовах накладання різних за впливом факторів.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери, діоксид азоту, монооксид вуглецю, діоксид сірки, формальдегід, статистичний розподіл

### ВСТУП

Повномасштабне російське вторгнення на територію України стало найбільш руйнівною війною на території Європи з часів Другої світової з огляду на наявні руйнування, економічні та соціальні наслідки (Liadze et al., 2023; Scher and van den Hoek, 2025). Довкілля також опинилося під катастрофічним впливом воєнних дій, і вже зараз виявлені та проаналізовані наслідки для усіх його компонентів, включаючи внутрішні та морські води (Jiang et al. 2025; Shumilova et al. 2023), ґрунти (Filho et al., 2024), атмосферне повітря (Malyska et al., 2024; Savenets et al., 2023) та біорізноманіття (Gallo-Cajiao et al., 2023).

Атмосферне повітря через свою динамічну природу є однією із найважливіших для аналізу компонент

екосистем з метою виявлення наслідків воєнних дій. Складність фіксації наслідків пов'язана з двома причинами. Перша — недостатнє покриття наземного моніторингу через загалом недостатньо щільну мережу спостережень за забрудненням атмосферного повітря та руйнування інфраструктури у безпосередній близькості до лінії фронту. Друга — наявність лише полярно-орбітальних супутників, які надають інформацію про хімічні складові атмосферного повітря один раз на добу. До відносно епізодичних супутникових спостережень додається ще й вплив хмарності, коли отримання показників стає взагалі неможливим. Ці два фактори призводять до того, що переважна кількість наслідків воєнних дій для атмосферного повітря не може бути зафіксованою.

Найперші зміни, які вдалося виявити у початковій місяці повномасштабного вторгнення, здійснені виключно на даних супутникових спостережень (Radomska et al., 2023; Zalakeviciute et al. 2022; Zhang et al. 2023), і переважно аналіз стосувався діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) як найбільш надійного індикатора. Через деякий час з'явилися перші узагальнення наслідків, що охоплювали періоди до 1–2 років повномасштабного вторгнення, зокрема у працях Davybida (2023), Ialongo et al., (2023), Jiadan et al., (2023); Malytska et al., (2024); Phan and Fukui, (2024) Savenets et al., (2023). Тоді ж стало зрозумілим, що найголовнішим наслідком повномасштабного вторгнення для атмосферного повітря стало зростання повторюваності високих концентрацій одразу після ракетних ударів на фоні загального зменшення викидів, зумовлених руйнуванням промислових підприємств та зменшення кількості автотранспорту у містах із наближенням до лінії фронту. Розширилася і розгляд забруднюючих речовин, зокрема охопленням монооксиду вуглецю (CO), аерозолів, непрямо відновлених даних твердих часток й приземного озону (Jiadan et al. 2023; Malytska et al., 2024; Meng et al., 2023; Savenets et al., 2023), а також парникових газів (Bun et al., 2024).

Незважаючи на наявні оцінки середніх змін, вплив воєнних дій не завжди можна ідентифікувати лише за цими показниками. Як приклад, часто спостерігається накладання протилежних за впливом чинників. Наприклад, можуть зростати пожежі в екосистемах внаслідок обстрілів (особливо поблизу лінії фронту), що зумовлюють збільшення викидів забруднюючих речовин. При цьому, наслідком руйнування промислових підприємств є зменшення викидів. На ці різносторонні ефекти накладаються зростання викидів від використання дизель-генераторів та перехід на менш екологічні види палива, проте зменшення викидів від автотранспорту. При цьому це все може відбуватися у межах одного міста чи промислового кластеру. Як наслідок, часто оцінка середніх змін без аналізу загальної статистичної варіативності не дозволяє чітко осягнути наслідки воєнних дій для забруднення атмосферного повітря.

З урахуванням недостатньої уваги до варіативності забруднюючих речовин, **метою даної роботи** є встановлення закономірностей зміни статистичної структури та варіативності загального вмісту забруднюючих речовин в атмосфері над містами та великими теплоелектростанціями (ТЕС). Це дозволить виявити ті інтервали у загальному розподілі забруднення, які зазнають найсуттєвіших змін та зможуть доповнити аналіз змін середніх значень.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводились на основі даних супутникових спостережень приладом TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) супутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) завантажені із Copernicus Data Space Ecosystem (<https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-5p>, дата звернення: 23.09.2025). Охоплено два періоди: 1 січня 2019 року – 31 грудня 2021 року (як базовий період до повномасштабного вторгнення) та 24 лютого 2022 року – 31 грудня 2024 року (як період після повномасштабного вторгнення). Аналіз здійснено для діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>) та формальдегіду (HCHO).

Для проведення аналізу початкові супутникові дані другого рівня архівації (англ.: Level-2) завантажені як продукти режиму офлайн (англ.: offline (OFFL)) у оригінальній просторовій роздільній здатності 3,5×5,5 км було перераховано у регулярну сітку координат з кроком 0,1°×0,1°. Це дозволило створити часові ряди і порівнювати дані над однаковими комірками. Фільтрування вихідних даних здійснено із індексом якості даних (англ.: quality assurance value) на рівні 0.75.

У межах дослідження проаналізовано дані для 32 міст, серед яких — усі обласні центри України, включно з тимчасово окупованими територіями, 7 інших промислових міст, а також 8 потужних теплових електростанцій (ТЕС), розташованих на території України поза великими містами (для можливості ідентифікувати ТЕС як єдине потужне джерело викидів). Для подальшого аналізу всі міста були класифіковані на групи. Класифікація об'єктів дослідження (міст та ТЕС) здійснена на основі просторової близькості до зони бойових дій, інтенсивності обстрілів, а також адміністративних та енергетичних характеристик. Усього виокремлено шість груп:

Група 1 — міста, що впродовж повномасштабної війни зазнали найменшого безпосереднього впливу з боку бойових дій. До цієї категорії віднесено населені пункти, які не перебували під окупацією та не зазнавали систематичних обстрілів (Вінниця, Житомир, Івано-Франківськ, Луцьк, Львів, Рівне, Тернопіль, Чернівці, Хмельницький, Ужгород).

Група 2 — міста, в яких зафіксовано епізодичні випадки обстрілів, але загальна інтенсивність воєнного впливу є нижчою порівняно з групою 3. Сюди належать: Кропивницький, Полтава, Горішні Плавні, Черкаси, Чернігів.

Група 3 — міста, що регулярно зазнають обстрілів із боку російських військ, попри те, що безпосе-

редньо не прилягають до лінії фронту. До цієї групи включено: Дніпро, Київ, Кривий Ріг, Кам'янське.

Група 4 — населені пункти, розташовані в безпосередній близькості до зони активних бойових дій, що зумовлює високий рівень загроз для мирного населення та інфраструктури. До цієї групи віднесено: Запоріжжя, Миколаїв, Одеса, Суми, Харків, Херсон, Слов'янськ, Краматорськ.

Група 5 — тимчасово окуповані міста України, що протягом значного часу перебувають під контролем збройних сил російської федерації. До цієї категорії належать: Донецьк, Луганськ, Енергодар, Маріуполь, Сімферополь.

Група 6 — теплові електростанції України, які становлять критичну енергетичну інфраструктуру та є важливими об'єктами для аналізу в контексті впливу воєнних дій на атмосферне забруднення повітря. До цієї групи входять: Зміївська ТЕС, Вуглегірська ТЕС, Бурштинська ТЕС, Добротвірська ТЕС, Ладжинська ТЕС, Старобешівська ТЕС, Трипільська ТЕС, Курахівська ТЕС.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### 1. Зміни загального вмісту забруднюючих речовин над містами

Аналіз вмісту  $\text{NO}_2$  у період, що передував повномасштабному вторгненню, дав змогу сформулювати уявлення про типовий базовий стан якості атмосферного повітря на території України. Середні значення вмісту  $\text{NO}_2$  у досліджуваній період коливалися в межах від  $2,9\text{--}3,2 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (для таких міст, як Сімферополь, Херсон, Миколаїв) до  $6,4\text{--}6,8 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Краматорськ, Донецьк, Київ, Вуглегірська ТЕС, Старобешівська ТЕС, Курахівська ТЕС). Найвищі концентрації спостерігалися у великих містах та у районах розміщення потужних теплових електростанцій, що свідчить про їх значний внесок у загальне антропогенне навантаження на атмосферне повітря.

Середній вміст  $\text{CO}$  варіювався в діапазоні від  $0,327$  моль/м<sup>3</sup> (Сімферополь) до  $0,362$  моль/м<sup>3</sup> (Маріуполь). У більшості досліджуваних міст концентрації  $\text{CO}$  перебували в межах  $0,332\text{--}0,345$  моль/м<sup>3</sup>, що вказує на відносно однорідний розподіл через довгий час існування  $\text{CO}$  в атмосферному повітрі. Загальний вміст  $\text{SO}_2$  змінювався в широкому діапазоні — від  $7,7 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Одеса) до  $4,7\text{--}4,8 \times 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> у районах розташування найбільших теплових електростанцій: Вуглегірської ТЕС, Старобешівської ТЕС та Курахівської ТЕС, що чітко відображає внесок великих енергогенеруючих підприємств у загальний рівень забруднення атмосферного повітря. Середній вміст  $\text{НСНО}$  коливався в межах від  $6,3 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Тернопіль) до

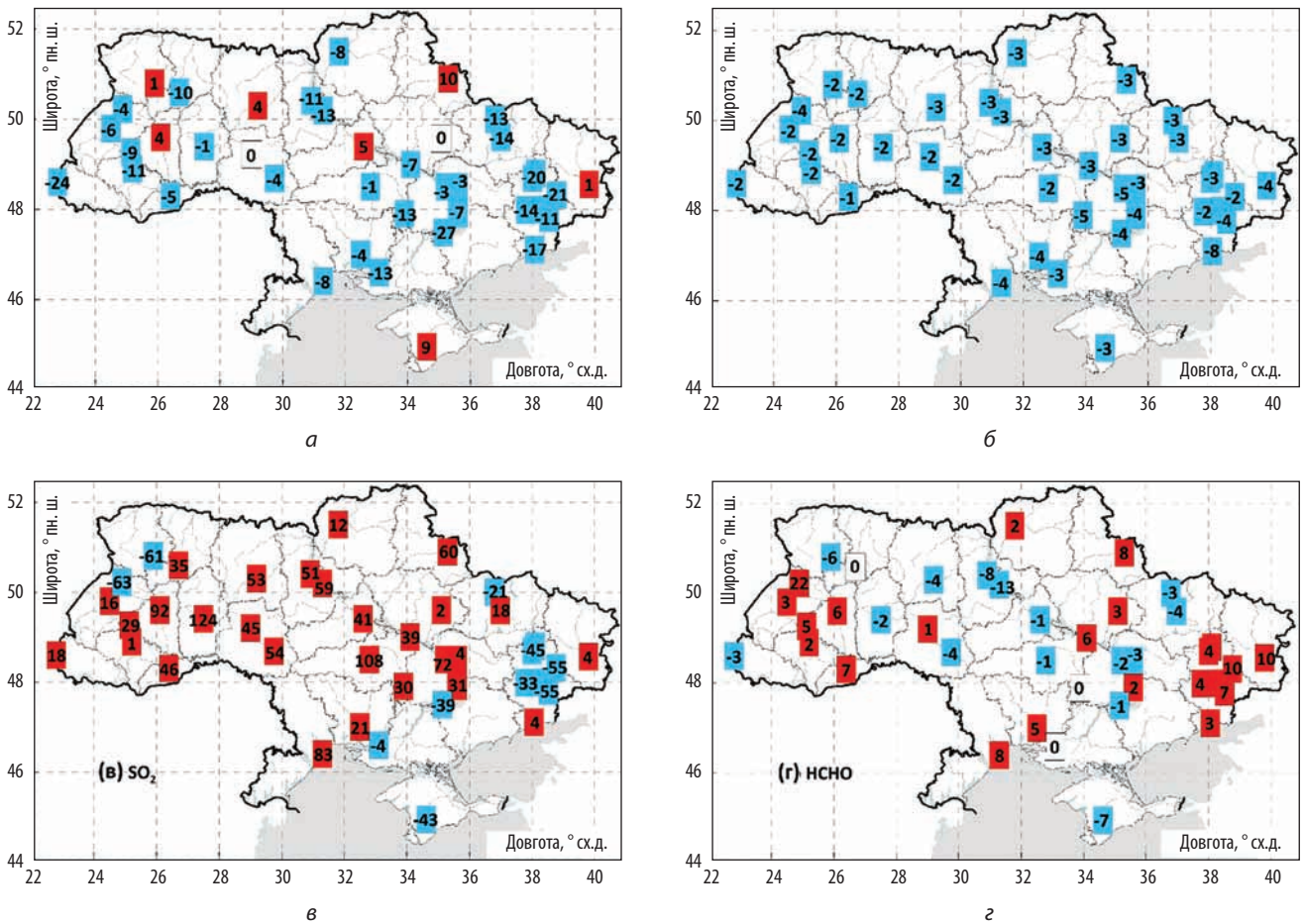
$9,1\text{--}9,4 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (міста Сімферополь, Херсон, Енергодар).

Після повномасштабного вторгнення, загальний просторовий розподіл вмісту забруднюючих речовин дещо змінився. Тепер серед досліджуваних міст, середній вміст  $\text{NO}_2$  коливався у межах від  $2,8\text{--}2,9 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Херсон, Миколаїв) до  $5,9\text{--}6,0 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (м. Донецьк, м. Київ, район розташування Старобешівської ТЕС). Вміст  $\text{CO}$  у повітрі становив від  $0,318$  моль/м<sup>3</sup> (Сімферополь) до  $0,339\text{--}0,340$  моль/м<sup>3</sup> (Запоріжжя, Енергодар, Дніпро). Загальний вміст  $\text{SO}_2$  варіювався у межах від  $5,8 \times 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> (Сімферополь) до  $3,8\text{--}3,9 \times 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup> (Івано-Франківськ, Бурштинська ТЕС), тоді як для  $\text{НСНО}$  становив від  $6,8\text{--}6,9 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Луцьк, Тернопіль) до  $9,6 \times 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> (Одеса).

Для розуміння просторових змін середнього вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, було проаналізовано відносні зміни показників за час повномасштабного вторгнення у 2022–2024 рр. відносно періоду 2019–2021 (рис. 1). Загалом, зміна середніх значень забруднюючих речовин в урбанізованих районах за час повномасштабного вторгнення показала переважне зменшення вмісту  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ , переважне зростання  $\text{SO}_2$ , та відсутність однонаправлених змін  $\text{НСНО}$ .

В умовах роботи з даними супутникового зондування,  $\text{NO}_2$  є найточнішим показником, що використовується у практиці як основний індикатор зміни стану якості атмосферного повітря. Вже типовим і наголошеним у попередніх дослідженнях наслідком повномасштабного вторгнення стало зменшення вмісту  $\text{NO}_2$  до 25% з найбільш інтенсивними змінами у Києві, Харкові, містах поблизу лінії фронту та найбільш віддаленому від воєнних дій Ужгороді (рис. 1а). Зменшення  $\text{NO}_2$  відображає чіткий наслідок руйнування промислових підприємств, а у прифронтових міст — ще й зменшення викидів від автотранспорту. На цьому фоні виникають питання щодо інтенсивного зменшення  $\text{NO}_2$  в Ужгороді, де ймовірніше за все має місце фактор не пов'язаний із воєнними діями. Незначне зростання  $\text{NO}_2$  спостерігалось у окупованих Луганську та Сімферополі, у Черкасах, Житомирі, Хмельницькому, Луцьку, та, найінтенсивніше у Сумах. Зростання вмісту  $\text{NO}_2$  у Сумах ймовірно пов'язане зі зростанням надходження азотистих сполук спричинених постійними обстрілами відповідної промисловості, проте наразі без наявних даних по обстрілам та актуальним викидам, точні причини встановити неможливо.

Відомою зміною загального вмісту  $\text{CO}$ , не пов'язаною із воєнними діями, є регіональне зменшення вмісту на 2–5%, що відображається і на основі даних



**Рис. 1.** Відсоткова зміна загального вмісту NO<sub>2</sub> (а), СО (б), SO<sub>2</sub> (в) та НСНО (г) в атмосферному повітрі над досліджуваними містами за 2022–2024 рр. відносно 2019–2021 рр. Колір відображає тенденцію змін до зростання (червоний) чи зменшення (блакитний) вмісту забруднюючих речовин

для урбанізованих районів (рис. 1б). Серед усіх міст чіткий воєнно-обумовлений наслідок прослідковується лише для Маріуполя (≈8%), де було знищено одне із найпотужніших підприємств — “Азовсталь”. Ця зміна СО чітко вирізняється на загальному фоні, особливо враховуючи відносно довгий час існування домішки в атмосфері та його однорідний розподіл.

Загальний вміст SO<sub>2</sub> за даними супутникових спостережень є досить складним для аналізу через низьку точність відновлення даних зондування щодо цього показника. Незважаючи на значні похибки, середня зміна вмісту SO<sub>2</sub> за час повномасштабного вторгнення є досить однорідною та вказує на значне зростання надходження викидів в урбанізованих районів (рис. 1в). При цьому SO<sub>2</sub> надходить у результаті використання більш брудного палива на підприємстві та внаслідок роботи дизель-генераторів. У той же час розраховані зміни, найбільші з яких перевищують 100%, малоімовірно що відображають реальні кількісні зміни, а є наслідком накопичення похибок. Тому, SO<sub>2</sub> варто

аналізувати лише за допомогою якісного аналізу, тобто визначення загальних тенденцій до зростання чи зменшення концентрацій. Варто відзначити регіональне зменшення вмісту SO<sub>2</sub> на переважній частині Донецької області в межах від –33% до –55%. Також зафіксоване зменшення вмісту в Енергодарі, Херсоні, Харкові та Сімферополі. А на заході території України — у Луцьку та над Добро-твірською ТЕС.

НСНО характеризується найбільш просторово різноманітними змінами серед досліджуваних забруднюючих речовин (рис. 1г). Попри виражену локальну структуру змін, прослідковується три регіональні особливості. Перша — це зростання вмісту НСНО над територією Донбасу на 4–10%. Друга — це зростання у Передкарпатському регіоні, що складає від 2% до 7%, і найбільш інтенсивним зростанням над Добро-твірською ТЕС на 22%. У той же час, північна та центральна частина Правобережної України характеризується зменшенням НСНО максимально до -13% над Трипільською ТЕС.

## 2. Зміни статистичного розподілу загального вмісту забруднюючих речовин

Аналіз загального вмісту  $\text{NO}_2$  показав переважачу тенденцію до зниження середніх значень в усіх досліджуваних групах міст, зокрема для групи 1 зменшення складає до 24%, групи 2 — до 8%, групи 3 — до 13%, групи 4 — до 20%, групи 5 — до 27%, та групи 6 — до 21% (рис. 1). Незважаючи на зниження середнього вмісту  $\text{NO}_2$ , закономірності статистичного розподілу переважно залишилися без змін (див. рис. 2). Це вказує на те, що в умовах загального зменшення вмісту  $\text{NO}_2$ , без змін залишилися закономірності формування їх варіацій. Тобто, повномасштабне російське вторгнення призвело до

зменшення кількості викидів (залежно від міст — це автотранспорт, промислові викиди або їх сукупний вплив), проте механізм надходження, циклічність викидів та роль метеорологічних умов у більшості міст залишилися сталими для  $\text{NO}_2$ .

Для деяких міст існують винятки у закономірності формування розподілу  $\text{NO}_2$  в атмосфері, зокрема для міст Ужгород, Херсон, Маріуполь та Енергодар (рис. 3). І хоча ці міста є винятками, проте закономірність із початком повномасштабного вторгнення прослідковується подібна — це зростання варіативності вмісту  $\text{NO}_2$ , що відображається у більшій “плосковершинності” статистичного розподілу та зростанні повторюваності значень, що

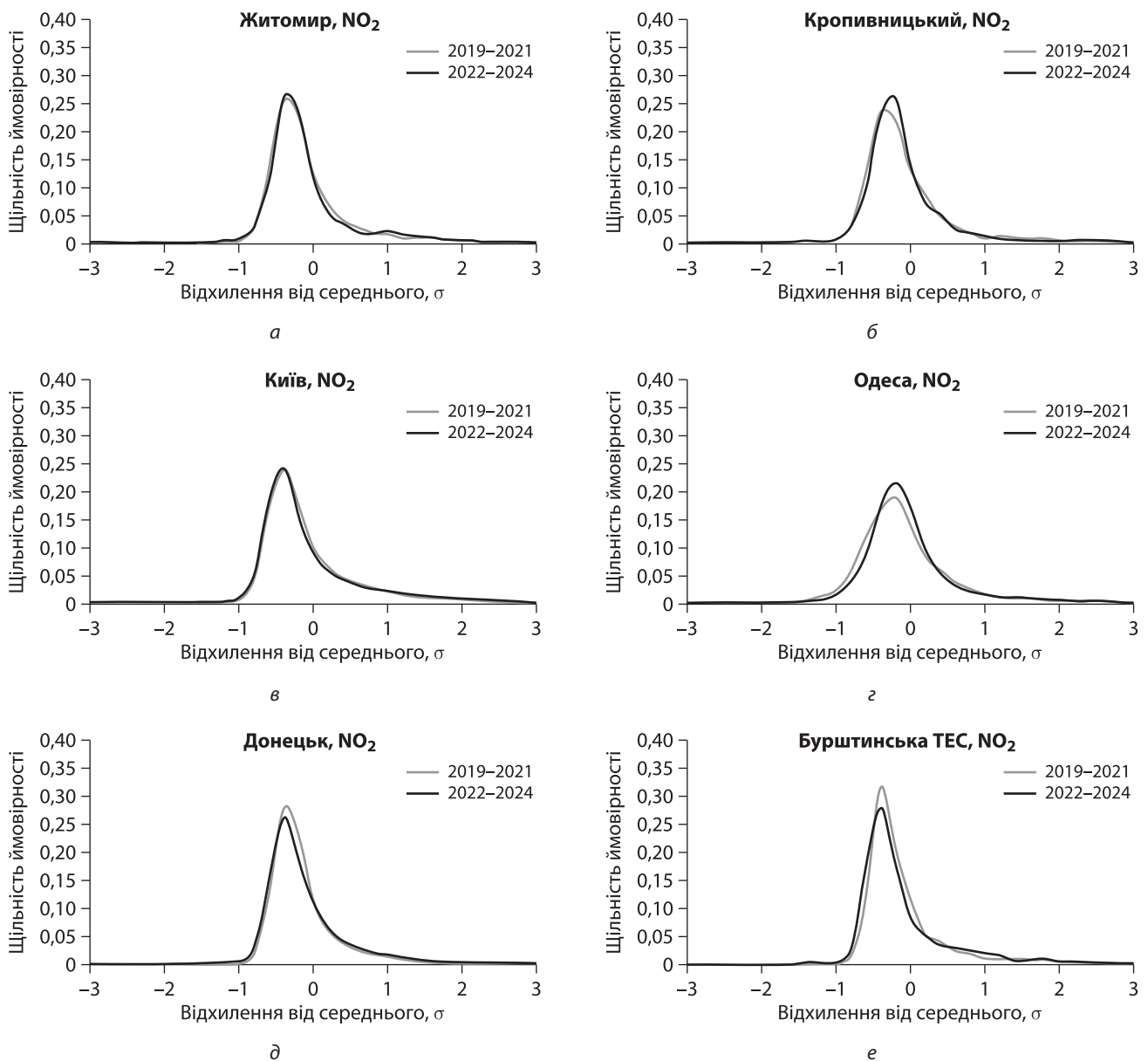
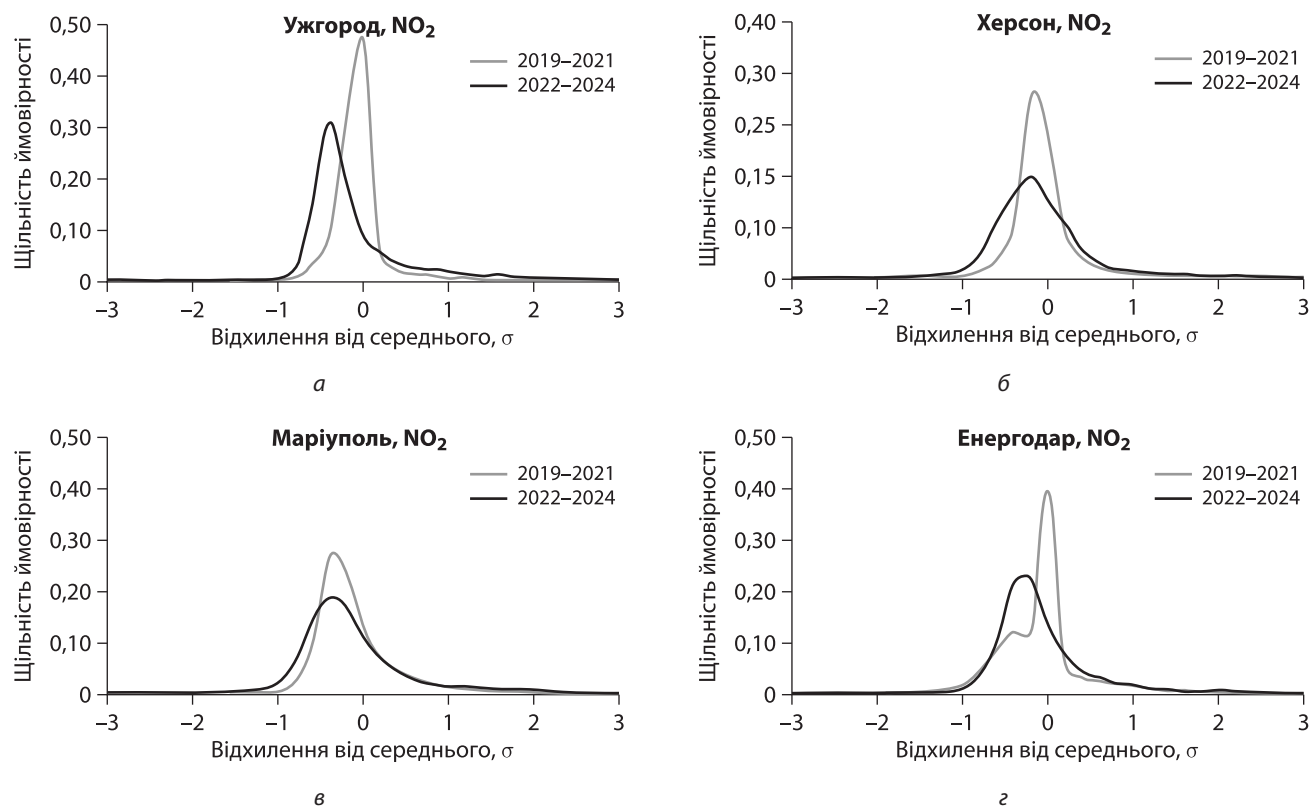


Рис. 2. Найтипівший характер статистичного розподілу загального вмісту  $\text{NO}_2$ , властивий для кожної із шести проаналізованих груп міст/ТЕС



**Рис. 3.** Нетипові зміни статистичного розподілу загального вмісту  $\text{NO}_2$  у містах

лежать в межах відхилень від середнього від  $-0.5\sigma$  до  $-1\sigma$ .

Серед вказаних міст — найбільш нетиповим є зміна у формуванні  $\text{NO}_2$  в Ужгороді, адже серед усіх досліджуваних міст він розташовується найдалі від лінії фронту і зазнав чи не найменшого впливу воєнних дій. Особливо це контрастує із іншими винятками — Херсоном, Маріуполем та Енергодаром. В усіх трьох містах відбулося значне зменшення промислового виробництва (у окремих випадках — повне руйнування потужностей, як “Азовсталь” у Маріуполі). Це спричинило зсув форми розподілу у бік від’ємних відхилень навіть за умови використання значно меншого середнього вмісту періоду 2022–2024 рр. Проте, ці три міста розташовані в зоні активних воєнних впливів, зокрема високою частотою обстрілів. На формі розподілу цей наслідок відображається “плосковершинністю” та розтягненням вздовж осі абсцис, тобто зростанні варіативності тих чи інших відхилень. На наявних даних пояснити причини змін форми розподілу в Ужгороді неможливо без наявності інформації про зміни активності стаціонарних джерел викидів та змінах потоку автотранспорту.

Аналіз змін концентрацій  $\text{CO}$  у шести групах міст за період 2022–2024 років порівняно з 2019–2022 роками показав загальну тенденцію до зниження

рівнів забруднення до 8% (рис. 1). При цьому варіативність значень для більшості міст усіх груп залишилася практично незмінною. На фоні зменшення середніх значень, за час повномасштабного вторгнення спостерігається незначне зростання повторюваності додатних відхилень у межах від середнього до  $0,9\sigma$  (рис. 4).

Виняток у виявлених змінах спостерігається в окремих містах груп 1 (найбільш віддалені від лінії фронту міста Західної України) та 6 (міста, з єдиним переважаючим джерелом у вигляді ТЕЦ/ТЕС), де за повномасштабного вторгнення почало спостерігалось зростання частоти значень, близьких до відповідного середнього (рис. 5). При цьому, повторюваність відхилень  $\text{CO}$  у “хвостах” розподілу стала дещо нижчою, за винятком значних від’ємних відхилень та Трипільською ТЕС. У обох групах міст це свідчить про більш стабільне формування вмісту  $\text{CO}$ . З однієї сторони, руйнування промислових потужностей, що використовують тверде паливо та є основними джерелами викидів  $\text{CO}$ , а також нерегулярність роботи мала би призводити до зворотного ефекту — зростання варіативності показників. З іншого боку, нижчі концентрації  $\text{CO}$  можуть призводити до меншого відгуку на вплив метеорологічних умов, що разом із додаванням більш регулярного використання населенням пічного опалення та дизель-

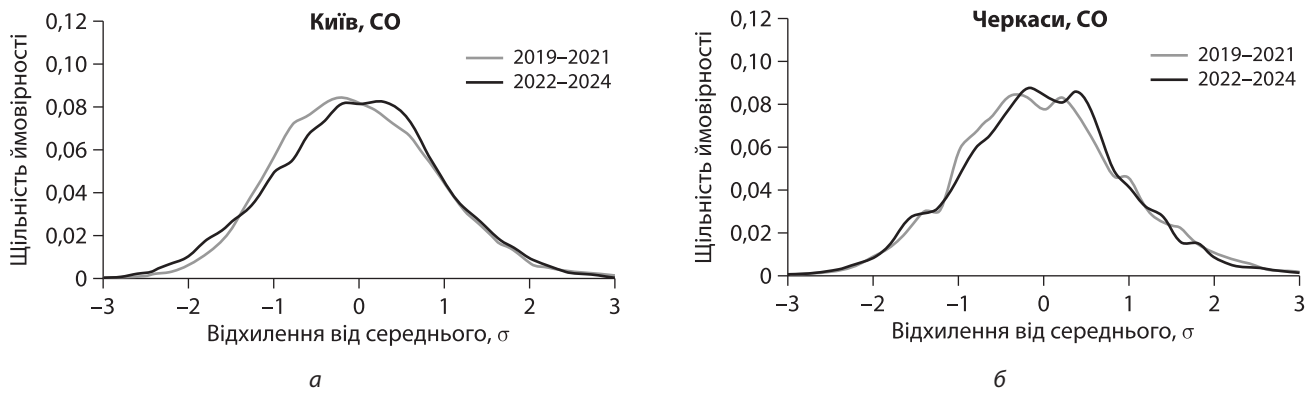


Рис. 4. Найтиповіший характер статистичного розподілу загального вмісту CO

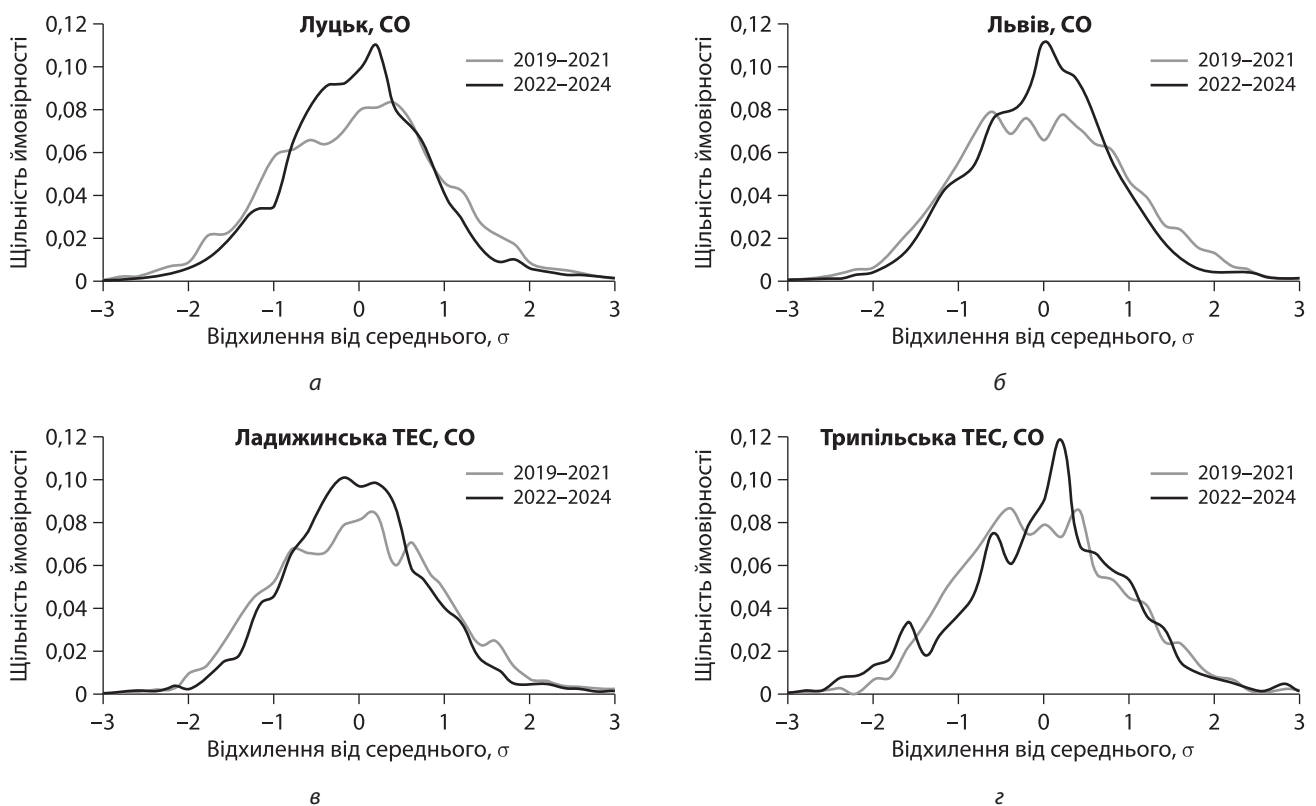


Рис. 5. Нетипові зміни статистичного розподілу загального вмісту CO у містах

генераторів призводити до посилення ефекту стабільності CO в атмосфері. Проте, такі припущення наразі важко аргументувати та довести з урахуванням наявних даних. Додатково виникає питання зміни розподілу саме над містами з потужними ТЕС/ТЕЦ та у західних районах України.

Серед досліджуваних забруднюючих речовин найбільш однорідні зміни у розподілах характерні для  $SO_2$  (рис. 6), незважаючи на різні зміни середнього вмісту (рис. 1). Враховуючи, що високі рівні  $SO_2$  над територією України формуються у місцях

активного використання твердого палива в промисловості, показовими є зміни середнього вмісту над ТЕС. Так, на Зміївській, Бурштинській, Ладизинській та Трипільській ТЕС зафіксовано зростання рівнів забруднення від 18% до 59%, тоді як на Вуглегірській, Добротвірській, Старобешівській та Курахівській ТЕС — зниження від 33% до 63%. Таким чином, зменшення над ТЕС поблизу лінії фронту, де переважна кількість ТЕС була знищена — чітко проявляється зниження  $SO_2$ . У той час як ТЕС на відстані від лінії фронту, незважаючи на значні руй-

нування, середній вміст  $\text{SO}_2$  зріс, що вказує на різке зменшення використання газу та перехід на менш екологічні типи палива. Загалом, для усіх міст характер зміни розподілу однаковий — повторюваність як додатних, так і від’ємних відхилень від середніх значень зменшилася, що відображає зменшення варіативності вмісту  $\text{SO}_2$  в атмосфері.

За час повномасштабного російського вторгнення на територію України, для усіх досліджуваних міст характерною ознакою стало зменшення “хвостів” розподілу загального вмісту  $\text{HCHO}$  та зростання

повторюваності незначних варіацій близьких до середніх значень (рис. 7).

У той же час для міст на віддалі від лінії фронту ці зміни є менш вираженими (наприклад, рис. 7а, б), у порівнянні із містами, які або часто підпадають під обстріли, або розташовані поблизу лінії фронту, або потрапили під окупацію (рис. 7в, г). Це свідчить про те, що формування вмісту  $\text{HCHO}$  було більш варіативним до повномасштабного російського вторгнення, тобто варіації вмісту формувалися за більшої активності різноманітних джерел викидів.

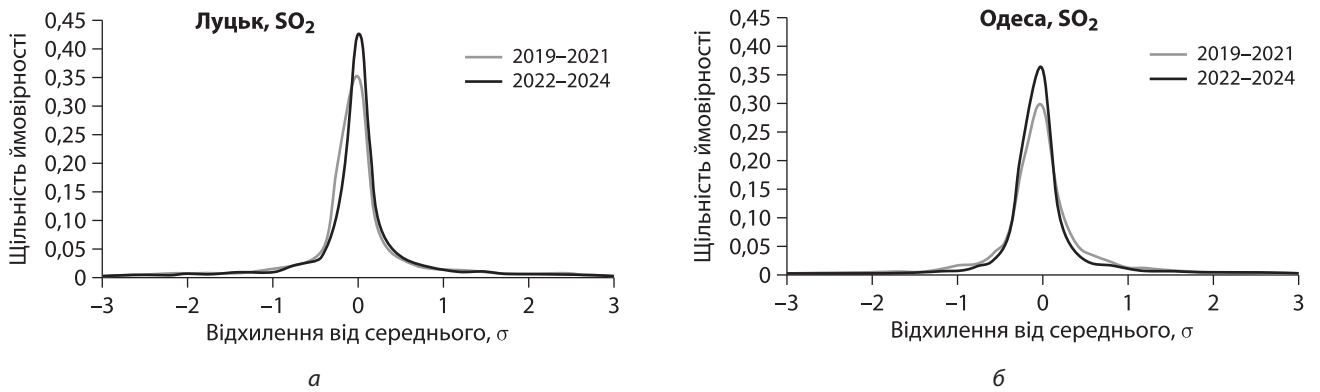


Рис. 6. Найтипівший характер статистичного розподілу загального вмісту  $\text{SO}_2$

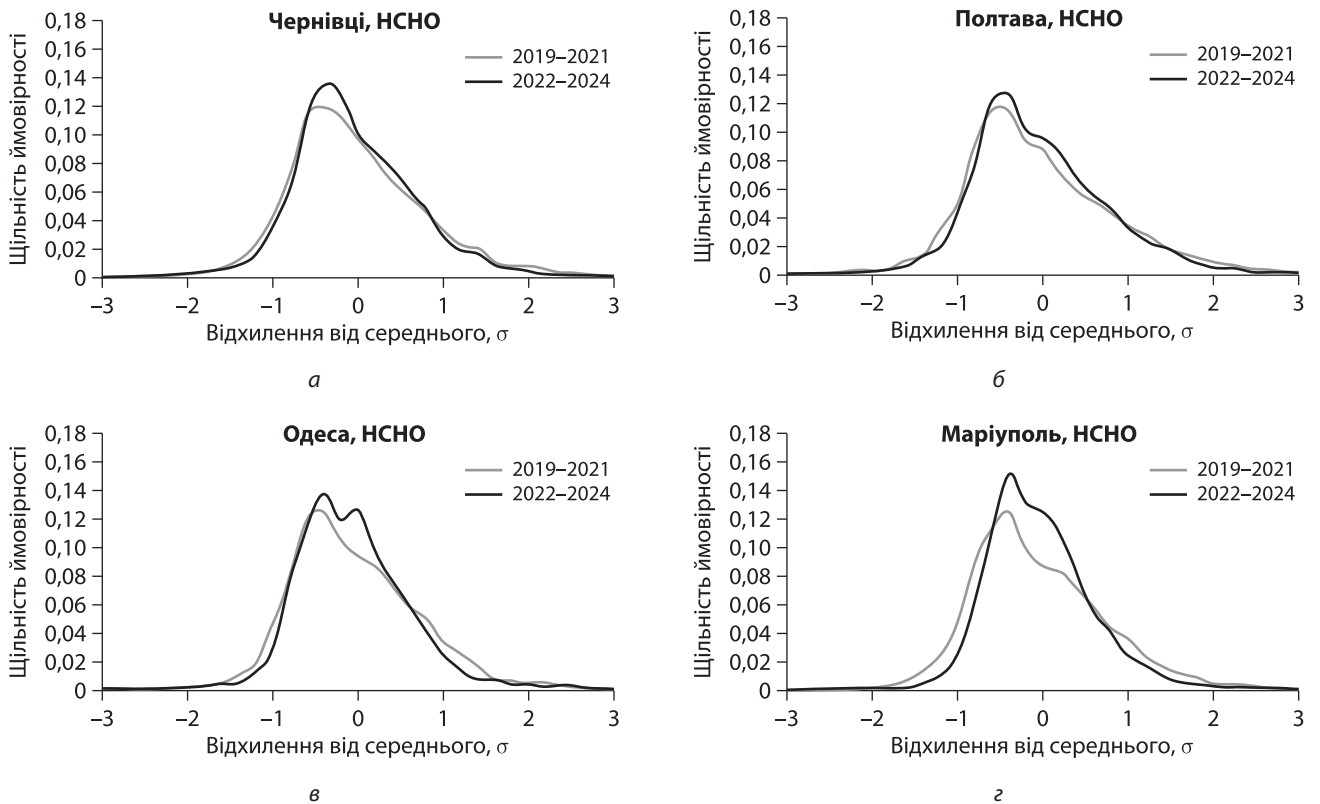


Рис. 7. Найтипівший характер статистичного розподілу загального вмісту  $\text{HCHO}$

З 2022 року варіативність зменшилася, особливо з наближенням до лінії фронту, що опосередковано може свідчити про руйнування частини підприємств, які викидали НСНО.

### ВИСНОВКИ

В урбанізованих районах зміна середніх значень загального вмісту забруднюючих речовин за період повномасштабного вторгнення (2022–2024 рр.) відносно базового періоду (2019–2021 рр.) показала переважне зменшення вмісту  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ , переважне зростання  $\text{SO}_2$ , та різні зміни НСНО. Зменшення  $\text{NO}_2$  досягало 25% та найчастіше спостерігалось у містах зі значними руйнуваннями промислової інфраструктури. Зменшення  $\text{CO}$  є регіональним і не пов'язаним із воєнними діями, за винятком Маріуполя зі зруйнованим заводом “Азовсталь”. Зростання  $\text{SO}_2$  ймовірніше за все вказує на появу додаткових джерел емісії, що може бути пов'язаним із переходом на менш екологічні типи палива та використання дизель-генераторів. У той же час значне регіональне зменшення до 55% спостерігається на Донбасі. Незважаючи на локальність змін НСНО, виявлено три регіональні особливості: зростання

вмісту над територією Донбасу, зростання у Передкарпатському регіоні, та зменшення у північній та центральній частині Правобережжя.

Дослідження статистичної структури загально-го вмісту  $\text{NO}_2$  показали відсутність значних змін за винятком середніх значень, що вказує на те, що на фоні загального зменшення викидів механізм надходження, циклічність викидів та роль метеорологічних умов у більшості міст залишилися сталими. Подібні закономірності є типовими і для  $\text{CO}$ , проте спостерігається незначне зростання повторюваності додатних відхилень у межах від середнього до  $+1\sigma$ . Для  $\text{SO}_2$  найбільш характерним стало зменшення повторюваності як додатних, так і від'ємних відхилень, що відображає зменшення варіативності вмісту в атмосфері. У випадку НСНО виявлено зменшення “хвостів” розподілу загального вмісту НСНО та зростання повторюваності незначних варіацій близьких до середніх значень.

Отримані результати є важливим доповненням до розуміння загальної зміни якості атмосферного повітря у містах внаслідок повномасштабного російського вторгнення, що дозволяє чіткіше фіксувати зміни при накладанні різних за впливом факторів.

### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bun, R., Marland, G., Oda, T., See, L., Puliafito, E., Nahorski, Z., Jonas, M., Kovalyshyn, V., Ialongo, I., Yashchun, O., Romanchuk, Z. (2024). Tracking unaccounted greenhouse gas emissions due to the war in Ukraine since 2022. *Sci Total Environ*, **914**:169879. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169879>
- Davybida, L.I. (2023). Air quality impacts of war detected from the Sentinel-5P satellite over Ukraine. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, **1254**(1): 012112. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012112>
- Filho, W.L., Fedoruk, M., Paulino Pires Eustachio, J.H., Splodytel, A., Smaliychuk, A., Szykowska-Jóźwik, M.I. (2024). The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *J Environ Manag*, **364**:121399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
- Gallo-Cajiao E, Dolšak N, Prakash A, Mundkur T, Harris PG, Mitchell RB, Davidson N, Hansen B, Woodworth BK, Fuller RA, Price M, Petkov N, Mauerhofer V, Morrison TH, Watson JEM, Chowdhury SU, Zöckler C, Widerberg O, Yong DL, Klich D, Smagol V, Piccolom J, Biggs D (2023). Implications of Russia's invasion of Ukraine for the governance of biodiversity conservation. *Front conserv sci*, **4**. <https://doi.org/10.3389/fcosc.2023.989019>
- Ialongo, I., Bun, R., Hakkarainen, J., Virta, H., Oda, T. (2023). Satellites capture socioeconomic disruptions during the 2022 full-scale war in Ukraine. *Sci Rep*, **13**(1):14954. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42118-w>
- Jiadan, D., Liqiao, T., Fang, C., Xiaobin, C., Xiaoling, C., Qiangqiang, X., Xinghui, X. (2023). Spatio-temporal variations of aerosol optical depth over Ukraine under the Russia-Ukraine war. *Atmos Environ*, **314**:120114. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120114>
- Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., Ovcharuk, V., Spyrakos, E., Stanica, A., Slabakova, V., Tyler, A. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Commun Earth Environ*, **6**(1):185. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z>
- Liadze, I., Macchiarelli, C., Mortimer-Lee, P., Sanchez Juanino, P. (2023). Economic costs of the Russia-Ukraine war. *World Econ*, **46**(4):874–886. <https://doi.org/10.1111/twec.13336>
- Malyska, L., Ladstätter-Weißmayer, A., Galytska, E., Burrows, J.P. (2024). Assessment of environmental consequences of hostilities: Tropospheric  $\text{NO}_2$  vertical column amounts in the atmosphere over Ukraine in 2019–2022. *Atmos Environ*, **318**:120281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120281>
- Meng, X., Lu, B., Liu, C., Zhang, Z., Chen, J., Herrmann, H., Li, X. (2023). Abrupt exacerbation in air quality over Europe after the outbreak of Russia-Ukraine war. *Environ Int*, **178**:108120. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108120>
- Phan, A., Fukui, H. (2024). Quantifying the impacts of the COVID-19 pandemic lockdown and the armed conflict with Russia on Sentinel5P TROPOMI  $\text{NO}_2$  changes in Ukraine. *Big Earth Data*, **8**(1):58–81. <https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2265105>
- Radomska, M., Stevens, R., Semkiv, M., Yatsenko, Y., Lysovenko, S. (2023). An initial data-limited modeling of the environmental consequences: case-study of the Vasylykiv fuel reservoir fire. *Environ Probl*, **8**(2):76–86. <https://doi.org/10.23939/ep.2023.02.076>
- Savenets, M., Osadchyi, V., Komisar K, Zhemera N, Oreshchenko A (2023) Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale Russian invasion of Ukraine. *Atmos Pollut Res*, **14**(11):101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
- Scher, C., Van den Hoek, J. (2025). Nationwide conflict damage mapping with interferometric synthetic aperture radar: A study of the 2022 Russia-Ukraine conflict. *Sci Rem Sens*, **11**:100217. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100217>

Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., de Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J.A., Gleick, P. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nat Sustain*, **6**(5):578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>

Zalakeviciute, R., Mejia, D., Alvarez, H., Bermeo, X., Bonilla-Bedoya, S.,

Rybarczyk, Y., Lamb, B. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, **14**(21):13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>

Zhang, C., Hu, Q., Su, W., Xing, C., Liu, C. (2023). Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war. *Sci Tot Environ*, **869**:161759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759>

### Liudmyla Nadtochii

ORCID: 0000-0003-3038-5960  
onoslyuda@uhmi.org.ua

### Natalia Zhemera

ORCID: 0009-0001-9350-4915  
zemeralda@ukr.net

### Mykhailo Savenets

ORCID: 0000-0001-9429-6209  
savenets@uhmi.org.ua

Ukrainian Hydrometeorological Institute  
of the State Emergency Service of Ukraine  
and the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv

## CHANGES IN THE STATISTICAL STRUCTURE AND VARIABILITY OF POLLUTANTS TOTAL CONTENT IN THE ATMOSPHERIC AIR OVER URBANIZED AREAS AS A RESULT OF THE FULL-SCALE RUSSIAN INVASION

The full-scale Russian invasion has led to numerous changes in atmospheric air conditions. Estimates of average changes in pollutant content often do not allow for the identification of characteristic consequences of warfare due to the overlap of

factors with opposing effects. In this study, based on Sentinel-5 Precursor satellite observations for 2019–2024, we analyzed the statistical structure and variability of the total content of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), and formaldehyde (HCHO) in the atmospheric air of urbanized areas. Over three years of war, we found a predominant decrease in NO<sub>2</sub> and CO levels, an increase in SO<sub>2</sub>, and mixed changes in HCHO, reflecting both the consequences of industrial destruction and the emergence of additional emissions due to a shift to less ecological fuel types and the operation of diesel generators. Against the background of changes in mean values, the statistical distribution structure remained largely unchanged for NO<sub>2</sub> and CO, though with a slight increase in the frequency of positive CO deviations within +1σ. SO<sub>2</sub> levels showed a decrease in the recurrence of both positive and negative deviations, clearly indicating reduced variability in the atmosphere. HCHO became less variable in the range of large deviations from the mean, with greater recurrence of minor variations close to average values. The obtained results complement the observed changes in the total pollutant content in cities during the full-scale Russian invasion, which is important for fixation the consequences of warfare under conditions of overlapping factors with opposing impacts.

**Keywords:** atmospheric pollution, nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, formaldehyde, statistical distribution.

