

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національна академія наук України
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України

ОЦІНОЧНИЙ ЗВІТ

Наслідки повномасштабного російського вторгнення для якості атмосферного повітря в Україні

24.02.2022 – 24.02.2026

2026



Дослідження проведені співробітниками лабораторії моніторингу атмосферного повітря, відділу моніторингу атмосфери, Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України

Автори:

Михайло САВЕНЕЦЬ, к.геогр.н., ст. досл., зав. відділу моніторингу атмосфери

Людмила НАДТОЧІЙ, к.геогр.н., старший науковий співробітник

Тетяна КОЗЛЕНКО, науковий співробітник

Катерина КОМІСАР, провідний інженер

Антоніна УМАНЕЦЬ, провідний інженер

Дарія ГРАМА, інженер

Наталія ЖЕМЕРА, інженер

Софія КРАЙНИК, інженер

Марина РУДАС, інженер

Оціночний звіт є узагальненням наукових досліджень, виконаних в рамках виконання низки науково-дослідних робіт та проєктів:

- №9/21 «Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань» (2021–2023) на замовлення ДСНС України
- «Розроблення багатотильового геопорталу моніторингу та прогнозування стану навколишнього природного середовища» (2021–2025) за планом НАН України на 2021-2025 рр.
- «Розроблення системи оперативного моніторингу забруднення атмосферного повітря над містами України за супутниковими даними» (2021–2023) в рамках цільової програми наукових досліджень «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки» на 2021-2023 рр.
- №2022.01/0121 «Геоінформаційна система з просторового оцінювання деградації довкілля України внаслідок російської агресії» (2023-2024) за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у військовий та повоєнний періоди»
- «Дослідження характеристик аерозольного забруднення атмосферного повітря під час військових дій на території України» (2024). Додаткова відомча тема науково-дослідних робіт на 2024 р. керівниками яких є молоді вчені НАН України в рамках цільової фінансової підтримки молодих учених, які виступали з науковими повідомленнями на засіданнях Президії НАН України у 2023 р.»
- №8/24 «Розроблення програмно-моделюючих засобів оцінювання стану забруднення атмосферного повітря над територією України» (2024-2026 рр.) на замовлення ДСНС України
- №2025.05/0005 «Розроблення методології застосування «безшовних» чисельних моделей для оцінювання впливу військових дій на стан атмосферного повітря» (2026) за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу на одержання грантів Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених-докторів філософії/кандидатів наук.

Фото та ілюстрації на сторінках 1, 8, 14, 17, 23, 45 взято із ресурсу Pixabay (<https://pixabay.com/>), що поширюються за ліцензією (інструментом) CC0.

Картографічні матеріали та графіки створені співробітниками лабораторії моніторингу атмосферного повітря Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України

Матеріали звіту можуть вільно використовуватися та розповсюджуватися із обов'язковим зазначенням посилання на звіт.

Контактна особа: Михайло Савенець, savenets@uhmi.org.ua

ВСТУП

У цьому оціночному звіті представлено дослідження та аналіз наслідків чотирьох років повномасштабного російського вторгнення (24.02.2022–24.02.2026) для якості атмосферного повітря в Україні, проведеного на основі даних супутникового зондування та наземних постів моніторингу мережі гідрометеорологічних організацій.

Оціночний звіт містить резюме для органів влади та політиків і розширений аналіз короткотривалих наслідків та довготривалих ефектів воєнних дій для забруднення атмосфери. Аналізу вмісту забруднювальних речовин передують дослідження зміни переважаючих метеорологічних умов та розподілу екосистемних пожеж, з метою врахування їх внеску на формування забруднення атмосфери. Оціночний звіт завершується висновками, які узагальнюють основні наслідки повномасштабного російського вторгнення на якість атмосферного повітря, та рекомендаціями щодо оптимізації сумісного використання різних джерел інформації про забруднення атмосферного повітря й врахування виявлених змін у прийнятті управлінських рішень. Усі методологічні та технічні аспекти проведених досліджень наведені у відповідному розділі після висновків та рекомендацій.

РЕЗЮМЕ ДЛЯ ОРГАНІВ ВЛАДИ ТА ПОЛІТИКІВ

За чотири роки (24.02.2022–24.02.2026) повномасштабного російського вторгнення Україна зазнала безпрецедентного у новітній історії впливу на економічні, соціальні та екологічні процеси. Тисячі ракетних і дронівих ударів, руйнування промислових підприємств, знищення міст, переміщення населення, екосистемні пожежі внаслідок обстрілів – усі ці та численні інші процеси мають безпосередній вплив на стан атмосферного повітря. Його якість є важливим, хоча й не завжди очевидним, чинником, що визначає ризики для здоров'я населення та функціонування екосистем.

Оцінювання впливу війни на якість атмосферного повітря є значно складнішим завданням, ніж традиційний аналіз забруднення мирного часу, оскільки потребує врахування одночасної дії багатьох змінних факторів. Мережі наземних спостережень ефективно фіксують локальні зміни рівнів забруднення, проте не здатні охопити всі території, що зазнають впливу воєнних дій. Додатковою проблемою є втрата частини постів моніторингу, особливо з наближенням до лінії фронту. Супутникове зондування забруднювальних речовин забезпечує значне просторове покриття, однак має обмежену чутливість до окремих змін концентрацій та залежить від хмарності. Крім того, через високу мінливість атмосфери, де багато забруднювальних речовин швидко розсіюються, осаджуються, або хімічно перетворюються, часовий розрив між викидом і моментом спостереження часто ускладнює надійну оцінку наслідків.

Аналіз додатково ускладнюється зміною просторового розподілу екосистемних пожеж та одночасною дією різноспрямованих факторів. З одного боку, ракетні удари можуть спричинити потужні короткочасні викиди забруднювальних речовин, а з іншого – зупинка роботи промислових підприємств призводить до зменшення регулярних викидів. Блекаути спричиняють зростання використання генераторів, а переміщення населення може зменшувати викиди від автотранспорту в окремих містах, проте там формуються нові, зумовлені воєнними діями, джерела забруднення.

Найхарактернішим і найбільш поширеним наслідком війни є зростання кількості випадків високих рівнів забруднення після ракетних і дронівих атак. У середньому після кожного ракетного чи дронівого удару приземні концентрації забруднювальних речовин короткостроково зростають на 100–300% відносно рівня до удару, а в окремих екстремальних випадках – більш ніж на 1000%. Водночас частота фіксації таких подій наземними системами моніторингу є низькою. Це пов'язано з швидким розсіюванням забруднювальних речовин та точковим характером вимірювань на стаціонарних постах спостережень.

У зв'язку з використанням лише супутників на полярних орбітах для моніторингу якості атмосферного повітря над територією Європи у 2022–2026 рр., що забезпечує лише одне спостереження на добу, більшість короткотривалих випадків високого забруднення після ракетних і дронів атак не фіксувалися через часовий розрив між моментом викиду та супутниковим спостереженням. У випадках, коли наслідки потужних короткотривалих викидів були зафіксовані, зростання концентрацій забруднювальних речовин становило в середньому 50–150% від типових значень. Водночас супутникові методи дозволили виявляти наслідки забруднення, пов'язані з екосистемними пожежами, особливо тими, що виникали вздовж лінії фронту внаслідок обстрілів. Для віддалених територій, де відсутній наземний моніторинг, супутникове зондування залишається єдиним джерелом інформації про стан атмосферного повітря.

Чотири роки повномасштабної війни вплинули на загальну якість атмосферного повітря у вигляді довготривалих ефектів. У першу чергу спостерігаються наслідки руйнування промислових підприємств і міст. За даними супутникових спостережень на регіональному масштабі зафіксовано зниження середніх рівнів забруднення у промислових районах відносно періоду 2019–2021 рр., що становить 8–30% залежно від забруднювальної речовини. Водночас дані наземних спостережень мережі гідрометеорологічних організацій, які краще фіксують локальні зміни, показали більш складну просторово-часову динаміку. Так, у прифронтових містах спостерігається зростання рівнів забруднення внаслідок інтенсивніших воєнних дій. У великих промислових містах довгострокові тенденції переважно відображають зниження середніх рівнів забруднення через руйнування підприємств. У тилкових містах спостерігаються різноспрямовані зміни, що свідчить про перерозподіл концентрацій забруднювальних речовин. Важливо підкреслити потенційно оманливий характер зниження рівнів забруднення у окремих промислових містах. Потужні короткотривалі викиди, що виникають внаслідок ракетних ударів і призводять до руйнування підприємств, можуть мати суттєвіший негативний вплив на здоров'я населення, ніж багаторічні регулярні, проте контрольовані, викиди від роботи цих підприємств.

Війна в Україні показує, що системи наземного моніторингу залишаються ключовим джерелом інформації про забруднення атмосферного повітря. Значно посилити спроможність моніторингу може запланований у 2025 р. геостаціонарний супутник Sentinel-4. Водночас сукупні дані спостережень не дозволяють реконструювати повну динаміку змін якості атмосферного повітря впродовж війни. Найкращим інструментом для цього залишається застосування чисельного моделювання атмосферних процесів та моделей хімічного транспорту.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вплив метеорологічних умов.....	8
Зміни у розподілі екосистемних пожеж.....	14
Зміни якості атмосферного повітря	
Короткотривалі наслідки.....	17
Довготривалі ефекти.....	23
Висновки.....	41
Рекомендації.....	43
Методологія досліджень.....	45
Перелік використаних джерел.....	50

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

Забруднювальні речовини:

CH₂O – формальдегід;

C₆H₅OH – фенол;

CO – монооксид вуглецю;

H₂S – сірководень;

HCl – хлороводень;

HF – фтороводень;

NH₃ – аміак;

NO₂ – діоксид азоту;

NO – оксид азоту;

O₃ – озон;

SO₂ – діоксид сірки.

Системи, платформи:

CDSE – Copernicus Data Space Ecosystem;

FIRMS – Fire Information for Resource Management System.

Супутники та супутникові прилади:

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer;

NOAA-20, -21 – National Oceanic and Atmospheric Administration -20, -21;

Sentinel-5P – Sentinel-5 Precursor;

Suomi NPP – Suomi National Polar-orbiting Partnership;

TROPOMI – TROPospheric Monitoring Instrument;

VIIRS – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.

Організації та відомства:

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;

НАН – Національна академія наук України;

УкрГМІ – Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України;

ЦГО – Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського.

Інше:

НПЗ – нафтопереробний завод;

ТЕС – теплова електростанція;

ТЕЦ – теплова електроцентраль;

OFFL – offline, режимні дані Sentinel-5P.



**Вплив
метеорологічних
умов**

Після надходження викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря, формування концентрацій значно залежить від погодних умов¹. Не усі зміни якості атмосферного повітря пов'язані зі змінами у обсягах викидів. Будь-якому аналізу забруднення атмосфери має передувати аналіз зміни основних метеорологічних параметрів, що визначають швидкість осадження забруднювальних речовин, умови їх розсіювання, швидкість перебігу хімічних реакцій в атмосфері із перетворенням одних хімічних речовин та появу інших.

Так, наприклад, менша повторюваність опадів протягом певного сезону року може призвести до формування вищих середніх концентрацій забруднювальних речовин через значно нижчий ступінь вологого осадження². Сильніші вітри призводять до кращого розсіювання забруднюючих речовин, тоді як більша повторюваність штилю сприяє накопиченню забруднення у приземному шарі атмосфери³. Температурні інверсії (зростання температури повітря з висотою) сприяють формуванню блокуючих шарів в атмосфері, що призводить до погіршення якості атмосферного повітря². Усі ці приклади впливу переважаючих погодних умов прямим чином призводять до змін у концентраціях забруднювальних речовин, і ці зміни жодним чином не пов'язані із зменшенням чи зростанням обсягів викидів. Тому, для правильного аналізу змін якості атмосферного повітря спричинених воєнними діями, першочергово аналізуються зміни метеорологічних параметрів, на основі чого визначається ступінь впливу переважаючих погодних умов.

У даному звіті аналіз змін метеорологічних умов зосереджений на чотирьох параметрах:

- 1) приземна **температура повітря**, для врахування сприятливості атмосфери до хімічного перетворення забруднювальних речовин;
- 2) **атмосфері опади**, для врахування інтенсивності вологого осадження;
- 3) **висота граничного шару атмосфери**, яка свідчить про сприятливість до вертикального розсіювання забруднювальних речовин;
- 4) приземна **швидкість вітру**, що визначає сприятливість до горизонтального розсіювання забруднювальних речовин.

Приземна температура повітря за період з весни 2022 до зими 2025/26 рр. значно відрізнялася від значень базового періоду (2019–2021 рр.), з якими відбувається порівняння якості атмосферного повітря. На [рис. 1](#) зображені зміни приземної температури повітря за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

Наінтенсивніших змін за 2022–2025/26 рр. приземна температура повітря зазнала у перехідні сезони. Кожна весна цього періоду була в середньому на 1–4°C теплішою за базовий період. Для весняного сезону вищі температури повітря позначають зсув метеорологічних умов до більш сприятливих для хімічного перетворення і фонового зменшення концентрацій низки забруднювальних речовин (таких як NO_2 , CO ^{4,5}), проте інтенсивнішого утворення O_3 й CH_2O ⁶. Натомість, восени приземна температура повітря була значно нижчою за базовий період, що формує зворотні до весняних залежності.

Серед літніх сезонів варто звернути увагу на спекотніший 2024 р. та тенденції до вищих температур на півдні. Контрастними були дві останні зими – значно тепліша 2024/25 рр. та холодніша 2025/26 рр. у порівнянні з базовим періодом 2019–2021 рр.

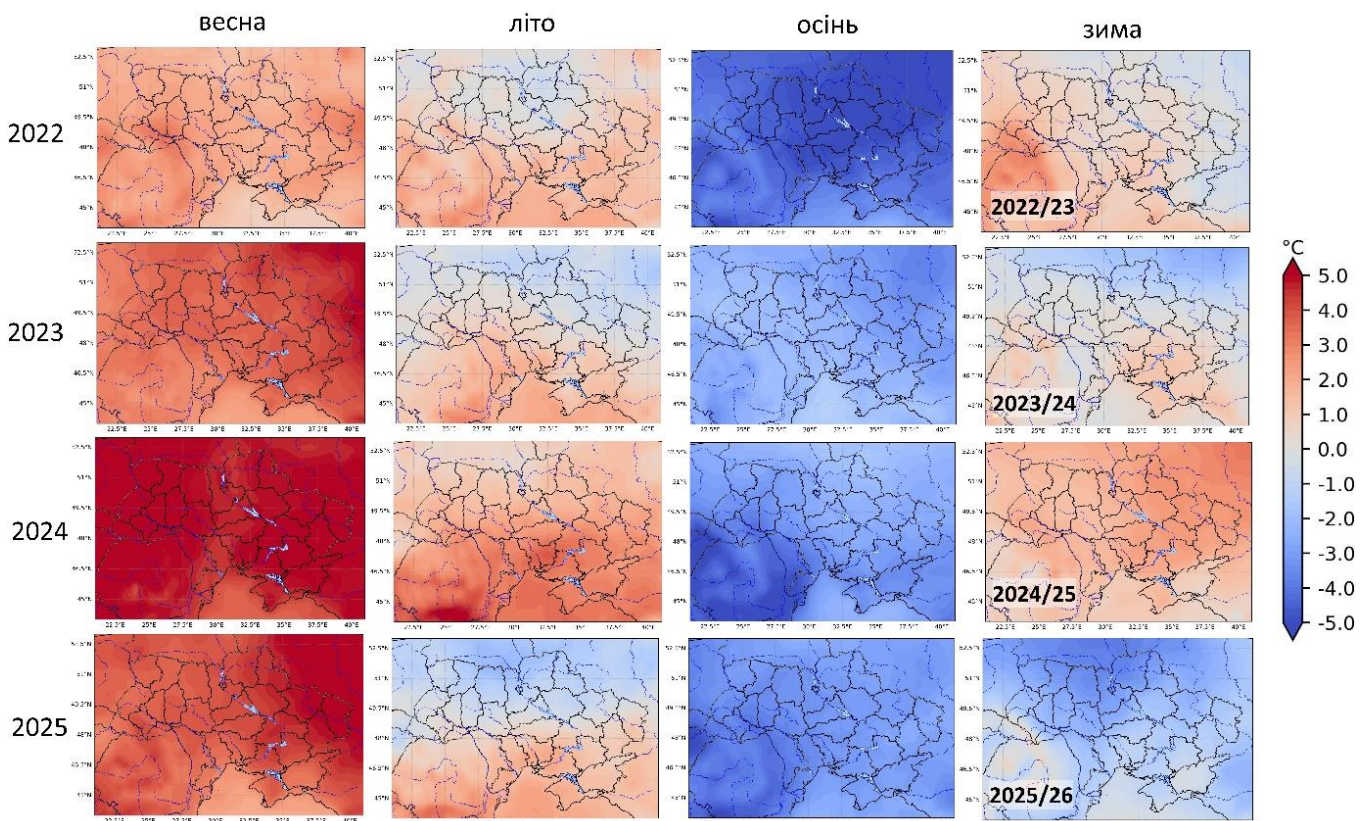


Рис. 1. Зміна середньої за сезон приземної температури повітря (у °C) від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середньою температурою відповідного сезону за базовий період (2019–2021)

Зміни **атмосферних опадів** за період з весни 2022 до зими 2025/26 рр. над територією України були більш неоднорідними у порівнянні з базовим періодом (2019–2021 рр.). На [рис. 2](#) представлено наскільки змінилася сума атмосферних опадів за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

Найбільш однорідними є зростання суми атмосферних опадів у осінні сезони, особливо у 2022 та 2023 рр. Враховуючи, що опади є основним чинником виведення більшості забруднювальних речовин, для осені характерна сприятливість умов до зменшення забруднення. Особливу увагу заслуговує розподіл атмосферних опадів літнього сезону: впродовж усього періоду повномасштабного російського вторгнення для півночі території України було характерне зростання кількості опадів (а відповідно більш сприятливі умови до виведення забруднювальних речовин), тоді як на півдні зафіксовано дефіцит опадів (тобто сприятливі умови до накопичення забруднення). При цьому у 2024 та 2025 рр. влітку на півдні території України сумарно опадів випало на 100–150 мм менше, ніж спостерігалось у 2019–2021 рр.

Зменшення інтенсивності вологого осадження також зафіксовано взимку 2024/25 рр. над усією територією України та 2025/26 рр. на заході, а також навесні 2022 та 2024 рр. на більшій частині території України. Натомість, сприятливіші умови до виведення забруднювальних речовин зафіксовано навесні 2023 р. на південному сході, та взимку 2023/24 рр. на більшій частині території України.

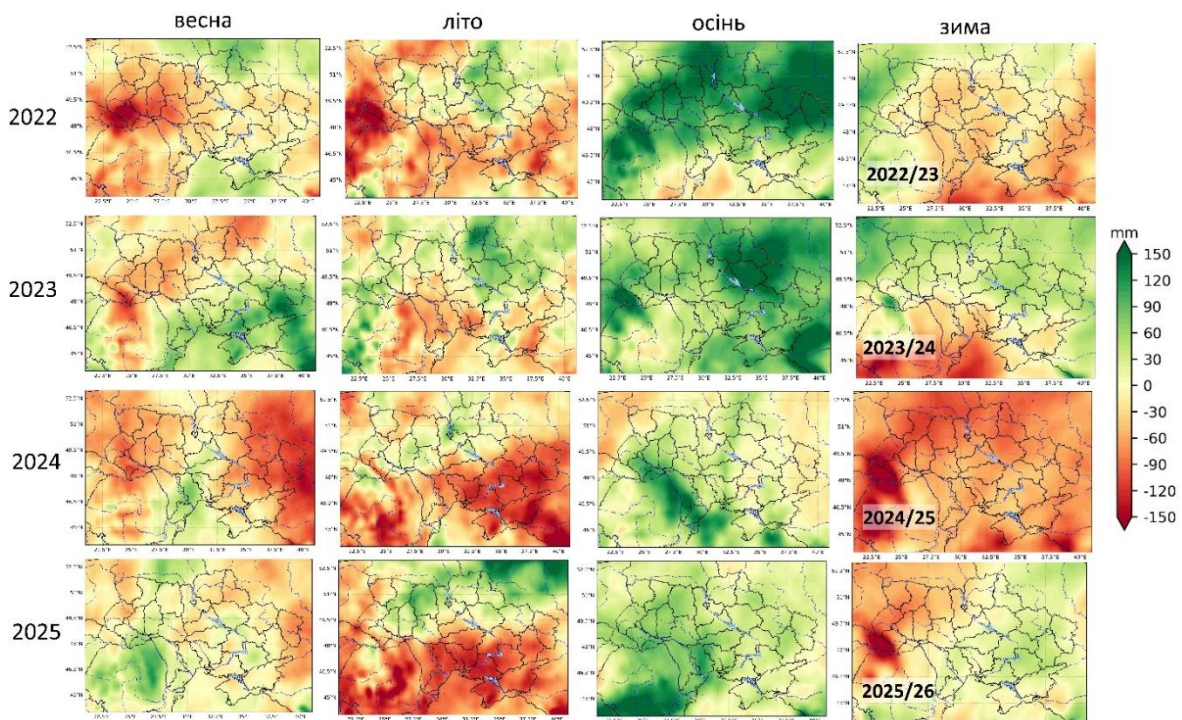


Рис. 2. Зміна накопиченої суми атмосферних опадів (у мм) за сезон від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середнім накопиченням опадів відповідного сезону за базовий період (2019–2021)

Висота **граничного шару атмосфери**, яка опосередковано визначає сприятливість умов вертикального розсіювання забруднювальних речовин та наслідки зміни повторюваності формування блокуючих шарів, за період з весни 2022 до зими 2025/26 рр. над територією України переважно характеризувалася більшими висотами у весняно-літній сезон та меншими висотами у осінньо-зимовий сезон у порівнянні з базовим періодом (2019–2021 рр.). На [рис. 3](#) представлено наскільки змінилася середня висота граничного шару атмосфери за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

Найбільш значущі зміни зафіксовані влітку 2024 та 2025 рр. на півдні території України, граничний шар атмосфери був на 150–300 м вищим. Це свідчить про сприятливіші динамічні умови до розсіювання забруднення із приземного шару. Загалом граничний шар атмосфери був вищим влітку 2022 р. на півдні території України, та навесні 2022, 2023 та 2024 рр.

Менш сприятливі умови до вертикального розсіювання забруднювальних речовин були характерні восени 2022 та 2025 рр., а також взимку у північних та західних регіонах у 2022/23, 2024/25 та 2025/26 рр. Висота граничного шару у цей час було в середньому на 50–100 м нижчою.

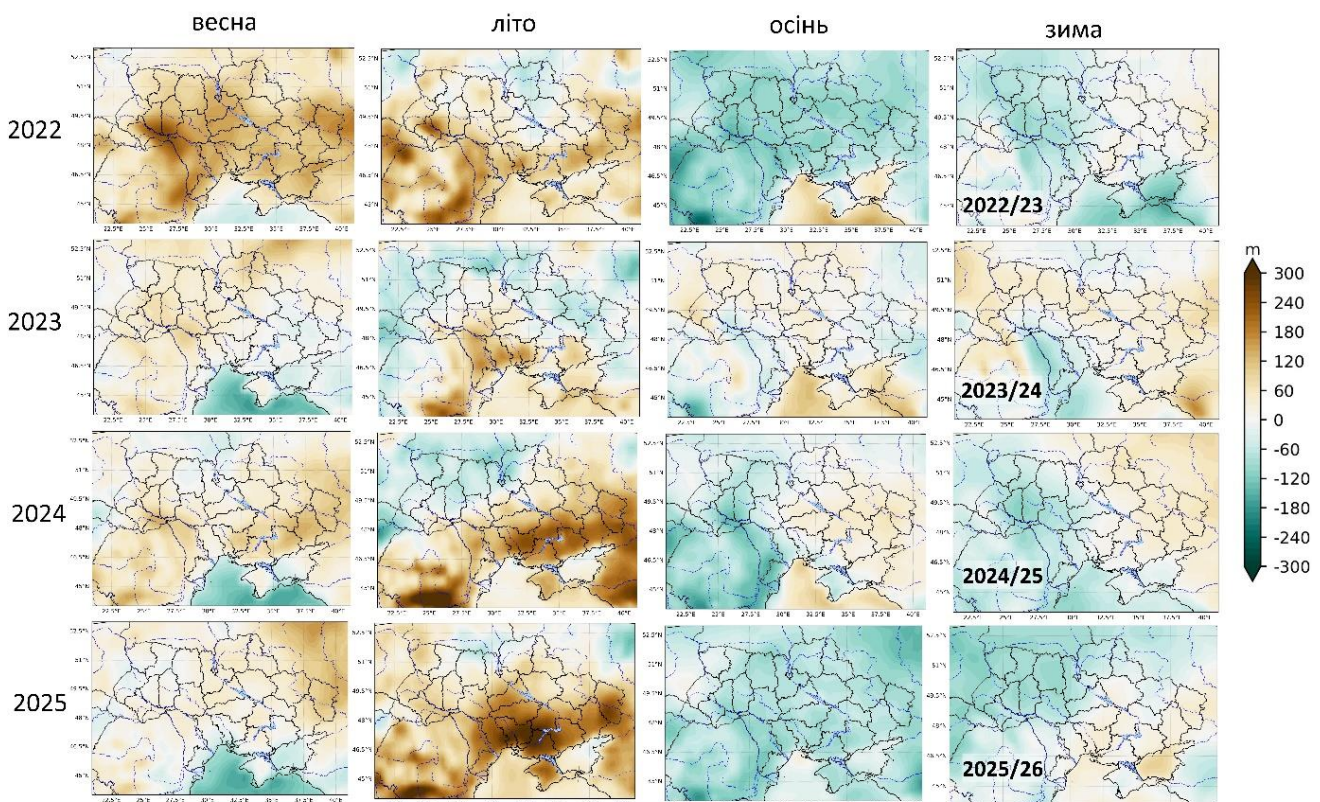


Рис. 3. Зміна середньої за сезон висоти граничного шару атмосфери (у м) від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середньою висотою граничного шару відповідного сезону за базовий період (2019–2021)

Приземна **швидкість вітру** визначає інтенсивність горизонтального розсіювання забруднювальних речовин в приземному шарі атмосфери. За період з весни 2022 до зими 2025/26 рр. над територією України зростання швидкості вітру переважно спостерігалось восени, зменшення навесні та мало різнонаправлені зміни в літній та зимовий сезони. На [рис. 4](#) представлено зміни приземної швидкості вітру за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

Зменшення приземної швидкості вітру є передумовами до більшого накопичення забруднювальних речовин в приземному шарі атмосфери, що було найбільш типовим навесні 2023, 2024 та 2025 рр., взимку в 2024/25 та 2025/26 рр, та на півночі території України влітку в 2023 та 2024 рр.

Значне зростання швидкості вітру та сприятливіші умови до розсіювання забруднювальних речовин було характерне восени у 2023 та 2024 рр., влітку 2025 р. та взимку 2023/24 рр.

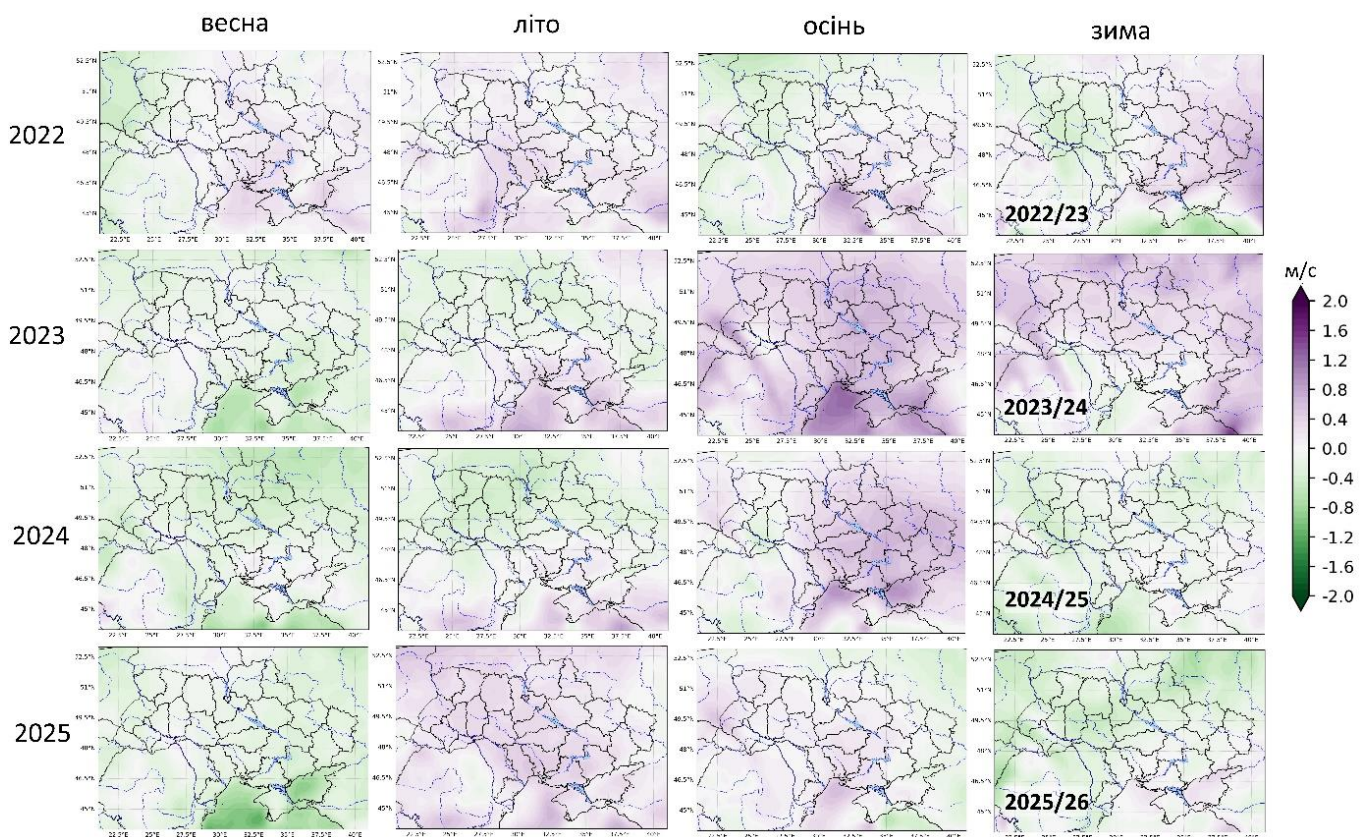



Рис. 4. Зміна середньої за сезон приземної швидкості вітру (у м/с) від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середньою швидкістю вітру відповідного сезону за базовий період (2019–2021)



**Зміни у розподілі
екосистемних
пожеж**

Поряд із антропогенними викидами від роботи промислових підприємств та автотранспорту у містах, екосистемні пожежі завжди відігравали значну роль у формуванні забруднення атмосферного повітря в Україні^{7,8,9}. Розподіл екосистемних пожеж добре прослідковується за даними теплових аномалій супутникових приладів MODIS (супутник Terra) та VIIRS (супутники Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21), що представлено по сезонам року з 2019 по 2025/26 рр. на [рис. 5](#).

Перед початком повномасштабного російського вторгнення екосистемні пожежі характеризувалися чітким сезонним проявом^{7,8}. Навесні відбувалося регулярне спалювання сухого травостою на полях, що призводило до формування тисяч теплових аномалій, які добре виявлялися за даними супутникових спостережень та охоплювали більшу частину території України⁹. Подібне спалювання спостерігалось і восени, проте кількість таких пожеж була меншою, порівняно із весняним сезоном. Влітку розподіл екосистемних пожеж на території України визначався несприятливими метеорологічними умовами з високими значеннями температури повітря та низькою вологістю ґрунту¹⁰, тому більшість теплових аномалій спостерігалось у південних та південно-східних областях території України.

Із початком повномасштабного російського вторгнення відбувся перерозподіл екосистемних пожеж^{11,12}. Першочерговим чинником стало концентрування пожеж на лінії активних бойових дій, спричинених регулярними обстрілами військових позицій. Другорядним, проте вагомим чинником, стало зменшення сезонного спалювання травостою на полях у зв'язку із введенням більш суворої відповідальності на період воєнного часу¹³.

Одразу із початком воєнних дій та активних бойових зіткнень, за просторовим розподілом теплових аномалій стала чітко виокремлюватися лінія фронту. Зокрема, весною 2022 р. найбільша концентрація екосистемних пожеж спостерігалася на сході території України та у Київській області. Влітку 2022 р. екосистемні пожежі сконцентрувалися вздовж лінії фронту від півдня Херсонської області до півночі Харківської області. Осінь 2022 – весна 2023 рр. – був останній період, коли кількість теплових аномалій у теплий сезон року вздовж лінії фронту була порівняно малою. Вже починаючи з літа 2023 р. екосистемні пожежі вздовж лінії фронту регулярно формували максимуми локалізації та визначали викиди продуктів горіння біомаси.

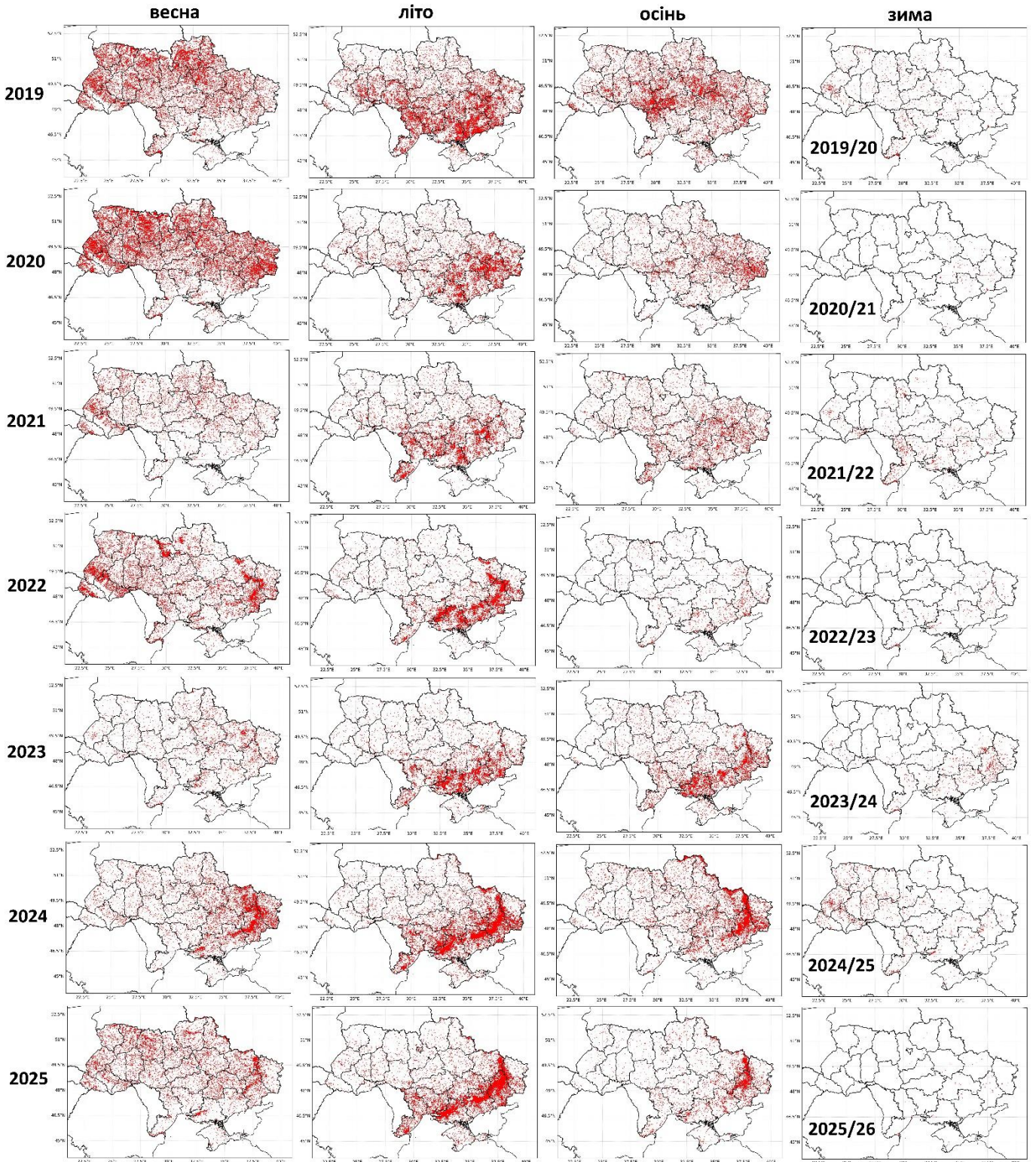



Рис. 5. Просторовий розподіл теплових аномалій за сезонами, виявлених за допомогою супутникових приладів MODIS та VIIRS за період з весни 2019 р. по зиму 2025/2026 рр.

A large, billowing mushroom cloud from a nuclear explosion, with a bright orange and yellow fireball at the top and a dark, dense plume of smoke and debris trailing down to the ground. The background is a clear blue sky with some light clouds.

**Зміни якості
атмосферного
повітря.**

Короткотривалі наслідки

Основним наслідком воєнних дій для атмосферного повітря є різке, порівняно короткотривале, зростання концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі внаслідок викидів після ракетних та дронівих ударів (або інших надзвичайних подій воєнного характеру). Якщо до початку війни подібні викиди були вкрай рідкісними як наслідок техногенних аварій, то під час війни такі випадки стають регулярним явищем. Завдяки властивостям атмосфери швидко виводити більшість забруднювальних речовин, тривалість високих рівнів забруднення не перевищує кількох годин після припинення активності джерела викиду (напр., після вибуху або повного гасіння пожежі). У той же час, незважаючи на короткотривалість таких випадків, обсяги викидів настільки потужні, що концентрації забруднювальних речовин можуть нести миттєву загрозу для здоров'я населення, якщо опинитися в межах поширення хмари викиду.

За час повномасштабного вторгнення зафіксовано тисячі випадків ракетних та дронівих ударів, що призвели до формування потужних викидів небезпечних речовин. Проте, фіксація таких випадків будь-якою системою наземного моніторингу носить більше випадковий характер, адже необхідними умовами є часова (вимір здійснюється під час або незадовго після викиду) та просторова (вимір здійснюється за напрямком поширення хмари викиду вітром) узгодженість між місцем викиду та розташуванням поста спостережень. Як наслідок, враховуючи точковість наземних спостережень, забруднення атмосфери у більшості випадків ракетних та дронівих ударів залишається не зафіксованим.

За період з 2022 по 2025 рр. загалом вдалося ідентифікувати 443 випадки, коли підвищення концентрацій на стаціонарних постах спостережень гідрометеорологічних організацій узгоджувалося із наслідками ракетних та дронівих ударів по українських містах ([рис. 6](#)). Враховуючи кількість атак, фіксація прямого підвищення концентрацій внаслідок ударів складає менше 1% випадків. У перші два роки повномасштабного вторгнення ідентифіковано лише 60 (2022 р.) та 42 (2023 р.) випадки. Збільшення кількості одиниць ракет та дронів, запущених по території України в 2024 та 2025 рр. призвели до зростання кількості короткотривалих випадків потужних викидів забруднювальних речовин. У 2024 р. ідентифіковано вже 153 випадки, а у 2025 р. 188 випадків підвищення концентрацій забруднювальних речовин, що можна прямо пов'язати із воєнними діями, а не впливом інших чинників, серед яких регулярні викиди міст, екосистемні пожежі чи несприятливі метеорологічні умови до самоочищення атмосфери.

На [рис. 6](#) зображено розподіл по роках підтверджених випадків забруднення атмосферного повітря за даними постів моніторингу, а також середні перевищення концентрацій забруднювальних речовин після ракетних та дронівих атак відносно концентрацій до цього. Подібні оцінки проведені на основі пилу, CO, SO₂, NO₂ – речовин з найбільшим охоплення спостереженнями.

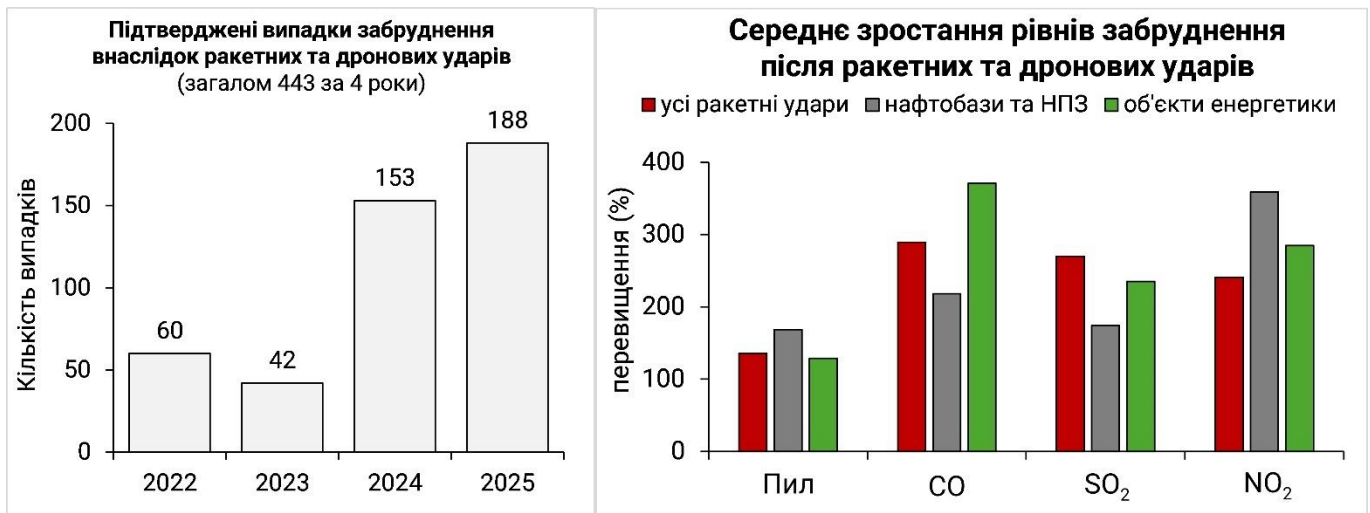


Рис. 6. Розподіл по роках підтверджених випадків забруднення атмосферного повітря за даними постів моніторингу, та середні перевищення концентрацій забруднювальних речовин у найближчий строк після ракетного або дронівого удару відносно концентрацій до удару для пилу, монооксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO₂) та діоксиду азоту (NO₂)

Після ракетних та дронівих ударів по містах, в середньому концентрації забруднювальних речовин зростали на 135% для пилу, 240% для NO₂, 270% для SO₂ та 290% для CO (рис. 6). Для усіх розглянутих забруднювальних речовин екстремальні випадки високого забруднення призводили до зростання концентрацій більш ніж на 1000% відносно значень до атаки. Аналіз та інтерпретація отриманих результатів вимагає враховувати факт, що умови визначення перевищень не є однорідними та, загалом, не можуть бути порівняні прийнятими статистичними підходами. По перше, пост спостережень, що фіксує зростання концентрацій може розташовуватися як біля місця удару в одних випадках, так і бути на відстані кількох кілометрів в інших випадках. По друге, вимір може бути здійснений одразу після удару в одних випадках, так і через кілька годин після удару в інших випадках. Тому, усі отримані відносні зміни забруднення відображають лише узагальнені наслідки для розуміння амплітуди зростання концентрацій після ракетних та дронівих атак, і жодним чином не дають точних оцінок перевищення за тих чи інших умов.

Якщо врахувати відмінність у наслідках ударів по об'єктам енергетики та нафтобазам і НПЗ, то концентрації CO та SO₂ в середньому були вищими після ударів по об'єктам енергетики, тоді як пил та NO₂ характеризувалися більшим зростанням внаслідок пожеж на нафтобазам та НПЗ. Подібно і до оцінювання усіх випадків, ця закономірність відображає узагальнений наслідок спостережень, проте не доводить факту більш інтенсивного зростання концентрацій певних забруднювальних речовин у випадку порівняння ударів по енергетиці чи НПЗ.

Незважаючи на усі переваги супутникового зондування, пов'язані із охопленням території з відсутніми наземними спостереженнями та у місцях ведення активних бойових дій, аналіз чотирьох років повномасштабного російського вторгнення показав обмежені можливості кількісної оцінки вмісту забруднювальних речовин під час короткотривалих випадків погіршення якості атмосферного повітря (особливо після ракетних та дронівих ударів). У той час як супутникове зондування теплових аномалій та підстильної поверхні дозволяє частіше й краще фіксувати наслідки ракетних ударів та екосистемних пожеж, оцінювання концентрацій забруднювальних речовин обмежується порівняно малою точністю їх зондування та недостатньою кількістю наявних супутників для цієї мети. Полярно-орбітальні супутники, що зондують лише один раз на добу у денні години, найчастіше не вловлювали переважну кількість воєнно-обумовлених джерел викидів, зокрема тих, що відбувалися внаслідок ракетних та дронівих ударів вночі і рано вранці. Якщо випадки екосистемних пожеж поблизу лінії фронту вдається фіксувати частіше, то наслідки ракетних й дронівих ударів по містах для вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі часто неможливо розрізнити на фоні наслідків антропогенних викидів, не пов'язаного із воєнними діями (автотранспорт та промисловість). Якщо додати до цих проблем часту повторюваність хмарності, яка перешкоджає супутниковому зондуванню, то реальних випадків з можливістю доказово оцінити кількісну зміну забруднення стає критично мало. Запуск геостаціонарного супутника Sentinel-4 може значно покращити фіксацію наслідків починаючи із 2026 року, проте супутниковий моніторинг якості атмосферного повітря у перші чотири роки війни назавжди залишиться проблематичним з точки зору фіксації наслідків ракетних і дронівих атак.

У попередніх наукових дослідженнях¹⁴ представлено приклади короткотривалого погіршення стану якості атмосферного повітря по об'єктам промисловості. Так як значна кількість ракетних та дронівих атак націлені на об'єкти у містах, виявлення їх наслідків лише зрідка дозволяло виокремити на фоні власного забруднення міст, особливо враховуючи значний часовий період від моменту ракетного удару до моменту зондування. Такий часовий період, часто, є довшим ніж час існування NO₂ в атмосфері, за вмістом якого можливо найточніше оцінювати наслідки подібних атак.

На [рис. 7](#) зображено приклад масованого ракетного удару по Києву, що відбувся 8 липня 2024 року з близько 10:00 до 13:00 за місцевим часом. Завдяки тому, що ракетний удар відбувся незадовго до моменту зондування супутником Sentinel-5P, його наслідки для забруднення атмосфери стає можливо кількісно оцінити. Саме під час цього ракетного удару відбулося влучання по дитячій лікарні

«Охматдит», знищення під'їзду п'ятиповерхового житлового будинку, та загалом влучання по великій кількості об'єктів у семи районах м. Київ.

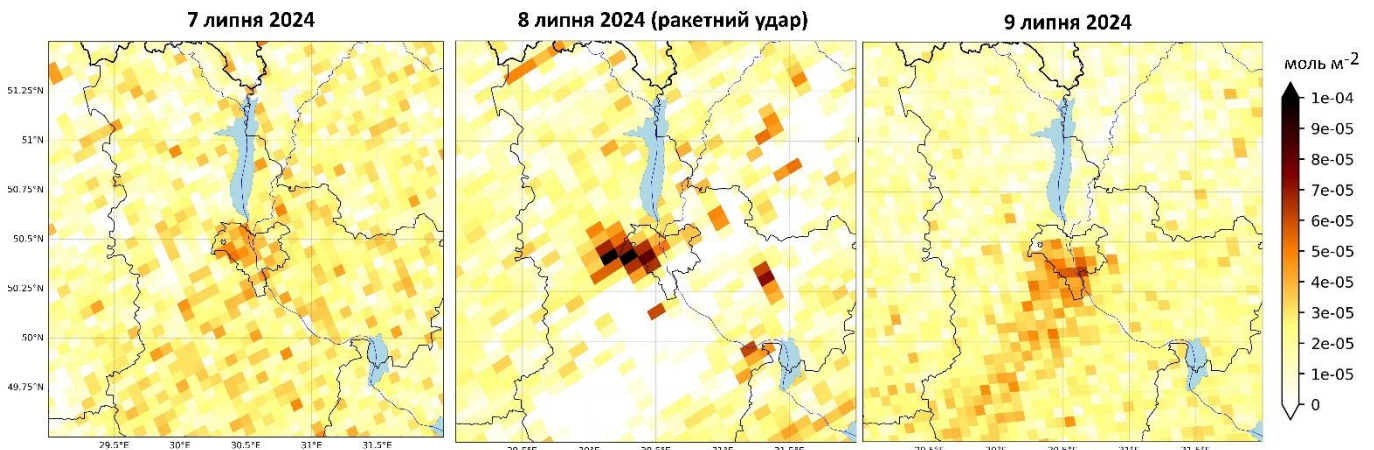


Рис. 7. Просторовий розподіл діоксиду азоту (NO_2) над Києвом 7, 8 та 9 липня 2024 року (8 липня – день ракетного удару) за даними супутникового приладу TROPOMI

За супутниковими даними наслідки ракетних та дронів атак найчастіше простежуються у вигляді короткотривалих та різких перевищень вмісту заоруднюючих речовин в атмосферному повітрі. У цей час зростання загального вмісту забруднювача, який аналізується, складає в середньому від 100 до 200% порівняно із середніми рівнями (або станом повітря попередніх днів). Переважна більшість таких наслідків фіксується для NO_2 , незначна кількість під час активного горіння дозволяє виявляти зростання CO та твердих часток. У випадку супутникового зондування тверді частки неможливо кількісно оцінити і вони опосередковано визначаються за показниками аерозольної оптичної товщі та світлопоглинального аерозольного індексу. За чотири роки повномасштабного вторгнення за супутниковими даними не вдалося зафіксувати жодного випадку зростання SO_2 та CH_2O , які б могли доказово показати наслідки ракетних чи дронів ударів. Варто зазначити, що причиною цього є згадані раніше проблеми, пов'язані із точністю супутникового зондування цих хімічних складових, частою хмарністю, та значним проміжком часу між більшістю атак та моментом зондування полярно-орбітальними супутниками. При роботі з SO_2 та CH_2O , наземний моніторинг здатен надавати набагато більше корисної інформації та доказових випадків короткотривалого зростання концентрацій цих речовин.

Зазвичай, оцінювання наслідків забруднення атмосферного повітря (за умов фіксації супутниками) після російських атак по українських містах та промислових об'єктах виглядає як нетипово високий вміст забруднювальних речовин. На прикладі [рис. 7](#) чітко простежуються у 2–2.5 рази вищі концентрації NO_2 у шлейфі забрудненого міського повітря над містом після ракетних ударів 8 липня 2024 р. у порівнянні із типовою активністю міста 7 та 9 липня 2024 р.

Під час екосистемних пожеж, супутниковий моніторинг здатний фіксувати короткотривалі перевищення вмісту CO та перенесення шлейфів забрудненого повітря від місць горіння. На [рис. 8](#) зображено приклад поширення високих рівнів CO від екосистемних пожеж 30 липня 2025 р., спричинені обстрілами вздовж лінії фронту.

Очевидно, що чутливість виявлення перевищень загального вмісту CO у вертикальному стовпі атмосферного повітря на фоні однорідного просторового розподілу, яким характеризується ця речовина, залежить від інтенсивності і обсягів горіння біомаси. Через це, більшість зафіксованих екосистемних пожеж не дозволяють виявляти зміни вмісту усього вертикального стовпа в атмосфері. За умов, коли фонові значення CO варіюють в межах від 0.023 до 0.035 моль/м², чітко простежити наслідки пожеж для забруднення повітря можна за умови, що загальний вміст CO перевищує 0.040–0.045 моль/м² (залежно від сезону року). Короткотривалі перевищення вмісту CO вздовж лінії фронту під час екосистемних пожеж складають приблизно 30–70% відносно фонових значень на прилеглих територіях, що не охоплені наслідками забруднення. Під час особливо потужних пожеж, CO може перевищувати 0.065 моль/м², тобто бути на 100–150% вищим за фонові показники.

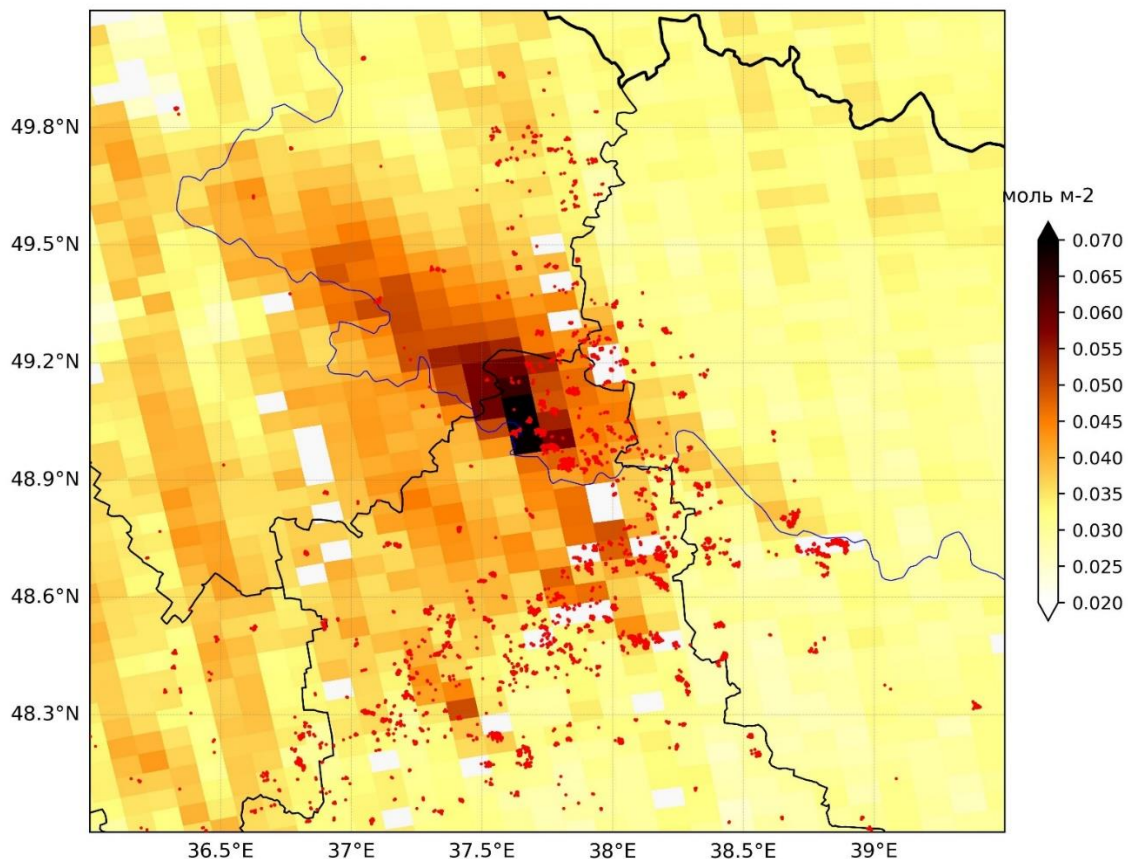
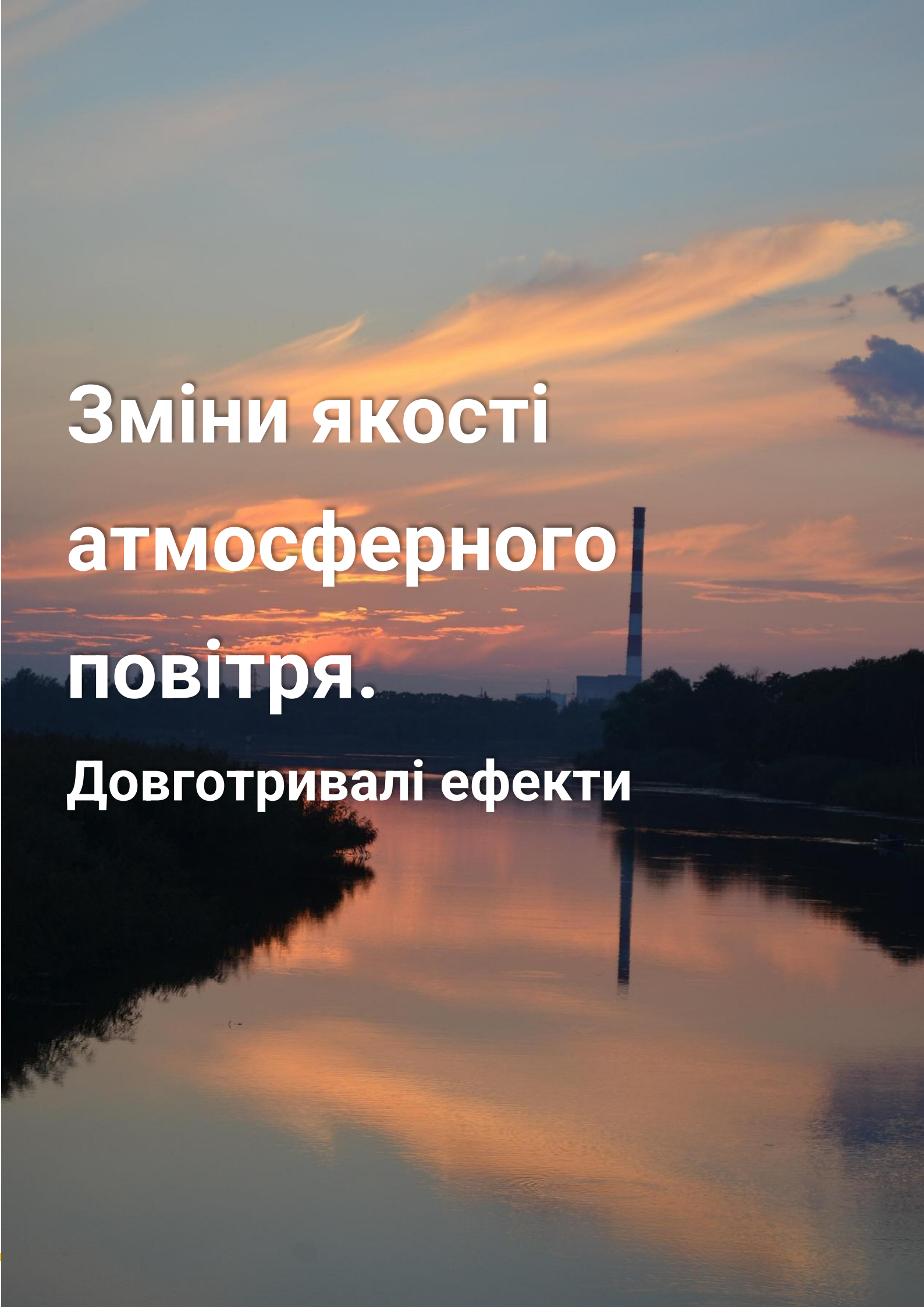


Рис. 8. Просторовий розподіл монооксиду вуглецю (CO) за даними супутникового приладу TROPOMI та теплові аномалії за даними супутникових приладів MODIS і VIIRS вздовж лінії фронту у Харківській, Луганській та Донецькій областях 30 липня 2025 року

A sunset over a river with a factory chimney in the background. The sky is filled with orange and yellow clouds, and the water reflects the colors. A tall, dark chimney stands on the right side of the river, with a building visible behind it. The text is overlaid on the image in white, bold, sans-serif font.

**Зміни якості
атмосферного
повітря.
Довготривалі ефекти**

Попередньо розглянуті короткотривалі ефекти воєнних дій на якість атмосферного повітря є односпрямованими й відображають погіршення якості атмосферного повітря одразу після ракетних та дронівих ударів. Проте, у масштабах кількох років, зміна якості атмосферного повітря, що відображає довготривалі ефекти війни, є набагато складнішою та містить наслідки сукупної дії великої кількості процесів, які часто є протилежними за впливом на рівні забруднення. У доповнення до значної повторюваності короткотривалих епізодів високого забруднення внаслідок ракетних ударів і екосистемних пожеж вздовж лінії фронту починають додаватися соціально-економічні наслідки. Серед основних воєнно-обумовлених причин, що сприяють зростанню концентрацій забруднювальних речовин є:

- ракетні та дроніві удари, вибухи внаслідок диверсій;
- екосистемні пожежі після обстрілів;
- ураження військової техніки та інших об'єктів в безпосередній зоні ведення активних бойових дій;
- зміна у використанні типів палива;
- зростання викидів автотранспорту у місцях куди відбулося внутрішнє переміщення населення;
- робота генераторів під час вимкнення електроенергії;
- зростання викидів від роботи військової техніки поблизу лінії фронту; та ін.

У той же час спостерігаються процеси, що призводять до зменшення викидів забруднювальних речовин, зокрема:

- зупинка в роботі та знищення промислових підприємств;
- зменшення викидів автотранспорту внаслідок виїзду населення;
- зменшення сезонного спалювання рослинних решток на полях внаслідок посилення відповідальності;
- тимчасова вимушена зупинка виробничих процесів під час блекаутів.

Більшість із перелічених процесів відбуваються одночасно, ще й на фоні зміни переважаючих метеорологічних умов, які визначають сприятливість до виведення забруднювальних речовин з атмосфери. Це робить довготривалі ефекти воєнних дій на якість атмосферного повітря вкрай складними для аналізу і неоднорідними за впливом.

Дослідження концентрацій забруднювальних речовин за даними наземного моніторингу мережі гідрометеорологічних організацій показало локальність змін забруднення за період повномасштабного російського вторгнення, залежність від економічної ролі міст й наявної промисловості, віддаленості від лінії фронту, та відмінність у тенденціях для різних хімічних складових.

На основі досліджених тенденцій рівнів приземного забруднення атмосфери можна виокремити три основні довготривалі ефекти воєнних дій:

- 1) зростання забруднення атмосферного повітря у прифронтових містах, безпосередньо пов'язаного із активними воєнними діями;
- 2) зменшення середніх рівнів забруднення у великих промислових містах переважно внаслідок руйнування підприємств;
- 3) перерозподіл у концентраціях забруднювальних речовин у тилкових містах.

Забруднення атмосфери більшості великих українських міст формувалося основними забруднювальними речовинами – CO, NO₂ та пилом¹⁵. Чотири роки повномасштабного російського вторгнення (2022–2026 рр.) з регулярними ракетними ударами по промисловості відобразилося у переважному зменшенні (з окремими винятками) концентрацій цих речовин у таких містах як Горішні Плавні, Дніпро, Запоріжжя, Київ, Кременчук, Кривий Ріг, Одеса, Харків, та ін. (див. [рис. 9, 11, 13](#)). Натомість у Краматорську та Слов'янську, розташованих близько до активних бойових дій, концентрації CO, NO₂ та пилу зросли в середньому на 12–40% залежно від міста і забруднювальної речовини. Зростання NO₂ та пилу у широких межах від 15% до 87% також фіксувалося у містах близьких до лінії фронту й прикордоння, зокрема Херсоні, Сумах та Чернігові. Будучи близькими за джерелами викидів, сажа ([рис. 14](#)) та NO ([рис. 12](#)) багато у чому повторили тенденції характерні для пилу й NO₂ відповідно, змінюючись у межах від -25% до 35%.

У більш віддалених від лінії фронту та тилкових містах, зміна концентрацій CO, NO₂ та пилу змінювалися неоднорідно. Зафіксовано зростання CO у Житомирі, Івано-Франківську, Кропивницькому і Тернополі; зростання NO₂ у Білій Церкві й Полтаві; та зростання пилу в Житомирі, Обухові, Ужгороді, та ін. Тенденції до зменшення концентрацій CO мають місце у Білій Церкві, Броварах, Обухові, Ужгороді та Хмельницькому; зменшення NO₂ у Вінниці, Обухові, Хмельницькому, Черкасах й Чернівцях; та зменшення пилу в Білій Церкві, Тернополі, Чернівцях, та низки інших міст.

На території України формування концентрацій SO₂ було пов'язано із роботою ТЕС/ТЕЦ та роботою металургійних, коксохімічних і хімічних підприємств. За час повномасштабного російського вторгнення виявлено три основні закономірності зміни концентрацій SO₂ ([рис. 10](#)). Перша закономірність – це зменшення SO₂ у низці промислових міст на 11–16%, де історично вміст був високим, зокрема у Дніпрі, Кам'янському, Одесі, Слов'янську. Друга закономірність – це зростання на 29–63% в інших промислових містах (Кривий Ріг, Світловодськ), зокрема й тих, що розташовані ближче до прикордоння або лінії фронту (Суми, Харків, Херсон). Третя закономірність – це суттєве зменшення SO₂ в середньому на 30–60% у містах Західної України, зокрема Івано-Франківську, Львові, Хмельницькому та Чернівцях.

Винятком є Луцьк та Ужгород, де SO_2 зріс відносно базового періоду 2019–2021 рр. Таким чином, має місце накладання різноспрямованих наслідків, пов'язаних зі знищенням ТЕС/ТЕЦ і руйнуванням промислових підприємств (призводить до зменшення SO_2), та зростання роботи генераторів й використанням типів палива з вищим вмістом забруднюючих речовин (призводить до зростання SO_2).

Концентрації $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ за час повномасштабного вторгнення зросли в середньому на 10–15% у містах, що зазнають регулярних обстрілів або розташованих близько до лінії активних бойових дій, зокрема у Краматорську, Слов'янську, Харкові та Херсоні (винятком є Луцьк, де зміни тенденції $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ймовірно не пов'язані із воєнними діями) (див. [рис. 15](#)). У великих промислових містах $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ зменшилося в середньому на 20–40%.

У порівнянні з $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, тенденції CH_2O за час повномасштабного російського вторгнення значно більш неоднорідні та важче піддаються аналізу ключових чинників у їх формуванні ([рис. 16](#)). У містах близьких до лінії фронту або прикордоння (Запоріжжя, Ізмаїл, Краматорськ, Слов'янськ, Суми, Херсон) має місце зростання CH_2O в межах 12–35%. У промислових містах на більшій відстані від зони активних бойових дій спостерігалось переважно зменшення концентрацій CH_2O (Дніпро, Кременчук, Кривий Ріг, Миколаїв, Одеса, та ін.), проте наявні й зворотні тенденції (як наприклад у Світловодську). У тилкових містах закономірності вкрай неоднорідні.

У промислових містах з вищими концентраціями NH_3 , спостерігалось їх зменшення за час повномасштабного вторгнення на 10–25%, зокрема у Кам'янському, Києві, Кременчуці, Кривому Розі та Черкасах ([рис. 17](#)), що свідчить про спад промислового виробництва. Незначне зростання NH_3 у Рівному, Полтаві й Харкові, та більш інтенсивне у Вінниці, не вдалося однозначно пов'язати із наслідком воєнних дій.

Серед інших специфічних забруднювальних речовин, у промислових містах на віддалі від лінії фронту зафіксовано також зменшення H_2S в межах 16–42%, зокрема у Кам'янському, Києві, Кривому Розі та Одесі ([рис. 18](#)). У Черкасах та Запоріжжі концентрації H_2S зросли. Із 6 міст із наявними даними HCl , зменшення концентрацій за час повномасштабного вторгнення спостерігалось тільки у Чернівцях ([рис. 19](#)), тоді як у Запоріжжі, Києві, Полтаві, Рівному та Хмельницькому виявлено зростання в межах 8–32%. Для концентрацій HF виявлено одна із найбільш значущих тенденцій, пов'язана із зростанням на 117% у Слов'янську ([рис. 20](#)), що може бути наслідком виключно впливу воєнних дій. Більше ніж на 50% зафіксовано зменшення HF у Києві та Чернівцях.

CO

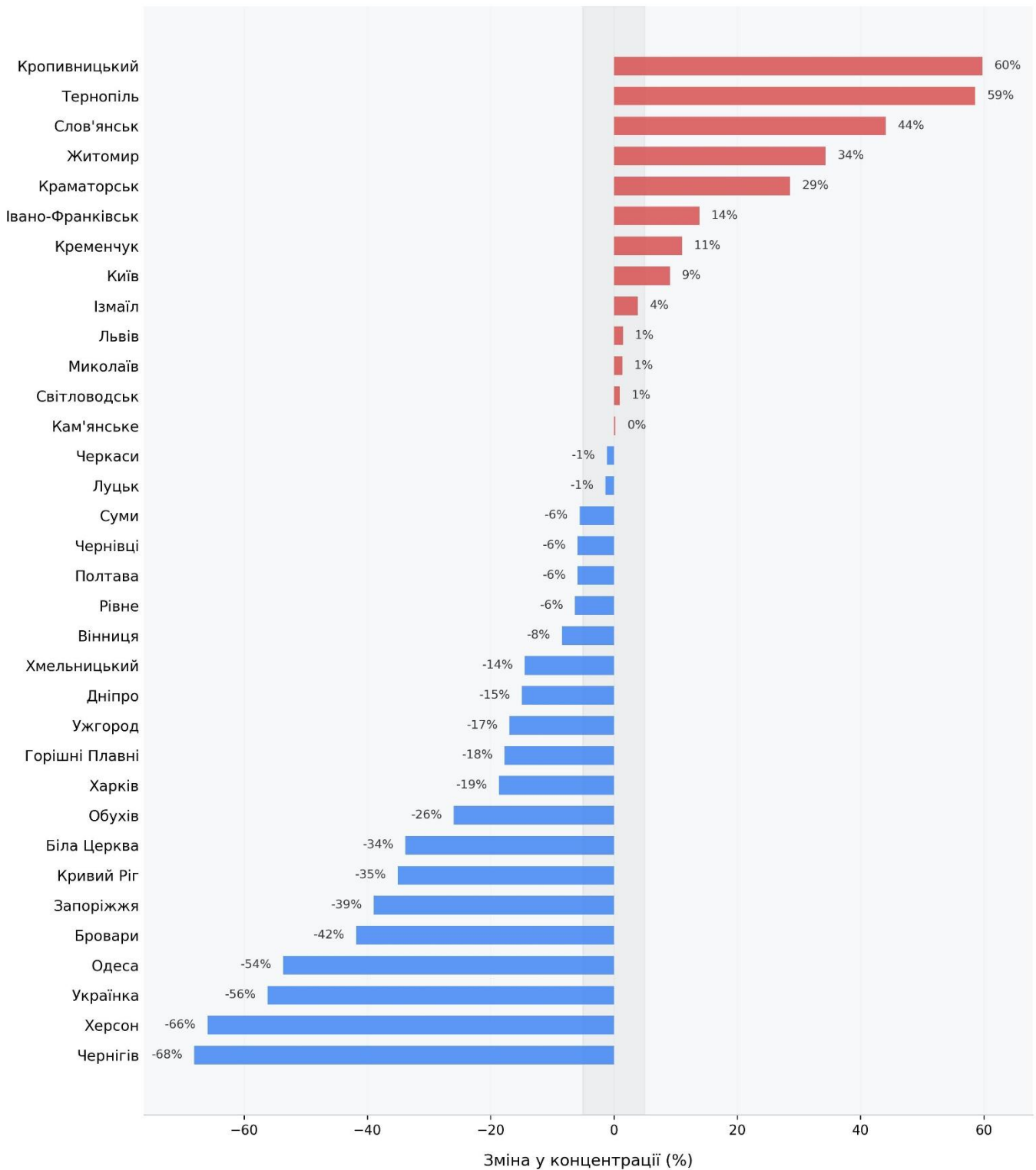


Рис. 9. Відсоткова зміна середніх концентрацій моноξειду вуглецю (CO) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

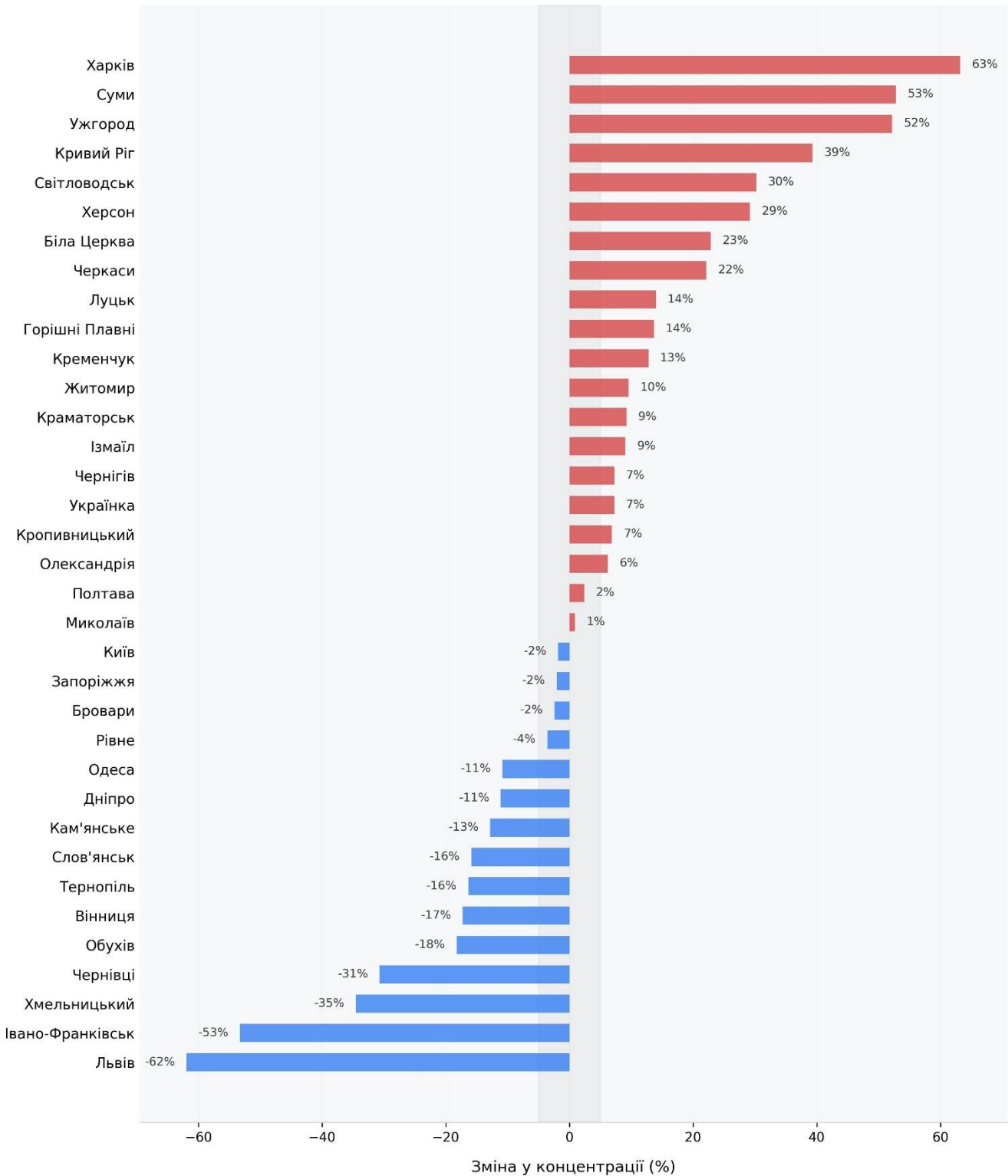
SO₂

Рис. 10. Відсоткова зміна середніх концентрацій діоксиду сірки (SO₂) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

NO₂

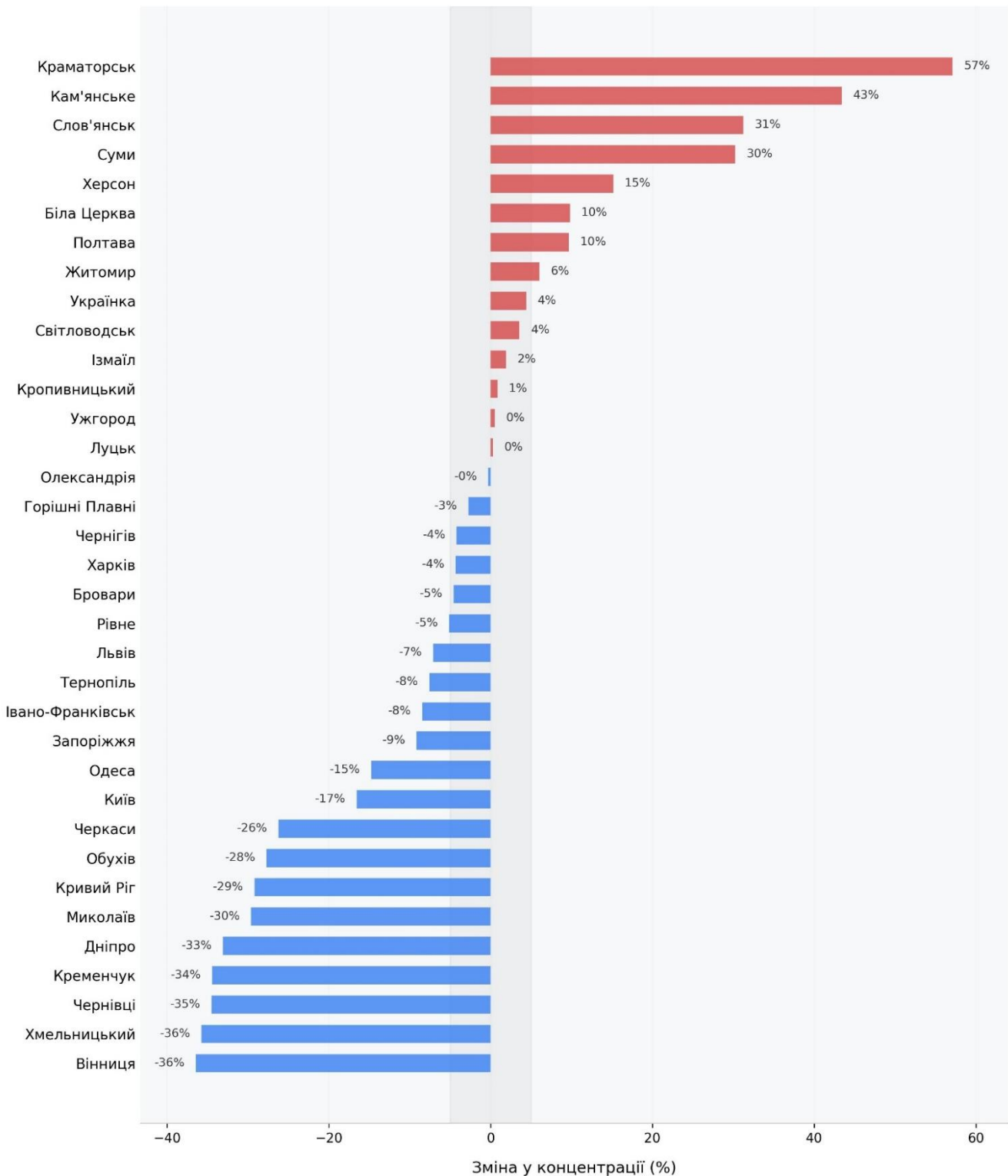


Рис. 11. Відсоткова зміна середніх концентрацій діоксиду азоту (NO₂) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

NO

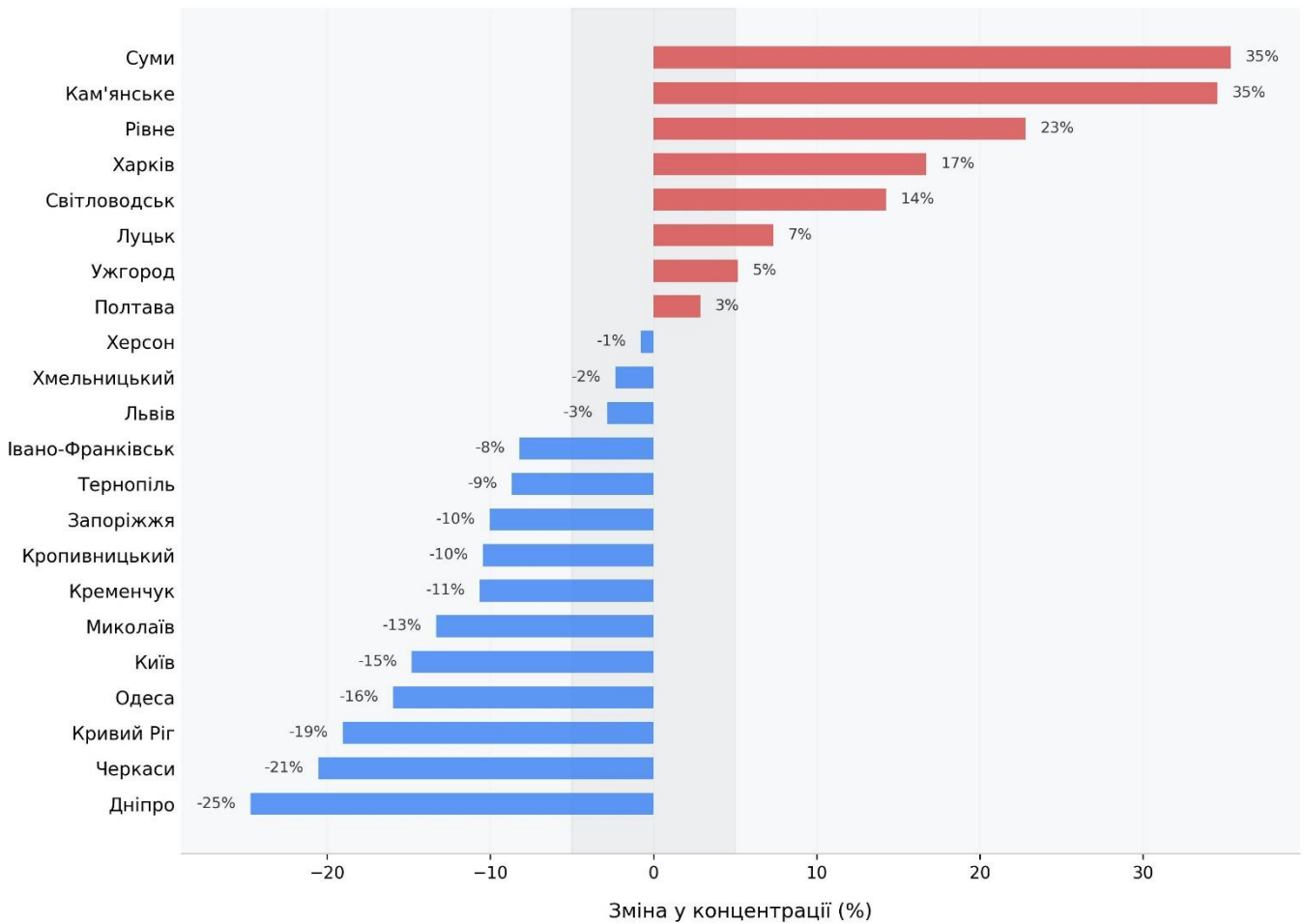


Рис. 12. Відсоткова зміна середніх концентрацій оксиду азоту (NO) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

Пил

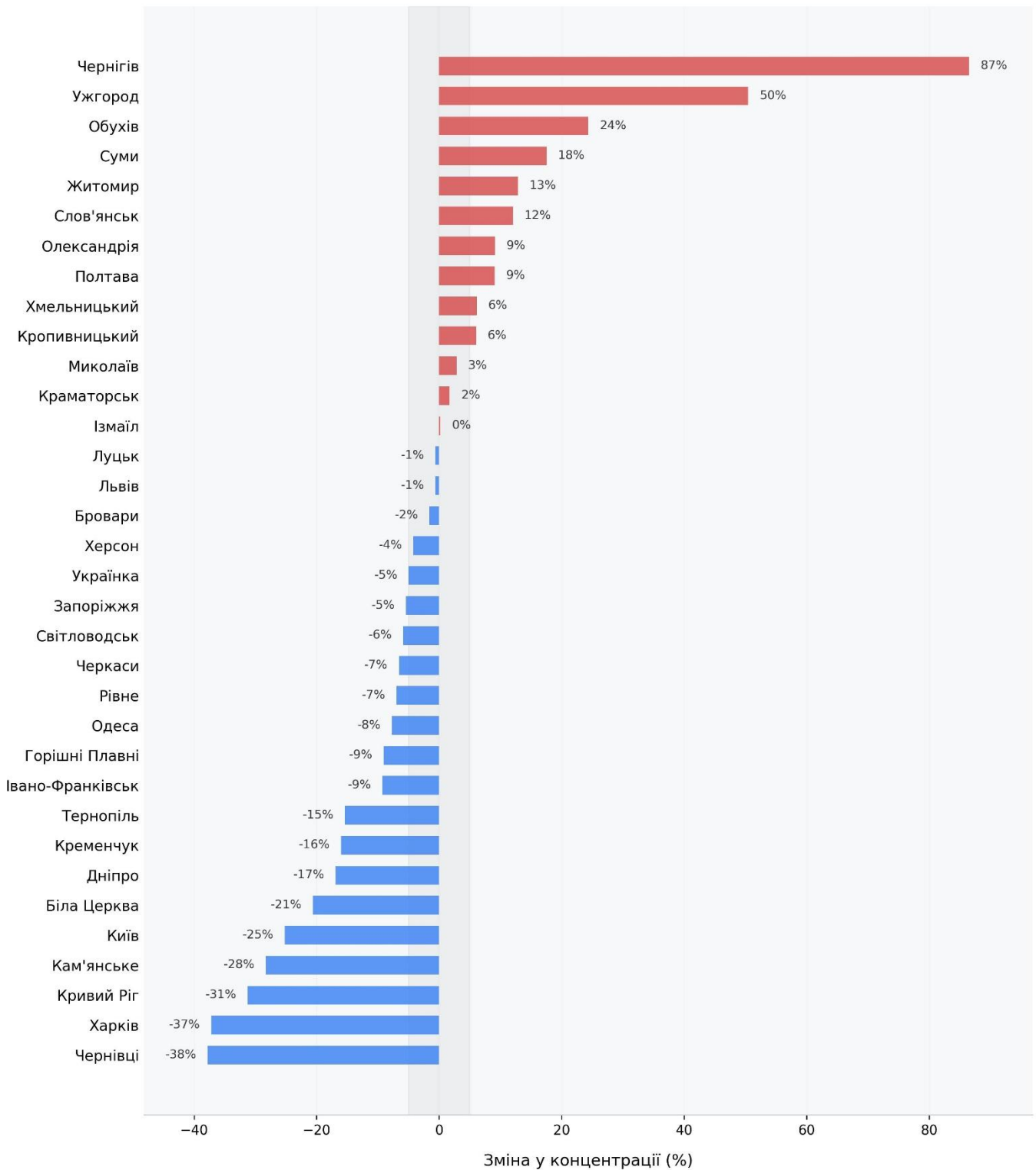


Рис. 13. Відсоткова зміна середніх концентрацій пилу в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

Сажа

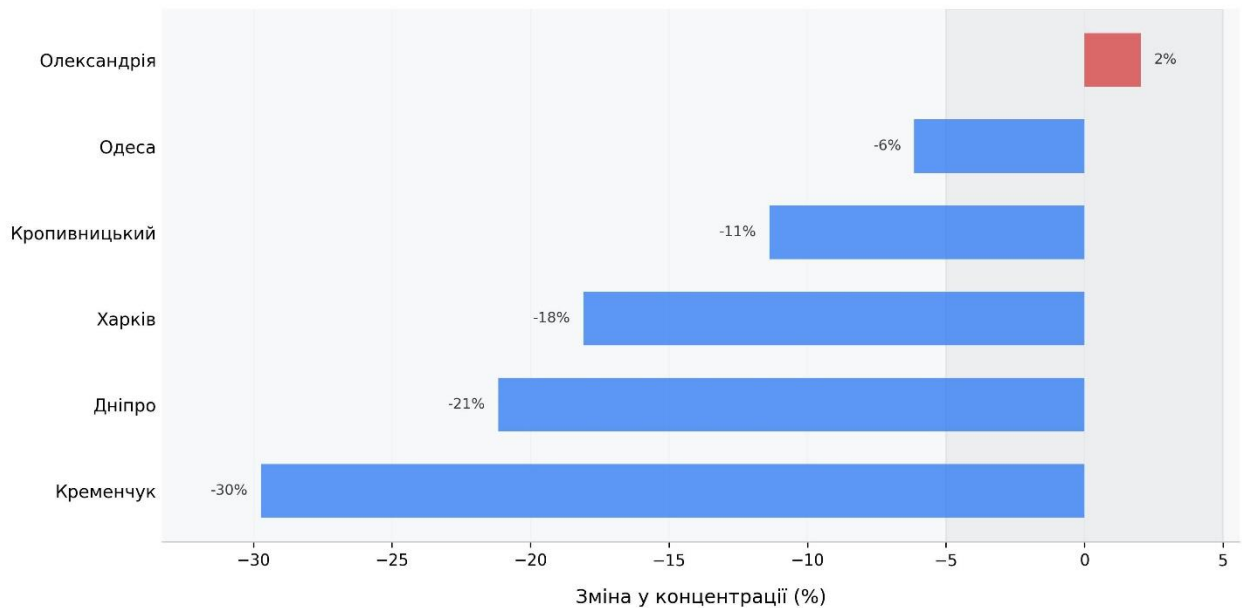


Рис. 14. Відсоткова зміна середніх концентрацій сажі в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

C_6H_5OH

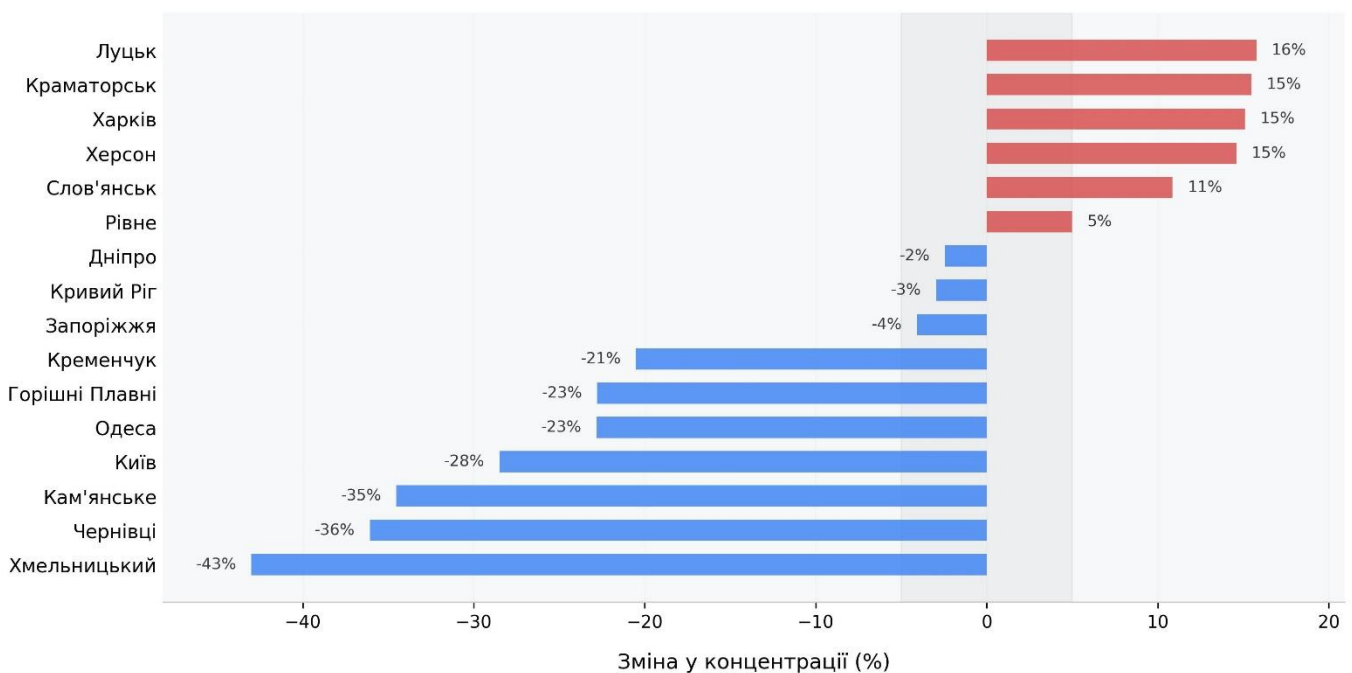


Рис. 15. Відсоткова зміна середніх концентрацій фенолу (C_6H_5OH) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

CH₂O

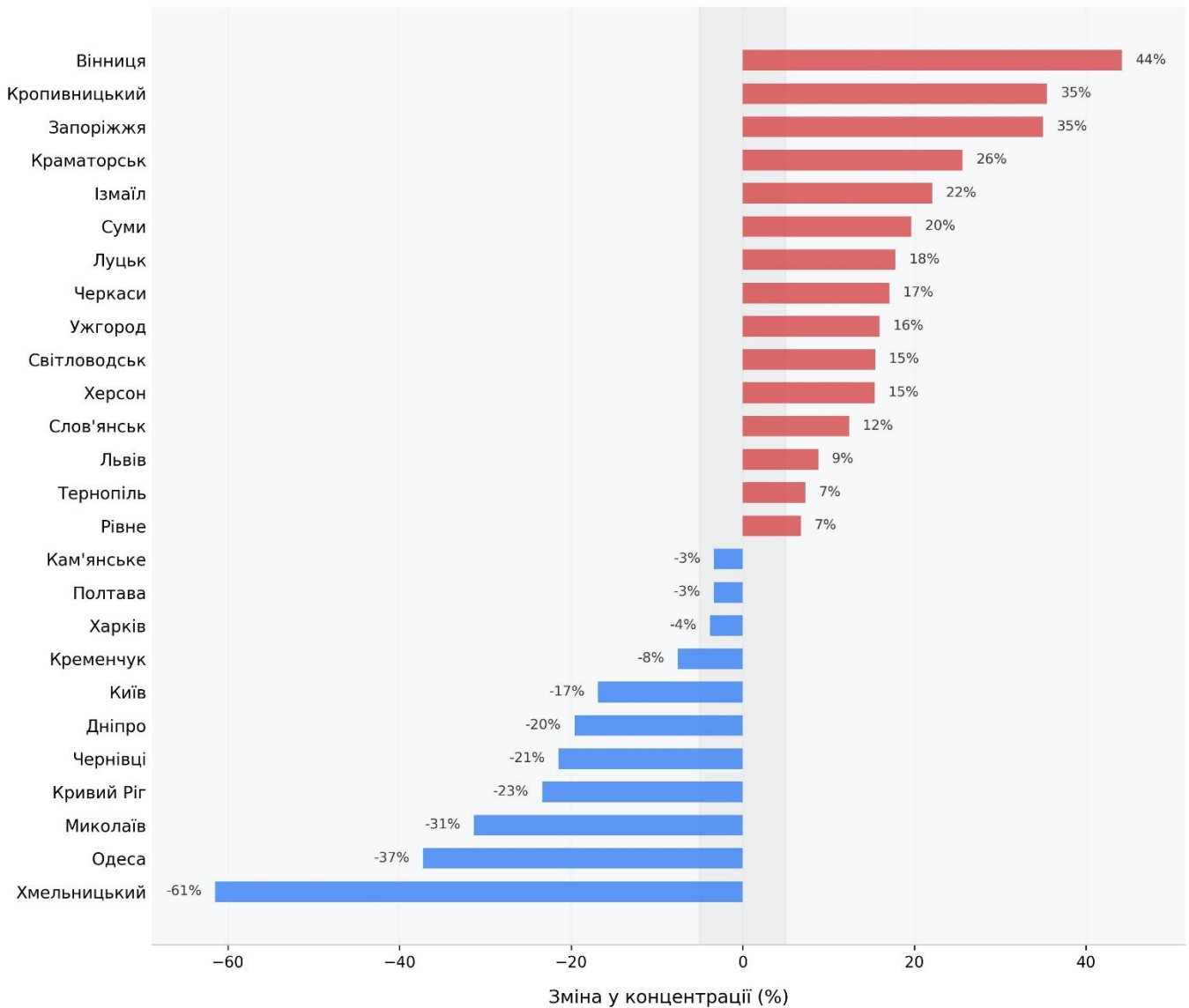


Рис. 16. Відсоткова зміна середніх концентрацій формальдегіду (CH₂O) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

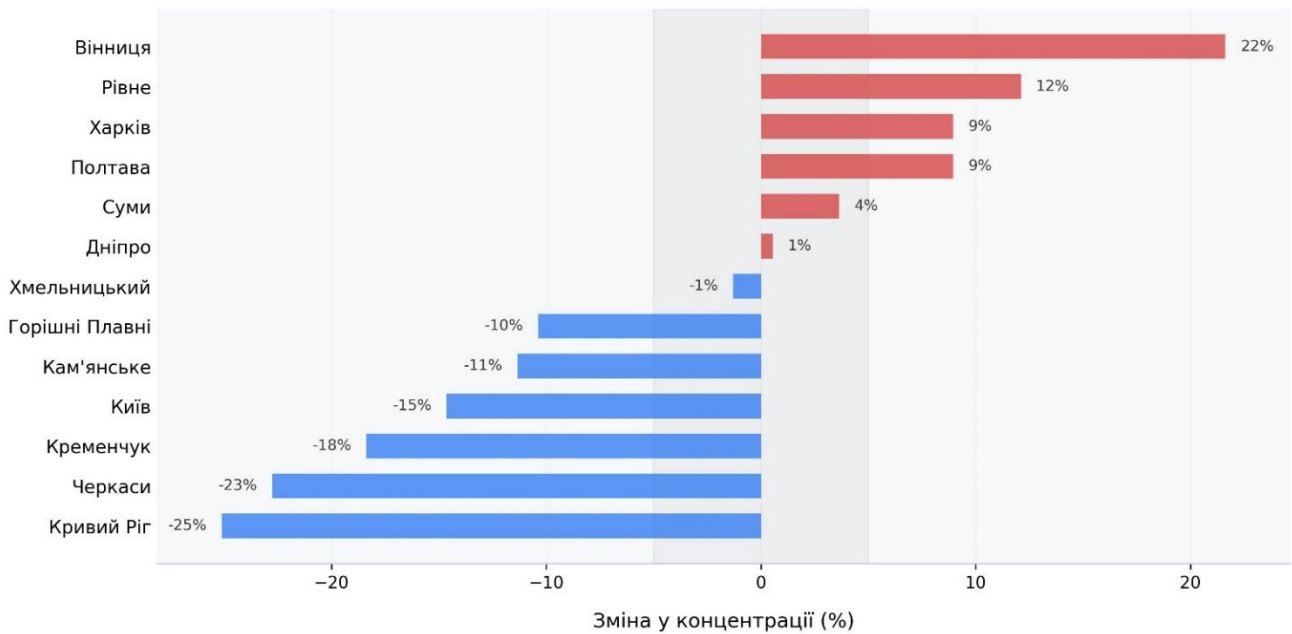
NH₃

Рис. 17. Відсоткова зміна середніх концентрацій аміаку (NH₃) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

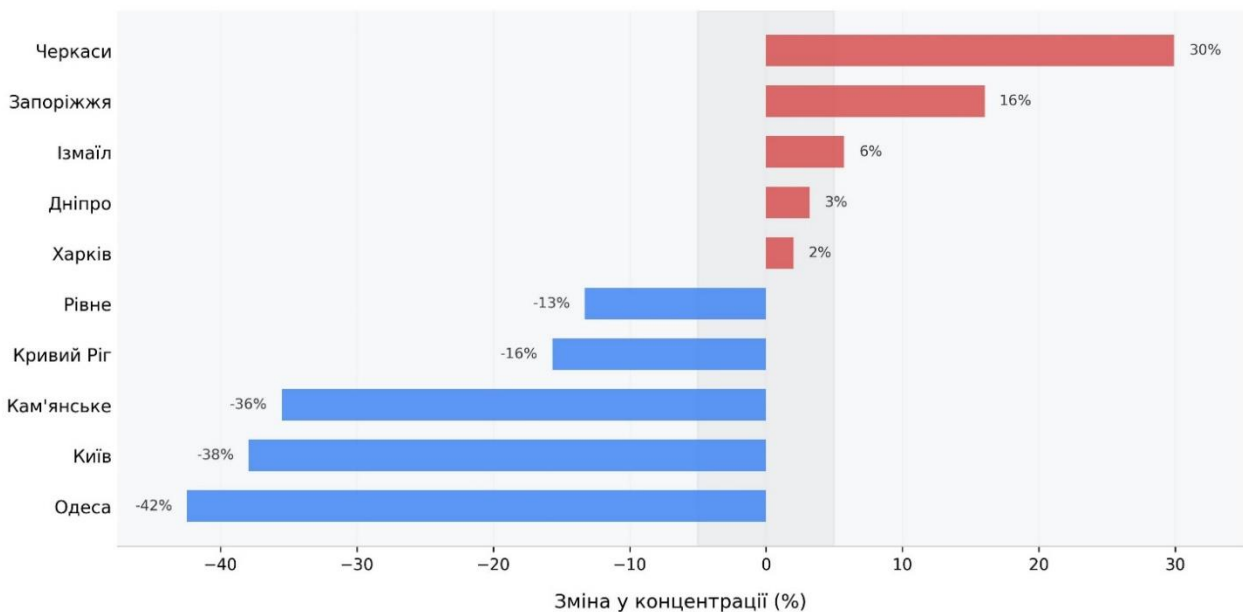
H₂S

Рис. 18. Відсоткова зміна середніх концентрацій сірководню (H₂S) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

НСІ

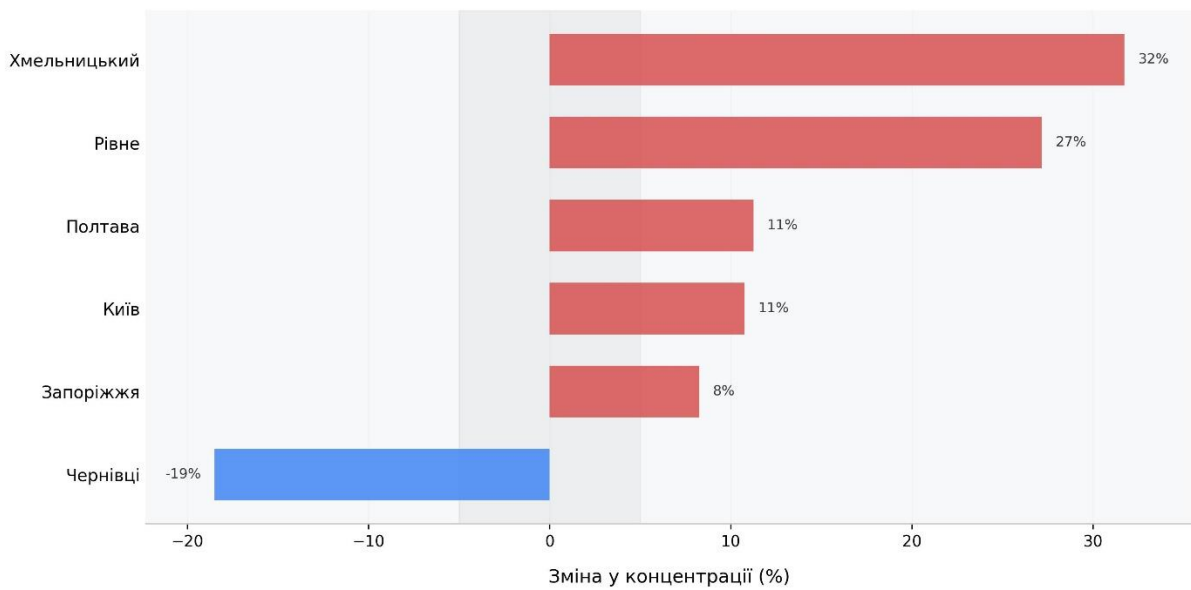


Рис. 19. Відсоткова зміна середніх концентрацій хлороводню (НСІ) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

HF

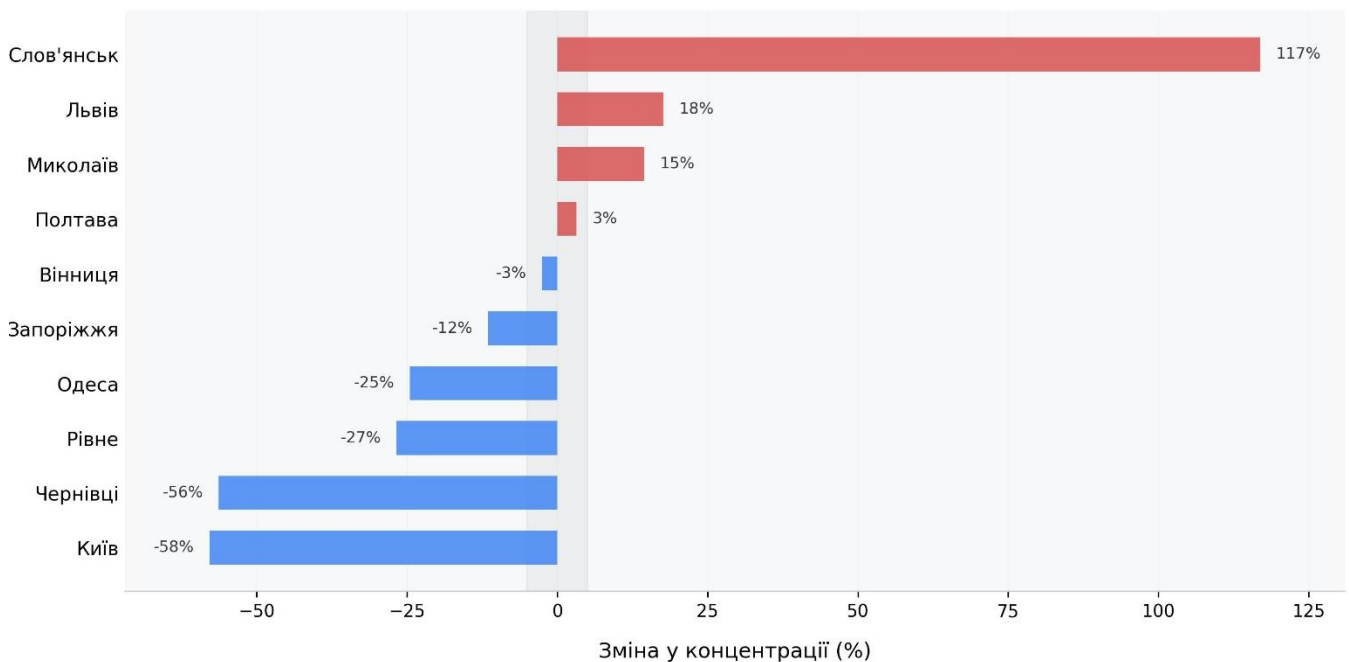


Рис. 20. Відсоткова зміна середніх концентрацій фтороводню (HF) в атмосферному повітрі за даними наземного моніторингу за час повномасштабного вторгнення (березень 2022 – грудень 2025) у порівнянні із середніми концентраціями базового періоду (2019–2021)*

*Застереження до інтерпретації результатів: отримані значення на графіку відображають узагальнені зміни локального забруднення в межах розташування станцій моніторингу, що може не узгоджуватися із загальними закономірностями для усього міста або його окремих районів

Аналіз довготривалих ефектів воєнних дій для якості атмосферного повітря за даними супутника Sentinel-5P обмежується точністю відновлення вмісту різних хімічних складових. Для NO_2 , CO , SO_2 та CH_2O проаналізовано загальні зміни за чотири роки повномасштабного російського вторгнення. У зв'язку із «шумом», що присутній в супутникових даних для SO_2 та CH_2O , ці забруднювальні речовини не включені до аналізу сезонного розподілу по роках.

Оцінювання загальної якості атмосферного повітря за даними супутникового зондування найкраще проводити за вмістом NO_2 , що пов'язано із трьома основними чинниками. Перший – це формування поля забруднення NO_2 від переважної більшості джерел викидів^{16,17}. Другий – це краща точність зондування у порівнянні з іншими газоподібними забруднювальними речовинами^{18,19}. Третій – це відносно короткий час існування NO_2 в атмосфері²⁰, що призводить до локалізацію максимумів навколо основних джерел викидів та відсутність згладженого просторового розподілу при усередненні (як наприклад, для CO). На [рис. 21](#) представлено зміна загального вмісту NO_2 у вертикальному стовпі атмосферного повітря за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

Варто звернути увагу, що на картосхемах розподілу змін NO_2 для кожного сезону від року до року присутні локальні осередки інтенсивного зменшення вмісту. Ці «стабільні» осередки, які незмінні у положенні із року в рік для певного сезону і не приурочені до міст чи промислових районів, вказують не на наслідок воєнних дій, а на існування у базовий період (2019–2021 рр.) випадку потужних викидів – найчастіше масштабних екосистемних пожеж. Під час розрахунку зміни вмісту NO_2 , вони прослідковуються як локалізації зі зменшенням вмісту більше ніж на 50%. Такі осередки не повинні враховуватися у загальні висновки з метою оцінювання впливу воєнних дій на якість атмосферного повітря.

Одразу після початку повномасштабного російського вторгнення, відбувся масштабний перерозподіл джерел викидів. Серед основних наслідків було й суттєве (більше 30%) зменшення вмісту NO_2 у Києві та низці інших міст через зупинку роботи промисловості та відтік населення, що призвело до зменшення викидів від автотранспорту. Такі зміни були особливо відчутними навесні та влітку 2022 р.

Навесні 2022 р. NO_2 зріс на 10-15% у місцях активних бойових зіткнень та вздовж лінії фронту, що почала формуватися від південних до північно-східних районів території України.

Проте, найсуттєвіші зміни вмісту NO_2 в атмосфері відбулися на російській території на північний-схід від державного кордону України. NO_2 зріс більше ніж на

50%, що було пов'язано із посиленням військової активності для проведення атак на територію України. Такі інтенсивні зміни пов'язані саме із воєнною активністю, адже були відсутні передумови до зростання вмісту NO_2 у зв'язку із екосистемними пожежами чи несприятливими метеорологічними умовами. Подібне підвищення вмісту NO_2 у прилеглих до території України районах фіксувалося регулярно, і характеризувалося особливо значним зростанням концентрацій навесні та восени впродовж 2022–2024 рр., влітку 2023 р. та взимку 2022/23, 2023/24 та 2025/26 рр.

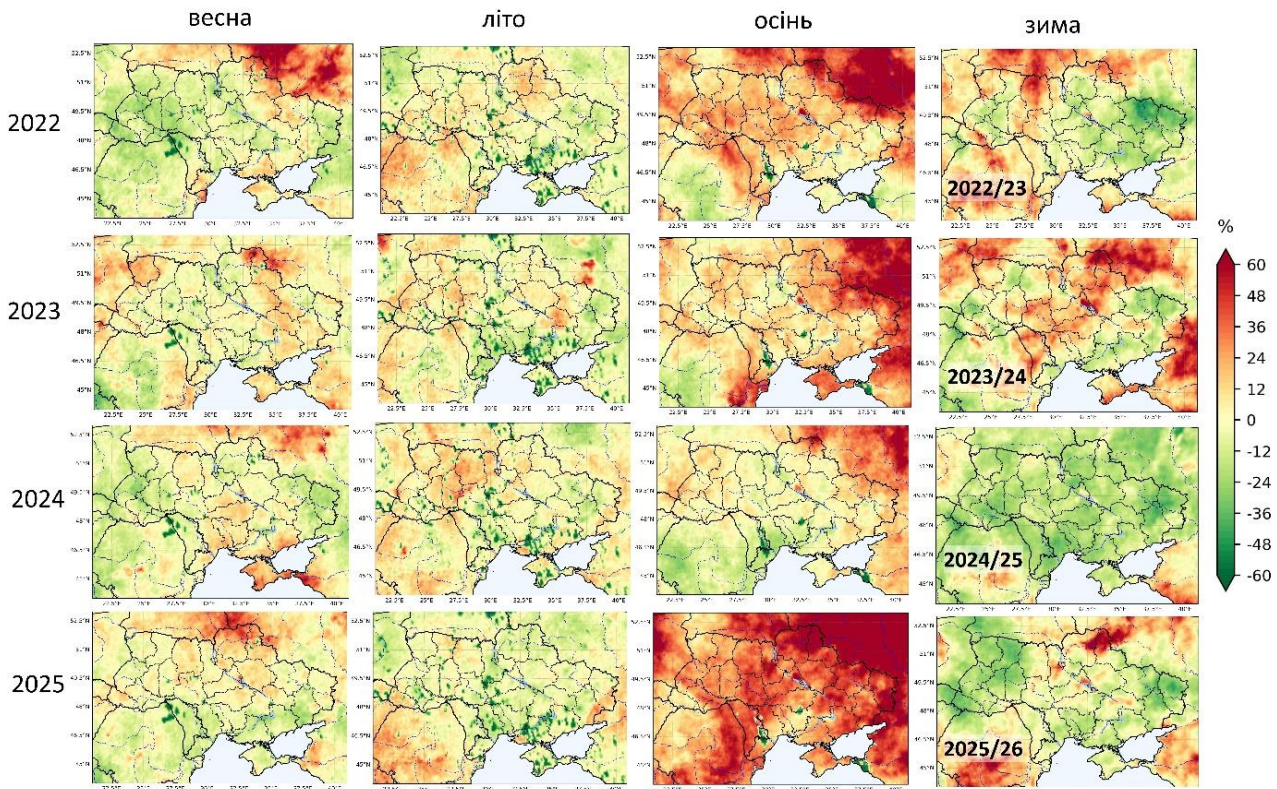


Рис. 21. Відсоткова зміна середнього за сезон загального вмісту діоксиду азоту (NO_2) в атмосферному повітрі від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середнім вмістом відповідного сезону за базовий період (2019–2021)

Зі стабілізацією лінії фронту, вздовж її розташування почали спостерігатися два протилежні за впливом процеси – зростання вмісту NO_2 внаслідок численних екосистемних пожеж і вибухів, та зменшення вмісту через руйнування промислових підприємств і повного знищення міст поблизу лінії фронту. На фоні постійної зміни тенденцій до зростання чи зменшення вмісту NO_2 в окремі періоди, сукупний вплив за чотири роки та масштаби економічного руйнування вздовж лінії фронту переважив за впливом додаткове надходження NO_2 від воєнно-обумовлених джерел викидів.

Вплив метеорологічних умов подекуди мав визначальний вплив на формування забруднення. Так наприклад, регіональне підвищення вмісту NO_2 восени 2025 р. було наслідком нижчих температур та висоти граничного шару

атмосфери у порівнянні з базовим періодом, що призвело до несприятливих умов для хімічного перетворення і розсіювання NO_2 .

На відміну від NO_2 , загальний вміст CO у вертикальному стовпі атмосферного повітря за даними супутника Sentinel-5P не дозволяє настільки чітко фіксувати наслідки довготривалих змін. У зв'язку із тим, що існування CO атмосфері охоплює місяці²¹, викиди встигають поширюватися на значну відстань, рівномірно розповсюджуючись в просторі. Вже при сезонному усередненні, короткотривалі локальні максимуми CO повністю згладжуються, і стає можливим виокремити лише регіональні фонові зміни, які не пов'язані із воєнними діями. На [рис. 22](#) представлено зміна загального вмісту CO у вертикальному стовпі атмосферного повітря за сезонами під час періоду повномасштабного російського вторгнення.

За час повномасштабного вторгнення, загальний вміст CO зазнав регіонального зменшення від 5 до 20%, особливо навесні та в осінньо-зимовий сезон 2022 та 2025 рр. Зростання CO спостерігалось переважно в літні сезони зі значеннями до 10% відносно базового періоду (2019–2021 рр.). Незважаючи на відсутність можливості якісної фіксації воєнно-обумовлених довготривалих змін CO за даними супутникових спостережень, варіації регіонального фону є важливими для врахування і правильних висновків, адже саме на цей фон накладаються більш короткотривалі військові впливи.

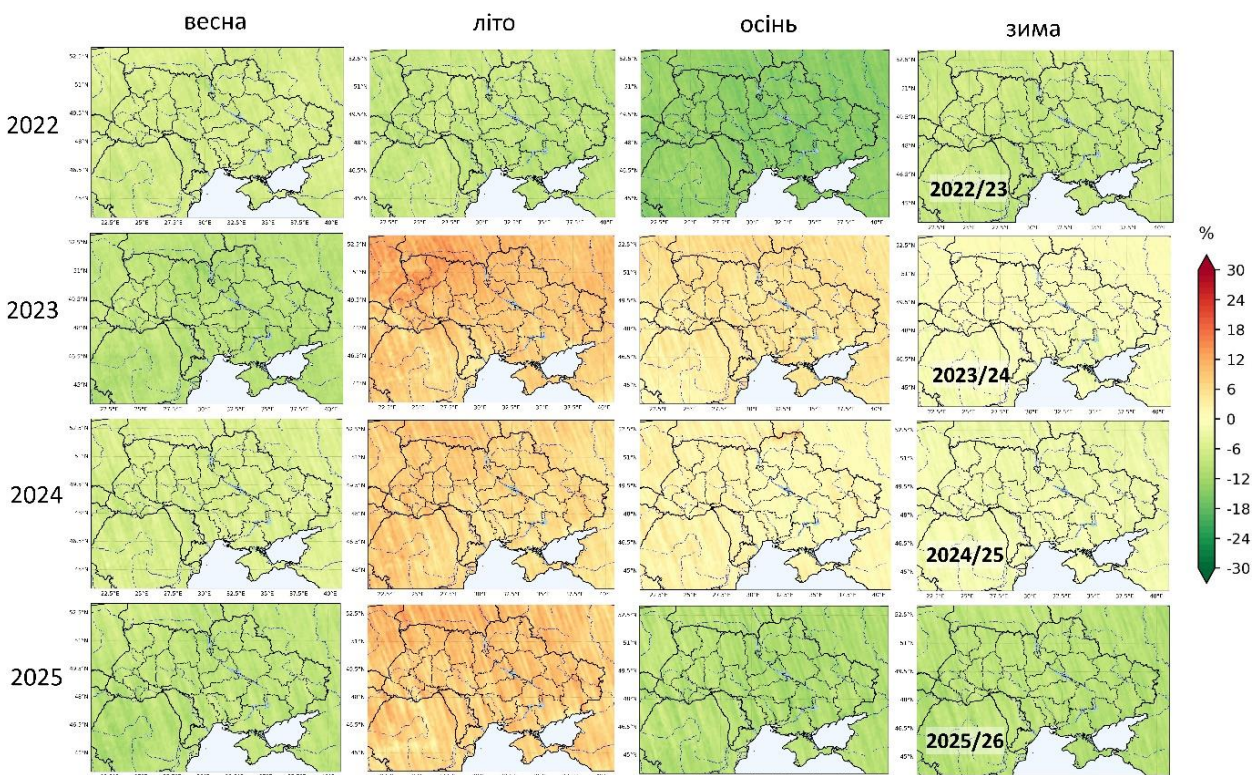


Рис. 22. Відсоткова зміна середнього за сезон загального вмісту монооксиду вуглецю (CO) в атмосферному повітрі від початку повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середнім вмістом відповідного сезону за базовий період (2019–2021)

Таким чином, за чотири роки повномасштабного російського вторгнення (2022–2026 рр.), регіональні довготривалі зміни вмісту забруднювальних речовин в атмосферному повітрі відображають як зміни внаслідок воєнних дій, так і значущий вплив метеорологічних умов. На [рис. 23](#) представлені зміна загального вмісту NO_2 , CO , CH_2O і SO_2 у вертикальному стовпі атмосферного повітря за період повномасштабного російського вторгнення відносно середнього вмісту базового періоду.

Загальний вміст NO_2 відображає, в першу чергу, наслідки тотального знищення міст і підприємств вздовж лінії фронту та загальне зменшення вмісту у більшості областей території України через руйнування та зупинки у роботі промисловості. На цьому фоні зростання NO_2 зафіксоване локально переважно у Черкаській, Полтавській та Дніпропетровській областях. Воєнна активність на прилеглих до України російських територіях, а також посилення в останні роки обстрілів на півночі Чернігівської та Сумської областей, призвели до інтенсивного зростання вмісту NO_2 .

Загальний вміст CO зменшився за рахунок чинників, не пов'язаних із воєнними діями, а як наслідок загального регіонального зменшення та впливом переважаючих метеорологічних умов. Маріуполь зі знищеною Азовсталлю є єдиною локацією на карті України, де довготривалі ефекти CO за даними супутникових спостережень відображають наслідки воєнних дій, а саме зменшення середнього вмісту близько 8% на фоні регіональних 2-3%.

Супутникові дані CH_2O вказують на 10-40% зменшення загального вмісту за рахунок більш сприятливих переважаючих метеорологічних умов. Наслідки повномасштабного російського вторгнення на довготривалі ефекти для CH_2O можна прослідкувати лише у Києві та у містах Донецької й Луганської областей, де такого зменшення не спостерігалось. Проте, варто з обережністю ставитися до висновків на основі супутникових даних CH_2O , чутливість яких не дозволяє якісно зафіксувати локальні зміни викидів, і відображають переважно загальний стан атмосферного повітря, у тому числі й наслідок у зміні тенденцій процесів його хімічного перетворення, що відбувається вище приземного шару. Зокрема, на локальному рівні частка викидів CH_2O може зростати, що пов'язана із масовим використанням дизель-генераторів в періоди проблем із постачанням електроенергії.

Загальний вміст SO_2 за даними супутникових спостережень характеризується відносно слабким сигналом та значного внеску «шуму» під час відновлення вмісту. Саме цей чинник формує надзвичайно плямисту структуру розподілу SO_2 . У цьому випадку доцільність висновків може бути зроблена лише над територіями із високими концентраціями SO_2 до або після початку повномасштабного вторгнення. Єдиним регіоном території України, де рівень

сигналу перевищує компоненту «шуму» під час аналізу багаторічних змін – це Донецька область. На більшій частині території області зменшення вмісту SO_2 сягнуло 30-50% через руйнування об'єктів енергетики та промислових підприємств, що працювали на вугіллі.

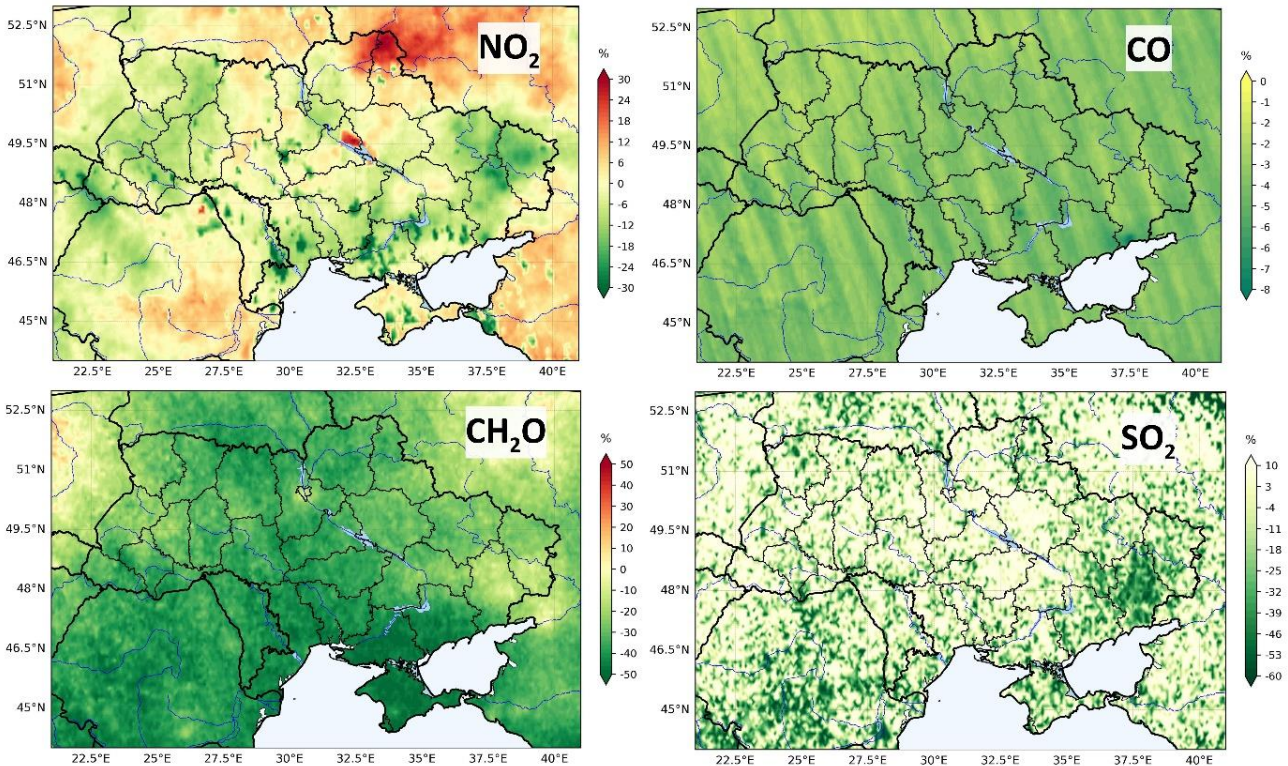


Рис. 23. Відсоткова зміна середніх значень загального вмісту діоксиду азоту (NO_2), монооксида вуглецю (CO), формальдегіду (CH_2O) та діоксиду сірки (SO_2) в атмосферному повітрі за час повномасштабного вторгнення (весна 2022 – зима 2025/2026) у порівнянні із середнім вмістом базового періоду (2019–2021)

Таким чином, довготермінові ефекти повномасштабного російського вторгнення для якості атмосферного повітря на основі сумісного аналізу даних наземних та супутникових спостережень, в першу чергу, продемонструвало катастрофічні наслідки руйнування економічного потенціалу, що проявляється у вигляді зменшення середніх концентрацій забруднюючих речовин у промислових містах та загалом в масштабі усєї країни. При цьому, з наближенням до лінії фронту та прикордоння із російською федерацією, формуються численні локальні осередки постійно високого забруднення у приземному шарі внаслідок викидів від регулярних обстрілів міст. І хоча на регіональному масштабі під час аналізу загального вмісту забруднювальних речовин у стовпі атмосферного повітря ці локальні осередки переважно не проявляються, у приземному шарі тенденції середніх концентрацій забруднювальних речовин часто перевищують зростання у 50% відносно значень базового періоду (тобто до повномасштабного вторгнення).

ВИСНОВКИ

Воєнні дії призводять до суттєвих змін у формуванні поля забруднення, що пов'язані зі зростанням повторюваності короткотривалих випадків екстремально високих концентрацій внаслідок ракетних та дронівих ударів, перерозподілом джерел викидів забруднювальних речовин, порушенням регулярності викидів промислових підприємств і автотранспорту, та зміною характеру екосистемних пожеж. Прояв наслідків воєнних дій для забруднення атмосфери різниться на локальному й регіональному просторових масштабах, та має різноспрямовані тенденції зміни концентрацій забруднювальних речовин залежно від часового масштабу процесів (короткотривалі випадки та довготривалі ефекти). У зв'язку із різним ступенем самоочищення атмосфери, врахування впливу переважаючих метеорологічних умов є обов'язковою умовою під час аналізу забруднення.

Основним наслідком воєнних дій для атмосферного повітря є різке, порівняно короткотривале, зростання концентрацій забруднювальних речовин в атмосферному повітрі внаслідок викидів після ракетних та дронівих ударів. У зв'язку із точковістю наземного моніторингу, лише 443 випадки високого забруднення за 2022–2025 рр. ідентифіковано як наслідок атак на міста України, що складає менше 1% від усіх зафіксованих ударів. В середньому це призводить до зростання приземних концентрацій основних забруднювальних речовин на 100–300%, проте зростання може перевищувати 1000% за найбільш екстремальних випадків викидів.

Наявні супутникові спостереження за хімічними складовими атмосферного повітря дозволяють дещо розширити перелік зафіксованих наслідків ракетних та дронівих ударів для якості атмосферного повітря (переважно для NO_2 та CO), проте загальна кількість надійної ідентифікації залишається вкрай низькою через недоліки пов'язані із впливом хмарності, недостатньою чутливістю сенсорів для виявлення зростання вмісту речовин у вертикальному стовпі атмосфери над вже забрудненими урбанізованими районами, та існуванням даних для хімічних складових у 2022–2026 рр. лише від полярно-орбітальних супутників (тобто, разове зондування на добу). У випадку короткотривалих епізодів забруднення від екосистемних пожеж, в тому числі вздовж лінії фронту, супутникові дані залишаються єдиним джерелом спостережень, що дозволяють кількісно оцінити зміни якості атмосферного повітря.

Довготривалі ефекти повномасштабного російського вторгнення за 2022–2026 рр., у першу чергу, відображають катастрофічні наслідки руйнування промислових підприємств та знищення міст з наближенням до лінії фронту. На регіональному масштабі за даними супутникових спостережень виявлено

зменшення загального вмісту хімічних складових у вертикальному стовпі атмосферного повітря. Зміни фонового вмісту забруднювальних речовин та вплив переважаючих метеорологічних умов в порівнянні з періодом 2019–2021 рр. посилювали прояв таких ефектів. Проте, навіть на цьому фоні можна виокремити зменшення середніх багаторічних концентрацій NO_2 та CO в промислових містах території України, а також SO_2 над територією Донецької області.

Незважаючи на регіональні тенденції зміни концентрацій забруднювальних речовин, на локальному рівні у приземному шарі відмінності у формуванні поля забруднення проявляються чіткіше. Загалом виявлено три основних довготривалих ефекти воєнних дій для приземних концентрацій забруднювальних речовин: 1) зростання забруднення атмосферного повітря у прифронтових містах, безпосередньо пов'язаного із активними воєнними діями; 2) зменшення середніх рівнів забруднення у великих промислових містах переважно внаслідок руйнування підприємств; 3) перерозподіл у концентраціях забруднювальних речовин у тилкових містах.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Основною проблемою під час оцінювання забруднення атмосферного повітря в умовах воєнних дій є розходження між потребами у даних концентрацій забруднювальних речовин та реальними можливостями їх отримання. На відміну від мирного часу, критично зростає кількість випадків екстремального забруднення, які потребують додаткового аналізу. За цих умов зростає потреба у охопленні даними моніторингу. Натомість, воєнні дії призводять до зворотного: втрачається інфраструктура, частково знищуються пости моніторингу, унеможливаються спостереження із наближенням до лінії фронту. Супутникове зондування допомагає в оцінюванні загальних тенденцій та ідентифікації наслідків окремих кейсів, проте дослідження періоду повномасштабного російського вторгнення наочно продемонструвало критичність існуючих недоліків супутникового моніторингу забруднювальних речовин. У той же час, наявні проблеми вказують на наявність якщо не повного, то часткового вирішення багатьох викликів.

У першу чергу, незважаючи на точковість спостережень та неможливість повного охоплення території, **наземний моніторинг залишається ключовим джерелом інформації** про якість атмосферного повітря з можливістю отримання доказових фіксацій перевищень нормативних показників після ракетних та дронівих ударів. Часова дискретність може бути подолана шляхом модернізації і впровадження автоматизованих постів моніторингу. Незважаючи на велику вартість встановлення стаціонарного поста моніторингу із автоматизованими приладами з часовою дискретністю в масштабі хвилин, кожен такий додатковий пост значно посилює здатність фіксувати наслідки ракетних та дронівих ударів, а також надійно визначати міжрічні тенденції зміни якості атмосферного повітря.

Враховуючи наявність різних суб'єктів моніторингу якості атмосферного повітря в Україні, важливим є якнайшвидша інтеграція даних різних мереж моніторингу, що конвертується у процедуру взаємодоповнення інформації для аналізу та досліджень, а також дозволить частково ліквідувати недоліки просторового охоплення.

Важливо звернути увагу на роль громадських мереж моніторингу забруднення атмосферного повітря та розширення мережі «low-cost» сенсорів для ширшого охоплення території. У поєднанні із стаціонарними постами суб'єктів моніторингу, інтегрування мереж «low-cost» сенсорів додає вагому індикативну роль, яку стандартизовані чи еталонні мережі наземних спостережень не здатні охопити. Незважаючи на наявність проблеми методологічного узгодження спостережень, воєнні дії показали важливість отримання будь-якого

індикативного показника в умовах відсутності інших джерел інформації. Кожне із наявних джерел даних має власну ступінь надійності і репрезентативності, потребує використання з урахуванням такої репрезентативності, проте це значно доповнює розуміння наслідків надзвичайних подій воєнного характеру.

Супутниковий моніторинг забруднювальних речовин, який на початку повномасштабного російського вторгнення здавався потенційним рішенням з подолання проблем просторового охоплення наземних спостережень, не зміг замінити наземний моніторинг, хоча й значно доповнив результати і підсилив висновки про наслідки війни. З усіх обмежень, що має супутникове зондування якості атмосферного повітря, найбільшим недоліком стала наявність лише полярно-орбітальних супутників. Так наприклад, Sentinel-5P із зондуванням лише у близькі до полуденних годин, приніс мало користі для виявлення наслідків російських масованих ракетних та дронівих ударів, що переважно відбувалися вночі та рано вранці. В умовах воєнних дій, **найбільшу користь для моніторингу забруднення атмосфери можуть принести геостаціонарні супутникові місії**, що впродовж усього часу зондують одну територію й дозволяють прослідковувати появу викидів та подальше поширення й розсіювання хмари забруднення.

У 2025 році було запущено геостаціонарний супутник Sentinel-4 для спостережень за якістю атмосферного повітря над Європою. Його просторове охоплення дозволить повністю покрити територію України, а щогодинне надходження даних покращить ідентифікацію воєнних впливів на забруднення атмосфери. У випадку, якщо воєнні дії будуть продовжуватися, із кінця 2026 року дані Sentinel-4 можуть стати важливим джерелом інформації.

Будучи результатом прямого моніторингу наслідків, наземні та супутникові спостереження за забрудненням атмосферного повітря є основним доказовим джерелом факту погіршення якості атмосферного повітря. У випадку збору матеріалів для оцінювання шкоди та збитків саме спостереження відіграватимуть провідну роль. Проте, наявний моніторинг від усіх джерел даних в 2022–2026 рр. не дозволить реконструювати зміну забруднення атмосферного повітря впродовж війни – таких даних занадто мало. **Чисельне моделювання атмосферних процесів та застосування моделей хімічного транспорту є єдиним можливим інструментом відновлення еволюції якості атмосферного повітря впродовж війни.** Наразі здійснюються дослідження лише окремих кейсів, а не всеохопне моделювання. Основна складність із застосування моделей для таких задач є створення інвентаризацій викидів від надзвичайних подій воєнного характеру, наявність достатньої кількості обчислювальних ресурсів, і фінансування проведення таких робіт. У той же час, це можливо реалізувати у майбутньому за належної постановки задач, виділення часу й відповідних ресурсів, та підтримку існуючих на сьогодні досліджень із застосуванням чисельних моделей.

Метеорологічні дані та їх обробка

З метою врахування можливого впливу переважаючих метеорологічних умов на якість атмосферного повітря, досліджено зміни приземної температури повітря, атмосферні опади, швидкість вітру та висоту граничного шару атмосфери. Метеорологічні дані взято із реаналізу [ERA5](#) (дата звернення: 09.05.2026 р.), зокрема набір середньомісячних даних²² за період з березня 2019 р. по лютий 2026 р. Так як у оціночному звіті представлено зміну концентрацій забруднювальних речовин за час повномасштабного вторгнення (2022–2026 рр.) відносно базового періоду (2019–2021 рр.), цей же часовий поділ використано і для оцінювання зміни переважаючих метеорологічних умов. Таким чином, оцінювання проведено у вигляді різниці у показниках за час повномасштабного вторгнення відносно базового періоду. Для аналізу індивідуальних випадків погіршення якості атмосферного повітря після ракетних та дронівих ударах у містах, відбувалося співставлення концентрацій забруднювальних речовин із полем вітру, із використанням реаналізу ERA5, проте щогодинного набору даних²³.

Візуалізація метеорологічних даних реалізована на мові програмування Python із використанням бібліотек `matplotlib`, `cartopy`, `geopandas`, та низки інших для оброблення й підготовки даних.

Дані наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря та їх обробка

Дослідження приземних концентрацій забруднювальних речовин проведено із використанням даних наземного моніторингу мережі гідрометеорологічних організацій ДСНС України, що архівуються та зберігаються в [ЦГО](#). Дані, використані для звіту, охоплюють період з січня 2019 р. по грудень 2025 р., де базовим періодом є 2019–2021 рр., а періодом воєнних дій – з 24.02.2022 р. по 31.12.2025 р. Перші місяці 2026 року не охоплені через значний час необхідний для контролю якості даних та подальшої перевірки причин формування високих концентрацій.

Напередодні повномасштабного російського вторгнення наземний моніторинг за якістю атмосферного повітря на мережі гідрометеорологічних організацій здійснювався у 39 містах України на 126 постах спостережень. З початком повномасштабного вторгнення у 2022 році були втрачені пости моніторингу в Лисичанську, Маріуполі, Рубіжному та Сіверськодонецьку. Для втрачених постів моніторингу у цих містах аналіз та розрахунки не проводилися. Значна кількість пропусків у даних наявна під час окупації Херсону, а також у Краматорську та Слов'янську через вкрай важкі умови для проведення

спостережень. Незважаючи на це, наявні вибірки даних дозволили включити ці міста до аналізу. Таким чином, загалом 35 міст із наземними спостереженнями увійшли у дослідження. Ці міста, у тому числі із 4 окупованими після 2022 року, представлені на картосхемі на [рис. 24](#), разом із положенням лінії фронту та звільненими територіями.

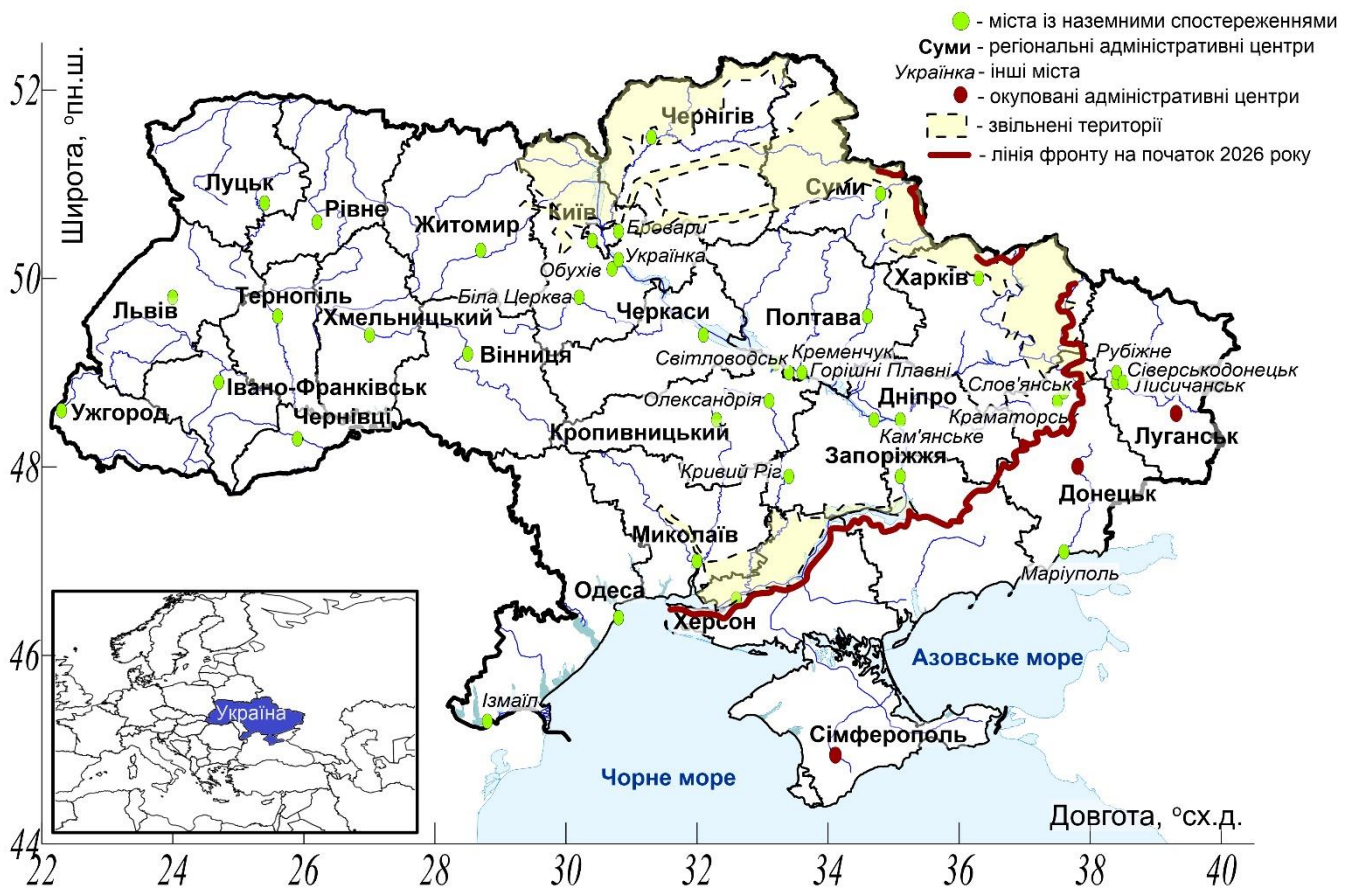


Рис. 24. Картосхема із розташуванням міст, в яких наявні пости моніторингу за забрудненням атмосферного повітря мережі гідрометеорологічних організацій України

Для аналізу використано дані наземних спостережень за 11 забруднювальними речовинами: пил, CH_2O , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, CO , H_2S , HCl , HF , NH_3 , NO_2 , NO , SO_2 . Особливістю моніторингу на мережі гідрометеорологічних організацій є наявність лише чотирьох строків спостережень (1, 7, 13, 19 години), що пов'язано із застарілістю приладної бази. Незважаючи на ці недоліки, мережа гідрометеорологічних організацій має найбільше в Україні покриття із масивами історичних даних, що вкрай важливо мати для оцінювання довготривалих ефектів воєнних дій.

Дослідження наслідків повномасштабного російського вторгнення для приземного забруднення атмосферного повітря включало ідентифікацію

короткотривалих епізодів погіршення якості атмосферного повітря після ракетних та дронівих ударів та аналізу довготривалих ефектів війни.

Під час аналізу короткотривалих епізодів погіршення якості атмосферного повітря у містах, висновок про зв'язок поля забруднення із ракетними та дронівими ударами проводився за умови дотримання наступних вимог. По-перше, інформація про атаку мала бути відкритою у публічному просторі. Збір інформації про ракетні та дроніві удари здійснено на основі аналізу офіційних повідомлень уповноважених осіб та органів влади, а також із використанням інформації ресурсу [ЕкоЗагроза](#). По-друге, необхідною умовою є повне узгодження підвищення концентрацій забруднюючих речовин із часом ракетного чи дронівого удару, наявності викидів забруднювальних речовин та полем вітру, що вказує на перенесення забруднення від місця атаки до поста моніторингу. По-третє, наявне зростання концентрацій забруднювальних речовин не повинно узгоджуватися із регулярними варіаціями забруднення міста (наприклад, вищі концентрації під час години пік); а також не повинно бути наявних додаткових джерел забруднення із тим самим напрямком перенесення (наприклад, під час екосистемних пожеж). Тільки за таких умов, сформована концентрація може бути доказово пов'язана із наслідком ракетного або дронівого удару.

Аналіз короткотривалих наслідків проведено для забруднювальних речовин із найкращим часовим та просторовим охопленням – CO, NO₂, SO₂ та пилу. Розрахунок зростання концентрацій після ракетних та дронівих ударів здійснено шляхом порівняння концентрації забруднювальної речовини у найближчий строк після атаки відносно середньої концентрації попереднього дня до атаки.

Аналіз довготривалих ефектів проведено для усього набору обраних 11 забруднювальних речовин шляхом розрахунку відносної зміни середньої концентрації за час повномасштабного вторгнення відносно базового періоду.

Оброблення й візуалізація даних наземного моніторингу реалізована на мові програмування Python із використанням бібліотек numpy, matplotlib, та низки інших.

Дані супутникових спостережень та їх обробка

Дослідження загального вмісту забруднювальних речовин у вертикальному стовпі атмосферного повітря за даними супутникового зондування здійснено на основі даних супутника Sentinel-5P із приладом TROPOMI на борту. Оригінальні дані завантажувалися із офіційного хабу даних, що станом на 2026 р. доступні через платформу [Copernicus Data Space Ecosystem](#) (CDSE, дата звернення 08.05.2026 р.).

Дані, використані для звіту, охоплюють період з лютого 2019 р. по лютий 2026 р., де базовим періодом є 2019–2021 рр., а періодом воєнних дій – перші чотири роки повномасштабного російського вторгнення – з 24.02.2022 р. по 24.02.2026 р.

Дані супутника Sentinel-5P щоденно обробляються в УкрГМІ в автоматизованому режимі власною системою оцінювання стану якості атмосферного повітря^{9,24}. Обрано більш точні режимні OFFL дані другого рівня архівації (Level-2) для дослідження загального вмісту NO₂ (тропосферний), CO, SO₂ та CH₂O в стовпі атмосферного повітря. Архів з OFFL даними Sentinel-5P в УкрГМІ являє собою щоденні дані упорядковані у регулярну сітку координат (третій рівень архівації, Level-3) з горизонтальною роздільною здатністю 0.1°. Ці дані отримуються після реалізації процедури фільтрування оригінальних завантажених даних із показником індексу якості даних 0.75 та осередненням пікселів у заздалегідь задані комірки сітки 0.1°×0.1° для домену, що охоплює територію України, суміжні території сусідніх країн та морської акваторії Чорного й Азовського морів. Таке впорядкування у дещо грубішу сітку дозволяє порівнювати між собою сусідні дні та правильно проводити часові осереднення, що неможливо реалізувати у випадку оригінальних Level-2 даних (у зв'язку із різним покриттям території Sentinel-5P із циклом 16 днів). У випадку аналізу короткотривалих випадків, використано ті ж самі OFFL Level-2 дані, проте у оригінальній горизонтальній роздільній здатності 3.5×5.5 км у надирі.

Аналіз аномалій тепла для оцінювання зміни розподілу екосистемних пожеж здійснено із використанням даних супутників Terra (супутниковий прилад MODIS), Suomi NPP, NOAA-20 і NOAA-21 (супутниковий прилад VIIRS), завантажених із системи [Fire Information for Resource Management System](#) (FIRMS, дата звернення 09.05.2026 р.). Період охоплює усі зафіксовані випадки аномалій тепла на території України з березня 2019 р. по лютий 2026 р.

Візуалізація супутникових даних реалізована на мові програмування Python із використанням бібліотек matplotlib, cartopy, geopandas, та низки інших для оброблення й підготовки даних.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N. (2016) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley. ISBN: 978-1-118-94740-1
2. Lazaridis, M. (2011). First Principles of Meteorology and Air Pollution (Vol. 19). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0162-5>
3. Cermak, J. E., Davenport, A. G., Plate, E. J., & Viegas, D. X. (Eds.). (1995). Wind Climate in Cities. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2>
4. Ueno, H., & Tsunematsu, N. (2019). Sensitivity of ozone production to increasing temperature and reduction of precursors estimated from observation data. Atmospheric Environment, 214, 116818. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116818>
5. Logan, J. A., Prather, M. J., Wofsy, S. C., & McElroy, M. B. (1981). Tropospheric chemistry: A global perspective. Journal of Geophysical Research: Oceans, 86(C8), 7210–7254. <https://doi.org/10.1029/JC086iC08p07210>
6. Sumner, A. L., Shepson, P. B., Couch, T. L., Thornberry, T., Carroll, M. A., Sillman, S., Pippin, M., Bertman, S., Tan, D., Faloon, I., Brune, W., Young, V., Cooper, O., Moody, J., & Stockwell, W. (2001). A study of formaldehyde chemistry above a forest canopy. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D20), 24387–24405. <https://doi.org/10.1029/2000JD900761>
7. Savenets M. (2021) Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. Idojaras, 125(2), 271–290. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
8. Писаренко Л.А. & Савенець М.В. (2020). Пожежі в екосистемах та вплив на атмосферу. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Серія «Геологія. Географія», 53, 255–266. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-19>
9. Осадчий В., Орещенко А. & Савенець М. (2023). Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря. ДСНС України, НАН України, УкрГМІ. https://doi.org/10.15407/uhmi.2023_1
10. Balabukh, V. & Malytska, L. (2017). Impact of climate change on natural fire danger in Ukraine. Idojaras 121, 453–477.
11. Savenets, M., Nadtochii, L., Malytska, L., Kozlenko, T., Komisar, K., Umanets, A., Zhemera, N., Hrama, D., & Rudas, M. (2026). Comprehensive analysis of air pollution surface-to-columnar changes after three years of the Russian–Ukrainian war. Environmental Science and Pollution Research, 33, 3594–3618. <https://doi.org/10.1007/s11356-026-37512-6>
12. Malytska, L., Galytska, E., Savenets, M., Ladstätter-Weißenmayer, A., & Krajčovičová, J. (2026). The impact of fires on air quality in Ukraine during two years of military conflict (2022–2023): Analyzing satellite, ground-based observations of NO₂, CO, and aerosols. Atmospheric Research, 338, 108959. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2026.108959>
13. Спалювання сухою під час дії воєнного стану в Україні може бути прирівняне до диверсій! Державне агентство лісових ресурсів України. URL: <https://forest.gov.ua/news/spaliuvannia-sukhostoiu-pid-chas-dii-voiennoho-stanu-v-ukraini-mozhe-but-y-pryrvniane-do-dyversii> (дата звернення: 05.05.2026)
14. 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. Atmospheric Pollution Research, 14(11), 101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
15. Савенець, М.В., Дворецька, І.В., Козленко, Т.В., Комісар, К.М., Уманець, А.П., & Жемера, Н.С. (2023). Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: приземний вміст забруднюючих речовин. Український гідрометеорологічний журнал, 31, 69–87. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05>

16. Asilevi, P. J., Dzidzorm, E. N., Boakye, P., & Quansah, E. (2025). Nitrogen dioxide (NO₂) Meteorology and predictability for air quality management using TROPOMI. *Npj Clean Air*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1038/s44407-024-00003-4>
17. Prunet, P., Lezeaux, O., Camy-Peyret, C., & Thevenon, H. (2020). Analysis of the NO₂ tropospheric product from S5P TROPOMI for monitoring pollution at city scale. *City and Environment Interactions*, 8, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100051>
18. Tack, F., Merlaud, A., Iordache, M.-D., Pinardi, G., Dimitropoulou, E., Eskes, H., Bomans, B., Veefkind, P., & Van Roozendaal, M. (2021). Assessment of the TROPOMI tropospheric NO₂ product based on airborne APEX observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 615–646. <https://doi.org/10.5194/amt-14-615-2021>
19. Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Boersma, K. F., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., Elokhov, A., Gebetsberger, M., Goutail, F., Grutter de la Mora, M., Gruzdev, A., Gratsea, M., Hansen, G. H., Irie, H., Jepsen, N., Kanaya, Y., Karagkiozidis, D., Kivi, R., Kreher, K., Levelt, P. F., Liu, C., Müller, M., Navarro Comas, M., Piters, A. J. M., Pommereau, J.-P., Portafaix, T., Prados-Roman, C., Puentedura, O., Querel, R., Remmers, J., Richter, A., Rimmer, J., Rivera Cárdenas, C., Saavedra de Miguel, L., Sinyakov, V. P., Stremme, W., Strong, K., Van Roozendaal, M., Veefkind, J. P., Wagner, T., Wittrock, F., Yela González, M., & Zehner, C. (2021). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 481–510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
20. Beirle, S., Boersma, K. F., Platt, U., Lawrence, M. G., & Wagner, T. (2011). Megacity Emissions and Lifetimes of Nitrogen Oxides Probed from Space. *Science*, 333(6050), 1737–1739. <https://doi.org/10.1126/science.1207824>
21. Khalil, M. A. K., & Rasmussen, R. A. (1990). The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance. *Chemosphere*, 20(1–2), 227–242. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90098-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90098-E)
22. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
23. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
24. Savenets, M., Oreshchenko, A., & Nadtochii, L. (2022). The system for near-real time air pollution monitoring over cities based on the Sentinel-5P satellite data. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 57, 195-205. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-15>