МОНІТОРІНГ І ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

Л.М. Надточій[1]
ORCID: 0000-0003-3038-5960
onoslyuda@uhmi.org.ua

В.О. Рибчинська[1,2]
ORCID: 0009-0008-5343-8723
valeriia.rybchynska@studio.unibo.it

М.В. Савенець[1]
ORCID: 0000-0001-9429-6209
savenets@uhmi.org.ua

[1] *Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна*

[2] *Болонський університет, Болонья, Італія*

УДК 551.510.42 DOI: https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.004

ЗМІНИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА У МІСТАХ УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

Повномасштабне російське вторгнення суттєво видозмінило поле забруднення атмосферного повітря в українських містах, виявити яке можливо за даними супутникового зондування із повним покриттям території України. У представлених дослідженнях на основі даних супутника Sentinel-5P встановлено вплив воєнних дій на зміну забруднення атмосфери діоксидом азоту (NO_2) та монооксидом вуглецю (CO) у містах України (фонового та у забрудненому шлейфі). Виявлено зміни ефективності згоряння палива як індикатора зміни переважаючих типів палива. Встановлено загальне зменшення NO_2 та CO на 6–34% та 9–17% відповідно. Вищевказані зміни мають сезонні відмінності та залежать від періоду війни. Параметр ефективності згоряння палива (dNO_2/dCO) зменшився на 11–46%, що опосередковано може свідчити про збільшення використання твердого палива або мазуту у містах і зменшення використання газу. Врахування досліджених параметрів є важливим для перегляду планів управління якістю атмосферного повітря, відбудови інфраструктурних об'єктів, та створення інвентаризації викидів воєнного часу.

Ключові слова: *діоксид азоту, монооксид вуглецю, Sentinel-5P, шлейф, фоновий вміст.*

ВСТУП

Повномасштабне російське вторгнення в Україну стало причиною однієї із наймасштабніших воєн в Європі з часів Другої світової війни. Поряд із завданими руйнуваннями інфраструктури та населених пунктів, природні екосистеми також зазнають безпрецедентного тиску, на що вже наголошувалося різноманітними міжнародними організаціями (OESD, 2022; UNEP, 2023; WWF, 2022). Як компонента довкілля, атмосферне повітря реагує на надходження численних нових воєнно-обумовлених викидів забруднюючих речовин та на перерозподіл вже існуючих антропогенних і природних джерел. Як наслідок, на локальному та регіональному рівні можуть спостерігатися як зростання, так і зменшення концентрацій різноманітних домішок. Досвід попередніх військових конфліктів вказує на численні випадки формування небезпечно високих рівнів забруднення атмосферного повітря (Assessment, 1999; Austin & Bruch, 2000; Payne & Sand, 2011; Sadiq & McCain, 1993; Solomon et al., 2018). На жаль, війна в Україні стала чи не найбільш вивченим кейсом впливу на якість атмосферного повітря із активним застосуванням методів супутникового моніторингу, машинного навчання та опису перспектив моделювання (Ialongo et al., 2023; Sasmoko et al., 2023; Savenets et al., 2023; Zalakeviciute et al., 2022; Zhang et al., 2023).

В умовах війни, за обмеженості у використанні наземних спостережень, віддаленості багатьох джерел викидів від розташування постів моніторингу, а також враховуючи потенційні масштаби наслідків руйнування промислових підприємств, важливу роль відіграє супутникове зондування. Такі газові компоненти як діоксид азоту (NO_2) та монооксид вуглецю (CO), отримані на основі даних сучасних супутникових місій, дозволяють встановити наслідки забруднення як від антропогенних стаціонарних і пересувних джерел (Borsdorff et al., 2020; Saw et al., 2021), так і від природних, включно із лісовими пожежами (Griffin et al., 2021). На сьогодні, супутникове зондування залишається ключовим джерелом даних про зміни вмісту забруднюючих речовин під час війни із повним просторовим охопленням території України.

Незважаючи на наявні дослідження зміни якості атмосферного повітря в Україні під час війни як на регіональному (Ialongo et al., 2023; Zhang et al.,

2023), так і з переходом на локальний масштаб (Savenets et al., 2023), залишається відкритим питання щодо внеску тих чи інших процесів у зміни забруднення атмосфери. Недостатньо вивченим є внесок руйнування промислових підприємств та об'єктів енергетичної інфраструктури на зменшення рівнів забруднення атмосферного повітря, та те наскільки ці зміни у містах відрізняються від загальних регіональних змін.

Враховуючи серйозні наслідки руйнування енергетичної інфраструктури України під час масованих ракетних ударів з жовтня 2022 року, відбулися і зміни у використанні типів палива, що сильно вплинуло на викиди вуглецевмісних сполук. Незважаючи на відсутність достатньої кількості інформації, даних про вміст забруднюючих речовин може бути достатньо для отримання уявлення про процеси заміни типів палива, використовуючи співвідношення концентрацій різних речовин (Du et al., 1991; Goldberg et al., 2019; Silva et al., 2013). Подібні експериментальні дослідження з'явилися з метою встановлення впливу від найбільших міст світу та природних пожеж (Lama et al., 2020; Lama et al., 2022; Wan et al., 2023). При цьому, жодного разу за супутниковими даними не проводилися оцінки змін показників ефективності згоряння палива для встановлення впливу у змінах промислових процесів. У випадку військових дій подібні оцінки також здійснюються вперше.

Метою статті є встановлення впливу воєнних дій на території України на зміну забруднення атмосферного повітря через оцінювання вмісту NO_2 та CO у промислових містах України з чітким відокремленням забруднення міст від фонових показників та виявлення на їх основі показника ефективності згоряння палива у містах, як індикатора зміни переважаючих типів палива.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведені з використанням даних загального вмісту NO_2 та CO (у моль/м^2) супутникового приладу TROPOspheric Monitoring Instument (TROPOMI) супутника Sentinel-5 Precursor (S5P), отриманих із офіційного хабу (https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home). Для дослідження обрано 41 місто на території України (*рис. 1*). До визначеного переліку міст увійшли усі обласні центри та найбільші промислові міста. При цьому, обрано міста АР Крим та Донецької й Луганської областей, що були окуповані з 2014 року. Повний період досліджень охоплює січень 2021 р. — травень 2023 р. задля можливості проведення оцінки напередодні повно-

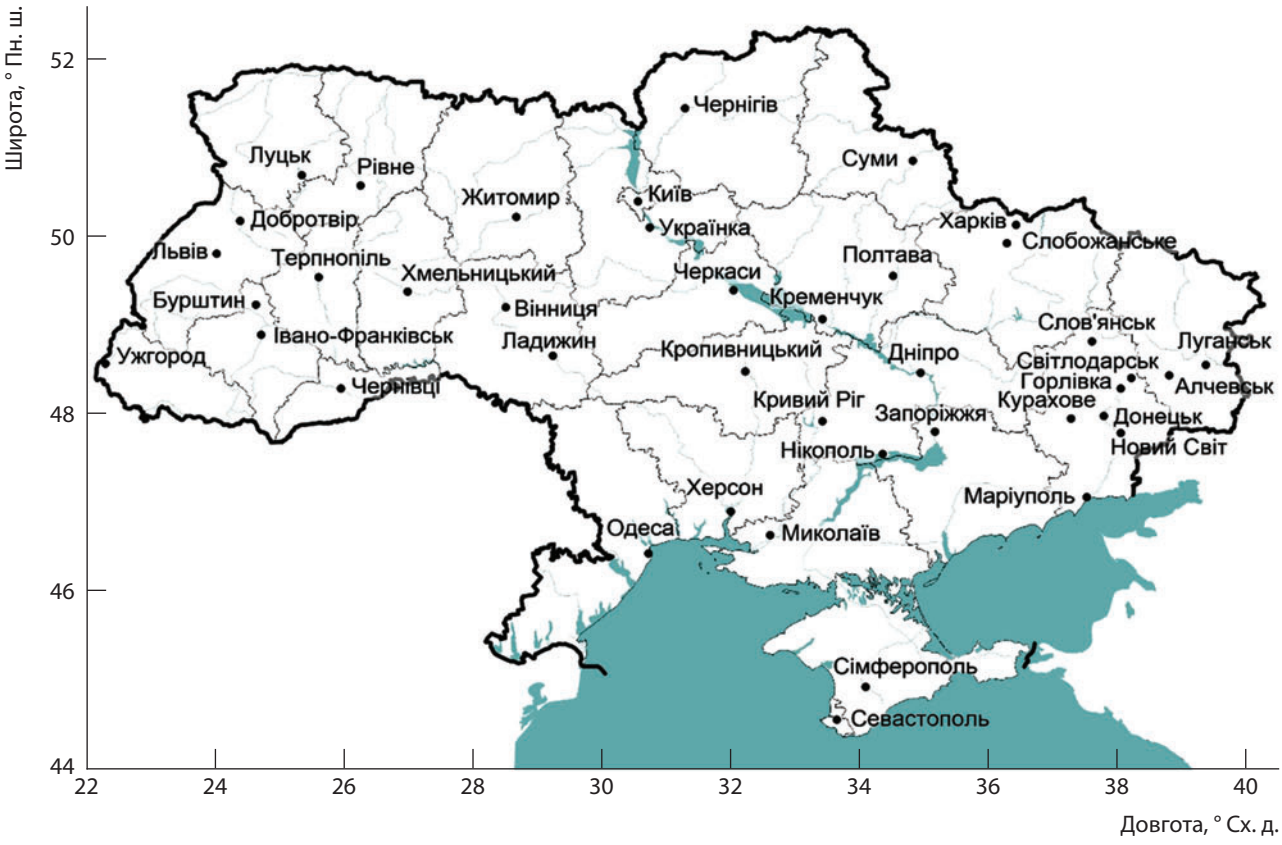

Рис. 1. Досліджувані промислові міста України

масштабного російського вторгнення та за час війни після 24.02.2022 р. до завершення весняного сезону 2023 р. з метою повного охоплення опалювального сезону та стабілізації вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі після зими. Загалом, загальний період спостережень поділено на кілька ключових періодів:

01.01.2021–23.02.2022 р. — період до повномасштабного вторгнення;

24.02.2022–31.05.2023 р. — загальний період війни після повномасштабного вторгнення;

24.02.2022–30.09.2022 р. — період війни до систематичних ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури;

01.10.2022 — 31.05.2023 р. — період війни після початку систематичних ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури.

Супутникові дані загального вмісту NO_2 та CO після завантаження пройшли фільтрування за індексом якості даних (англ.: *quality assurance index (QA)*), де усі пікселі з QA нижче за 0,75 для NO_2 та нижче 1,0 для CO були відфільтровані як ненадійні (рекомендовані умови фільтрування (Apituley et al., 2022; Eskes et al., 2022)). Враховуючи поставлену задачу щодо оцінки ефективності згоряння палива у містах, отримані відфільтровані дані не проходили процедуру прив'язки до регулярної сітки координат, як це прийнято робити для формування часових рядів у визначених точках простору. Натомість, застосовуючи уже адаптовані до території України підходи оцінки ефективності перебігу процесів згоряння (Рибчинська & Савенець, 2023), для кожного окремого дня використано наступний алгоритм формування даних для досліджень.

Так як супутникове зондування S5P відбувається раз на добу, у момент прольоту супутника забруднене повітря може зосереджуватися над містом, або ж бути на деякій відстані від міста поширюючись у вигляді шлейфу. У зв'язку з цим, просто обравши точку координат (або один і той самий домен) як константу, ми не завжди потраплятимемо на забруднене повітря сформоване у місті. З метою точної оцінки, існує потреба визначення концентрації NO_2 та CO у шлейфі забрудненого повітря. Тому, першим етапом формування даних для обчислень стало автоматизоване розпізнавання розташування забрудненого шлейфу, що йде від міста, обмеженого за територією радіусом 15 км від межі міст. Таким чином було сформовано часові ряди загального вмісту NO_2 та CO у шлейфі.

Іншими параметрами для обчислень мають бути фонові концентрації забруднюючих речовин на околицях або за межами міст. Тому, на другому етапі формувалися часові ряди загального вмісту NO_2 та CO на протилежній від шлейфу (з навітряного боку міст) стороні міст, так як ці території не зазнавали впливу викидів перед зондуванням. Для визначення фонового вмісту обрано територію з більшим радіусом, до 20 км від межі міст. У результаті було сформовано фонові значення загального вмісту NO_2 та CO.

Двох наведених показників (вміст у шлейфі та фоновий) для NO_2 та CO достатньо для опису забруднення атмосферного повітря міст і встановлення ключових змін спричинених військовими діями. Використовуючи ці показники стає можливим оцінити ефективність згоряння палива за параметром dNO_2/dCO (див. формулу 1):

$$\frac{dNO_2}{dCO} = \frac{NO_{2_{джерело}} - NO_{2_{фон}}}{CO_{джерело} - CO_{фон}}, \quad (1)$$

де, $NO_{2джерело}$ і $CO_{джерело}$ — загальний вміст NO_2 і CO у шлейфі забрудненого повітря над містом, $NO_{2фон}$ і $CO_{фон}$ — фоновий загальний вміст NO_2 і CO поза містом.

Ідея показника dNO_2/dCO полягає у тому, що при зростанні використання твердого палива або мазуту, він буде зменшуватися за рахунок збільшення частки вуглецевмісних сполук, тобто відображатиме менш ефективне згоряння палива. При збільшенні використання газу як палива, dNO_2/dCO буде зростати за рахунок зростання частки азотовмісних сполук та зменшення частки вуглецевмісних сполук.

На першому етапі досліджень здійснено аналіз супутникової інформації загального вмісту досліджуваних забруднюючих речовин, з особливою увагою до максимальних значень у шлейфі забрудненого повітря сформованого у місті, та мінімальних значень для відображення типового фону поза містом. Другим етапом стало виявлення закономірностей сезонних змін для оцінки варіативності показника. На останньому етапі проведено дослідження змін загального вмісту досліджуваних забруднюючих речовин та індексу dNO_2/dCO. Це дозволило визначити потенційні зміни у використанні переважаючого типу палива у містах України.

У проведених дослідженнях використано стандартні статистичні методи обчислень шляхом знаходження середніх арифметичних значень досліджуваних показників протягом встановлених періодів. Відсоткові співвідношення для відображення змін спричинених війною обчислено як відсоток від періоду до повномасштабного вторгнення (до 23.02.2022 р. включно).

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз отриманих результатів потребує розуміння базового забруднення атмосферного повітря NO_2

та CO напередодні повномасштабного російського вторгнення, оцінку їх варіативності, опис виявлених змін під час війни та індикацію потенційної зміни ефективності перебігу процесів згоряння палива у містах.

1. Вміст NO_2 та CO в атмосферному повітрі міст до повномасштабного вторгнення. Дослідження вмісту NO_2 та CO напередодні повномасштабного вторгнення дозволило сформувати уявлення про типовий базовий стан якості атмосферного повітря у містах та їх околицях. Протягом досліджуваного періоду загальний вміст NO_2 у шлейфі забрудненого повітря варіювався від 8,1–8,6×10^{-5} моль/м^2 (у Херсоні, Сімферополі, Севастополі) до 1,5–1,6×10^{-4} моль/м^2 (у Києві, Донецьку, Новому Світі) (*рис. 2а*). Найзабрудненіше повітря формувалося або у найбільших містах, або у населених пунктах із найпотужнішими ТЕЦ/ТЕС України. Стандартне відхилення змінювалося у межах 2,2×10^{-5}–1,5×10^{-4} моль/м^2. Найбільшим воно було у Львові та Луцьку (1,5×10^{-4} та 1,4×10^{-4} відповідно), перевищуючи навіть середні показники максимального вмісту у шлейфі. Така висока мінливість NO_2 формується через високу повторюваність транскордонного перенесення забрудненого повітря з промислових районів Польщі, які є набагато брудніші за міста заходу України (Осадчий та ін., 2023). Найменший розкид значень характерний для Севастополя та Сімферополя (2,2×10^{-5} та 2,3×10^{-5} відповідно), що пов'язано із меншою забрудненістю цих міст, кращими атмосферними умовами до швидкого виведення домішок із атмосферного повітря, й відсутністю перенесення забрудненого повітря з інших регіонів. Середні значення максимального вмісту NO_2 та стандартні відхилення наведено на *рис. 2а*, де міста проранжовано від найбільшого до найменшого середнього значення.

Фоновий вміст NO_2 в околицях досліджуваних міст змінювався від 6,4×10^{-5} моль/м^2 (у Херсоні) до 9,0×10^{-5} моль/м^2 (у Горлівці) (*рис. 2б*). Більш забруднений фон атмосферного повітря характерний для міст Донбасу (Горлівка, Світловодськ, Донецьк), найменші ж значення характерні для Сімферополя, Севастополя, Херсону і Ладижина (незважаючи на наявність потужної Ладижинської ТЕС). Потрібно розуміти, що фоновий вміст забруднюючих речовин поблизу міст є вищим за загальний фон території України на віддалі від міст. Стандартне відхилення

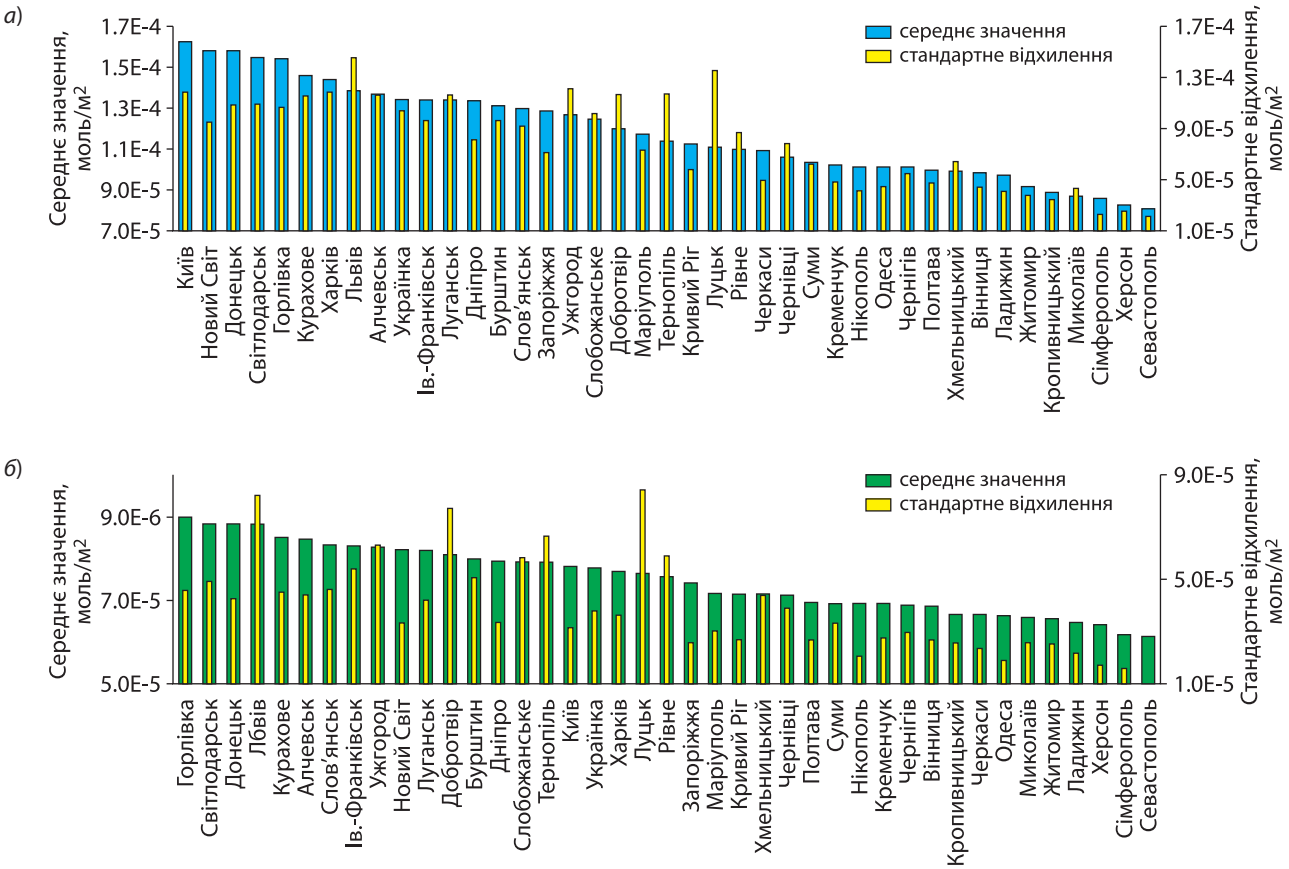

Рис. 2. Середні максимальні значення загального вмісту NO_2 у шлейфі забрудненого атмосферного повітря (*а*) та фонові значеннями поза містом (*б*) у період до повномасштабного вторгнення

змінювалося в межах $1{,}56\times10^{-5}$–$8{,}44\times10^{-5}$ моль/м^2, з найвищими значеннями у Львові та Луцьку, і найнижчими у Севастополі та Сімферополі, подібно і до забруднення в межах міст.

На відміну від NO_2, CO в повітря надходить від меншої кількості джерел викидів, переважно від горіння вуглецевмісних речовин. Максимальний вміст CO над джерелом викиду варіювався від 0,035 моль/м^2 до 0,041 моль/м^2 (*рис. 3а*), а фоновий — від 0,031 моль/м^2 до 0,034 моль/м^2 (*рис. 3б*). На обох графіках *рис. 3* міста проранжовано у бік зменшення середніх значень. Найвищі максимальні значення концентрації CO у забрудненому шлейфі повітря міст виявлено у Маріуполі, Запоріжжі, Нікополі та Дніпрі із високою часткою викидів від металургійної промисловості. Найменші значення характерні для Тернополя, Хмельницького та Сімферополя. Розкид значень загального вмісту CO набагато менший за NO_2. Стандартне відхилення змінювалося від 0,0038 моль/м^2 до 0.0072 моль/м^2, з особливо високими значеннями у Маріуполі, та найнижчими показниками у Сімферополі та Тернополі (*рис. 3а*). Фоновий вміст поза містами переважно повторює закономірності забруднення у самих шлейфах: вищі осереднені фонові значення поза містом із більшим розкидом характерні для більш забруднених міст. Найвищі фонові значення CO спостерігались у Маріуполі та Дніпрі (0,034 моль/м^2), найнижчі — у Сімферополі, Тернополі та Бурштині (0,031 моль/м^2, 0,032 моль/м^2, 0,032 моль/м^2 відповідно) (*рис. 3б*). Стандартне відхилення також було нижчим і коливалося у межах 0,0037–0,0046 моль/м^2.

Таким чином, напередодні повномасштабного російського вторгнення, забруднення атмосферного повітря найбільших промислових міст логічно узгоджувалося із існуючими на той час особливостями розвитку промисловості та величиною цих міст. Більш забруднене повітря було характерним для найбільших міст України, потужних промислових агломерацій (як наприклад на Донбасі чи вздовж русла річки Дніпро), а також у містах із більш "брудним" виробництвом на кшталт агломерацій чорної та кольорової металургійної промисловості.

2. Сезонні відмінності вмісту NO_2 та CO. Розуміння масштабу змін у забрудненні атмосферного повітря внаслідок війни потребує також і розуміння типових сезонних варіацій забруднюючих речо-

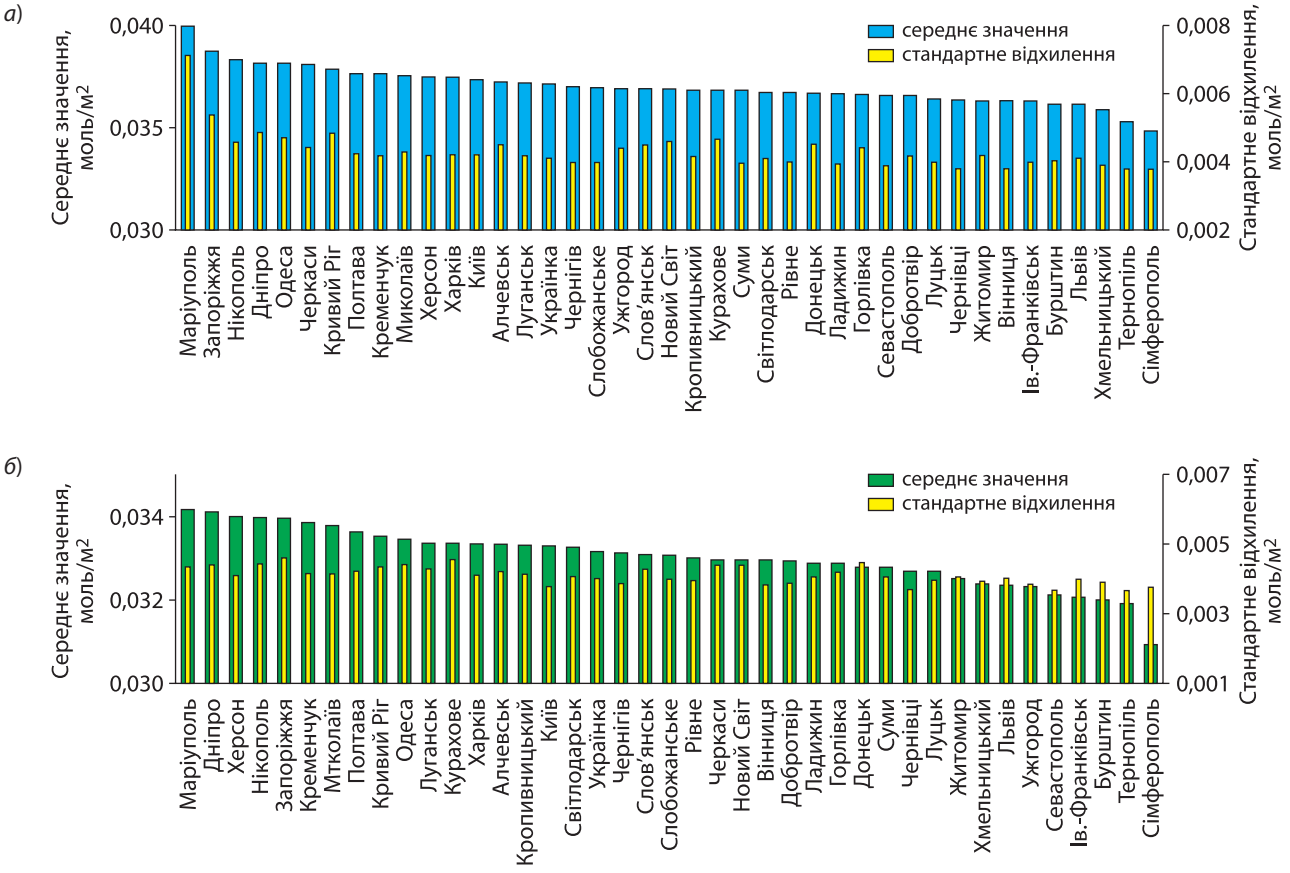

Рис. 3. Середні максимальні значення загального вмісту CO у шлейфі забрудненого атмосферного повітря (*а*) та фонові значеннями поза містом (*б*) у період до повномасштабного вторгнення

вин. Тому, наступним етапом став аналіз сезонних відмінностей NO_2 та CO у досліджуваних містах. Його проведено вже із представленням періодів до та після повномасштабного вторгнення задля кращого порівняння військово-обумовлених змін із типовими сезонними варіаціями.

Особливості сезонного ходу NO_2 залежать від рівня антропогенної емісії та сприятливості метеорологічних умов до виведення домішок із атмосфери. Максимальні значення NO_2 у забрудненому шлейфі атмосферного повітря спостерігались взимку в більшості міст, що є типовим для періоду з високою частотою інверсій, низькою температурою повітря, та особливостями емісії під час опалювального сезону. У містах з найбільшими максимальними значеннями вміст NO_2 взимку досягав $1{,}8\times10^{-4}$ моль/м^2 (Алчевськ і Новий Світ), $1{,}9\times10^{-4}$ моль/м^2 (Світлодарськ і Горлівка), 2.0×10-4 моль/м^2 (Київ), $2{,}1\times10^{-4}$ моль/м^2 (Донецьк). У містах на півдні України (Миколаїв, Херсон, Сімферополь та Севастополь) максимуми NO_2 відмічалися влітку, а у Одесі та Нікополі — і взимку, і влітку. На *рис. 4* на прикладі Києва (одне з найзабрудненіших із досліджуваних міст) та Херсону (одне з найчистіших із досліджуваних міст) зображено сезонні значення загального вмісту NO_2.

У період до повномасштабного вторгнення, у Херсоні, Миколаєві та Нікополі сезонність проявлялася слабко. Проте з початком війни сезонний хід став чітко вираженим із максимумом влітку (Херсон, Миколаїв) та взимку (Нікополь). У Сімферополі та Севастополі в період до повномасштабного вторгнення, максимальний вміст NO_2 спостерігався влітку, в усіх інших містах — взимку. Максимальні значення взимку NO_2 досягали $2{,}3\times10^{-4}$ моль/м^2 в Світлодарську та $2{,}2\times10^{-4}$ моль/м^2 у Києві та Горлівці.

З початком повномасштабного російського вторгнення вміст NO^2 у шлейфах забрудненого повітря на території України загалом зменшився. Для прикладу, у Києві взимку максимум сезонних середніх значень складав $1{,}7\times10^{-4}$ моль/м^2 та зменшився на 22% відносно періоду до повномасштабного вторгнення; у Донецьку $1{,}9\times10^{-4}$ моль/м^2 зі зменшенням на 15%; у Новому Світі $1{,}5\times10^{-4}$ моль/м^2 зі зменшенням на 27%. Також є міста де спостерігалося деяке збільшення вмісту NO_2 у забрудненому шлейфі влітку або навесні (Луцьк, Ужгород, Полтава, Курахове, Сімферополь, Севастополь, Слов'янськ та Новий Світ), проте в інші сезони в цих містах значення NO_2 зменшилось відносно періоду до повномасштабного вторгнення. Фактично, у деяких містах спостерігаємо сезонний перерозподіл забруднення атмосферного повітря NO_2.

Фоновий вміст NO_2 за загальний період у більшості міст досягає максимумів взимку до

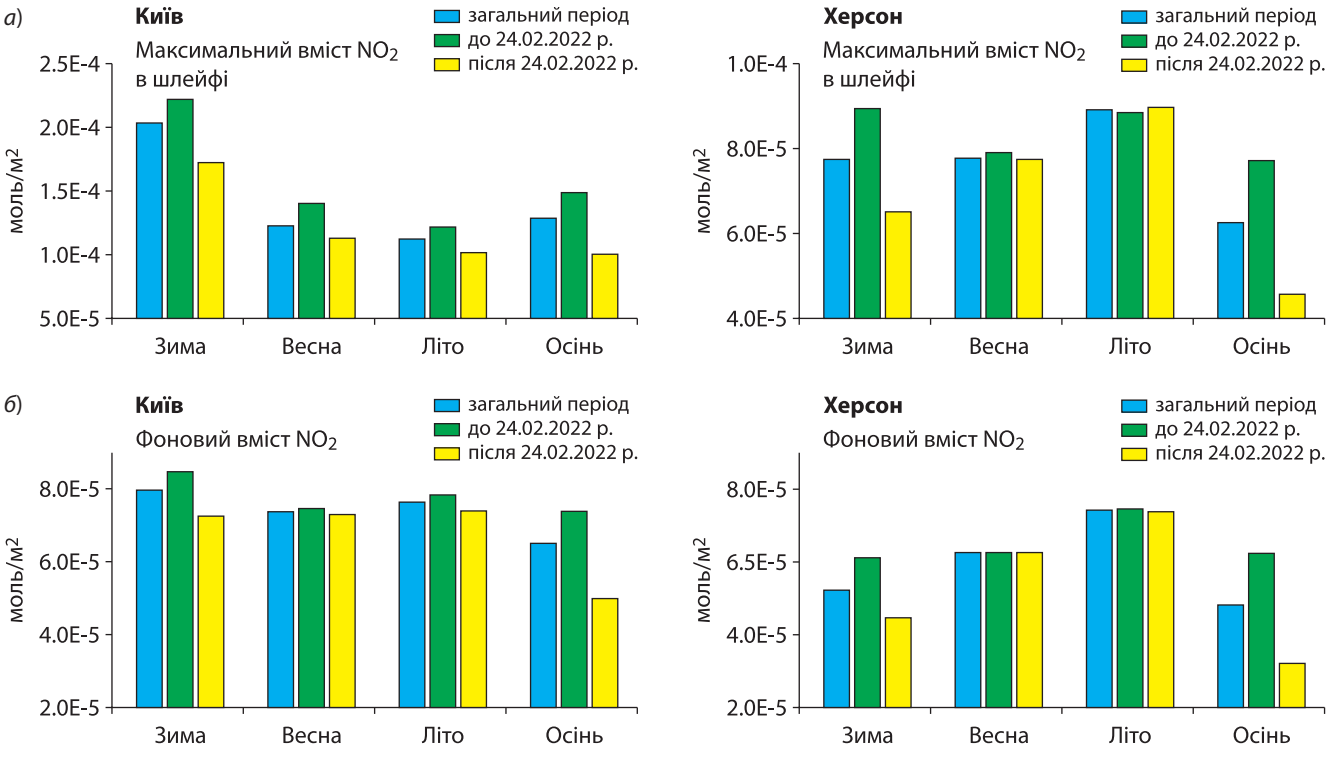

Рис. 4. Сезонні значення загального вмісту NO_2 у шлейфі забрудненого атмосферного повітря (*а*) та фонових концентрацій поза містом (*б*) (вісь ординат на *рис. 4а* свідомо обрано різною для інформативності)

$1{,}0\times10^{-4}$ моль/м^2 у Горлівці та Львові. Проте, більше третини міст мали найвищі значеннями NO_2 влітку, зокрема у містах Житомир, Одеса, Миколаїв, Херсон, Кропивницький, Черкаси, Чернігів, Харків, Дніпро, Запоріжжя, Маріуполь, Ладижин, Кременчук, Нікополь, Сімферополь, Севастополь. Значення фонового вмісту NO_2 коливалися у межах від $7{,}0\times10^{-5}$ моль/м^2 до $7{,}8\times10^{-5}$ моль/м^2 в залежності від міста. Подібний розподіл був типовим і для періоду до повномасштабного російського вторгнення. У Запоріжжі, Вінниці та Полтаві відмічалися два максимуми: взимку та влітку зі значеннями $7{,}8\times10^{-5}$ моль/м^2, $7{,}3\times10^{-5}$ моль/м^2, $7{,}4\times10^{-5}$ моль/м^2 відповідно.

За період після 24.02.2022 р., фонові значення NO_2 в околицях досліджуваних міст зменшились, особливо взимку. Виявлено міста у яких відбулися певні зміни сезонного розподілу (деяке збільшення вмісту NO_2 влітку, наприклад, у Новому Світі). Цікавим є те, що в усіх досліджуваних містах, за винятком Києва, Ужгорода, Луганська, Алчевська та Горлівки, максимуми почали спостерігатися влітку. Загалом, максимальні значення середнього фонового вмісту NO_2 були в межах від $7{,}0\times10^{-5}$ моль/м^2 до $8{,}2\times10^{-5}$ моль/м^2.

За вмістом CO у шлейфі забрудненого повітря за загальний період, виявлено відсутність яскраво вираженої сезонності. Незначне зростання є типовим в усіх містах взимку та навесні, що пов'язано із додатковою емісією CO під час опалювального сезону, повільнішим виведенням із атмосфери, і, як наслідок, більшим накопиченням. Максимальна концентрація CO у містах у забрудненому шлейфі змінювалась в межах 0,034–0,039 моль/м^2. На *рис. 5* на прикладі Маріуполя (одне з найзабрудненіших із досліджуваних міст за вмістом CO) та Тернополя (одне з найчистіших із досліджуваних міст) зображено сезонні значення загального вмісту CO.

До повномасштабного російського вторгнення максимальні значення концентрації CO у шлейфі відмічались у Маріуполі (0,043 моль/м^2), Дніпрі (0,040 моль/м^2) та Запоріжжі (0,040 моль/м^2), а мінімальні у Тернополі (0,036 моль/м^2). У всіх містах, крім Маріуполя, максимальний вміст CO у шлейфі спостерігався весною (в Маріуполі два максимуми: весна і літо). Після 24.02.2022 р. вміст CO у шлейфі зменшився в усіх містах відносно періоду до повномасштабного вторгнення. Максимальні значення у шлейфі навесні були у Нікополі та Черкасах, і досягали 0,037 моль/м^2, мінімальні у Сімферополі та Тернополі (0,033 моль/м^2 та 0,034 моль/м^2 відповідно). Найбільші зміни вмісту CO характерні для Маріуполя та Запоріжжя (зменшення на 14% та 9% відповідно). Фоновий вміст CO протягом загального періоду дослідження коливався у межах 0,030–0,033 моль/м^2 з максимумами весною у більшості міст. У період до

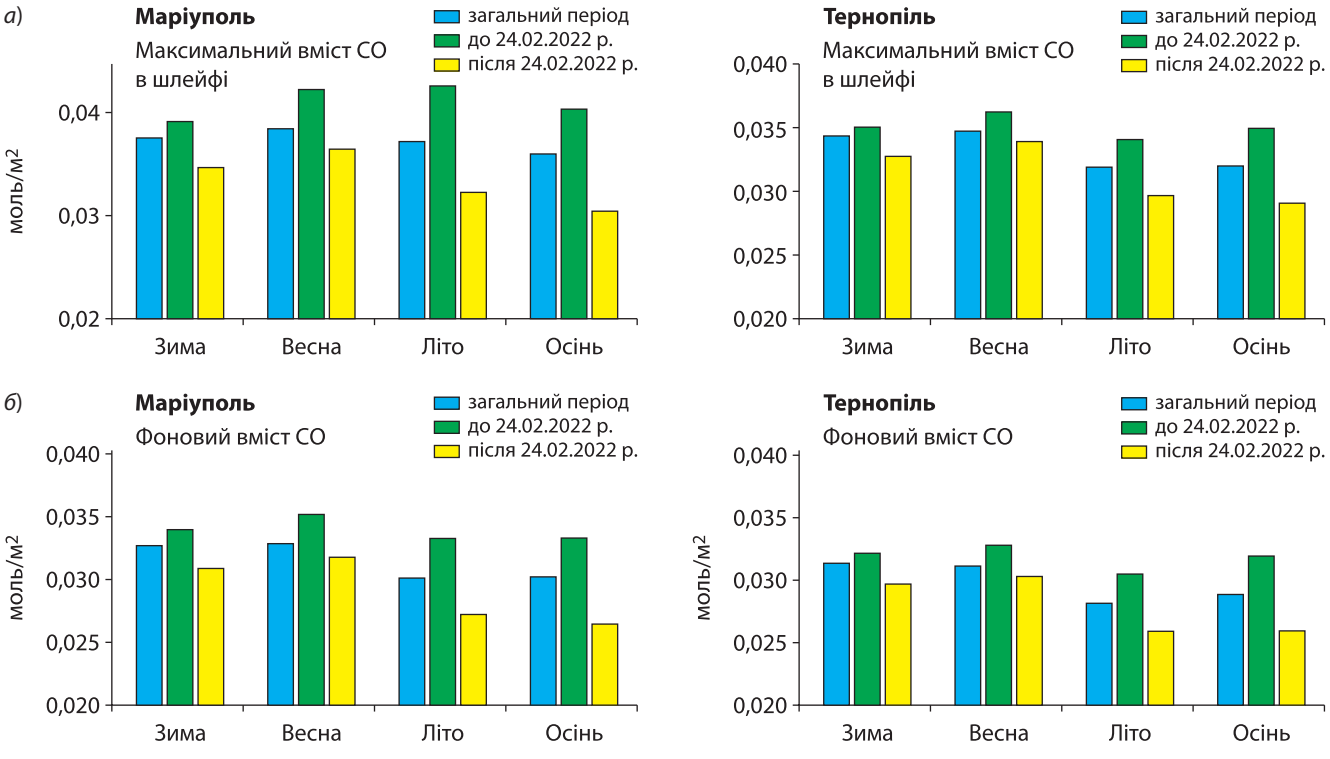

Рис. 5. Сезонні значення загального вмісту CO у шлейфі забрудненого атмосферного повітря (*а*) та фонових концентрацій поза містом (*б*) (вісь ординат на *рис. 5а* свідомо обрано різною для інформативності)

повномасштабного вторгнення найвищі значення CO були навесні, за винятком міст Суми та Черкаси, де взимку та навесні рівні забруднення були однакові. Поза містами Дніпро, Маріуполь, Херсон, Нікополь та Запоріжжя максимуми фонових значень варіювали у межах 0,033–0,035 моль/м^2. Найменший вміст CO характерний для околиць міст Тернопіль та Сімферополь. За період з 24.02.2022 року найвищі фонові значення CO зменшились відносно попереднього періоду і були у межах 0,029–0,032 моль/м^2, з максимумом у Нікополі, Кременчуці, Херсоні, та з мінімумами у Тернополі та Сімферополі.

3. Вплив війни на вміст NO2, CO та ефективності згоряння палива. Повномасштабне російське вторгнення на територію України значно вплинуло на загальну якість атмосферного повітря. У той же час деякі військово-обумовлені зміни співпадали у часі зі змінами на регіональному рівні, спричиненими метеорологічними умовами та здатністю атмосфери до накопичення забруднюючих речовин, як це показано у дослідженнях Савенець та ін. (2023). Це призводить до деяких складнощів зі встановленням основних закономірностей впливу військових дій на загальну якість атмосферного повітря та показника, що відображає зміни ефективності згоряння палива у містах.

Загалом, NO_2 та CO зазнали значного зменшення вмісту за період від початку повномасштабного вторгнення (*рис. б*). На території України включно із окупованими з 2014 р. територіями Донецької, Луганської областей та АР Крим, спостерігалося зменшення вмісту NO_2 у шлейфі на 6–34% у порівнянні із показниками до повномасштабного вторгнення (*рис. 6а*). При цьому, фоновий вміст навколо досліджуваних міст також зазнав зменшення на 6–26%, що є меншим, аніж у забрудненому шлейфі міст (*рис. 6б*). Враховуючи, що фонові значення навколо міста частково формуються за рахунок прямого впливу викидів, неможливо однозначно сказати про величину зменшення, що зумовлена війною.

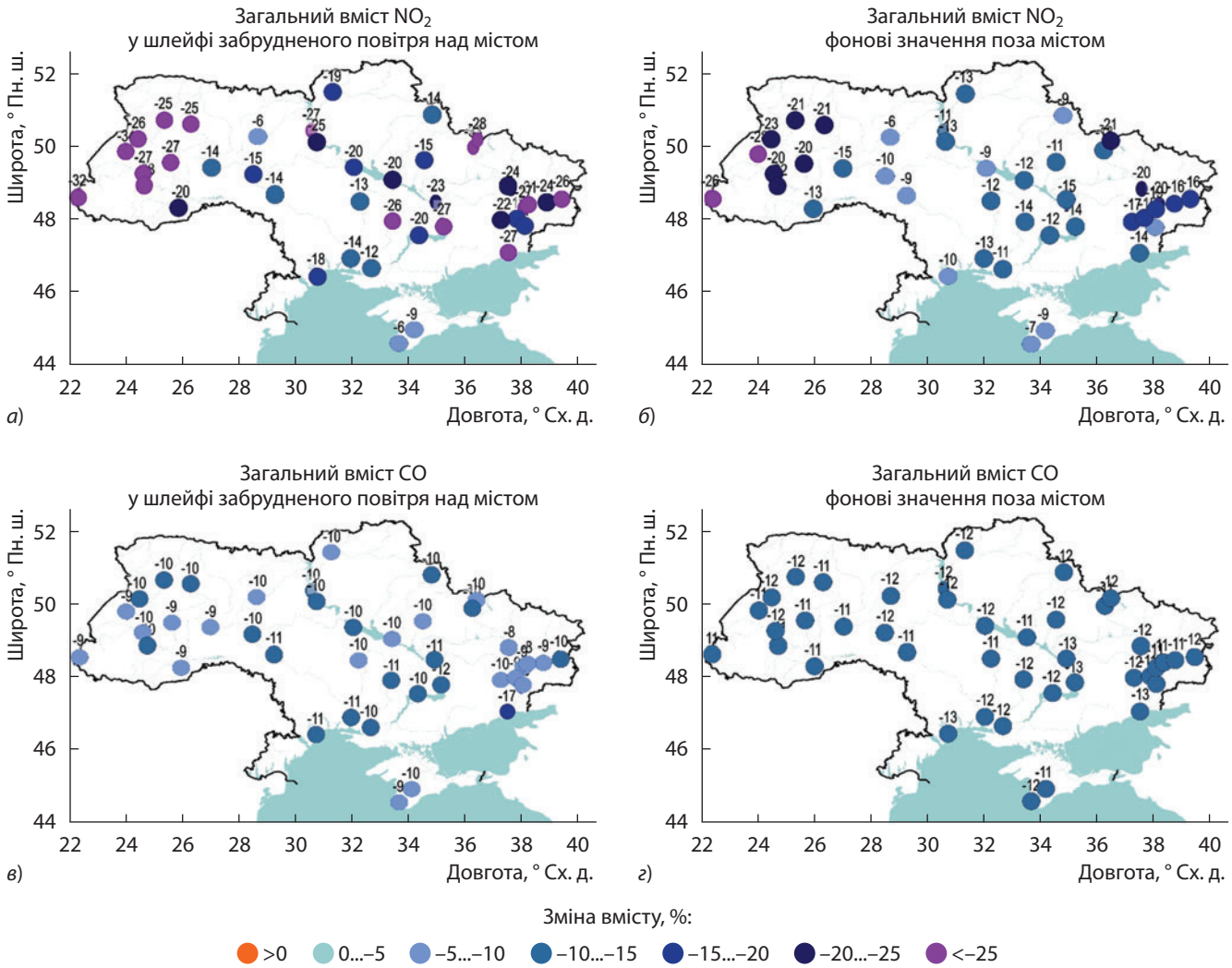

Рис. 6. Зміна загального вмісту NO_2 та CO за час повномасштабного вторгнення (у % від періоду з 01.01.2021 до 23.02.2022 р.)

Проте, однозначно можна стверджувати, що вміст NO_2 у переважній більшості міст зазнавав впливу саме внаслідок процесів зменшення викидів в межах міста. Найбільших змін зазнали міста Західної України та Донбасу (*рис. 6а, б*), а також Київ, Харків, Слобожанське, Кривий Ріг та Запоріжжя. Незначні зміни вмісту NO_2 спостерігалися у Сімферополі, Севастополі та Житомирі. Використання супутникових даних недостатньо для встановлення причин формування відмінностей у зменшенні вмісту NO_2 між різними містами. Такий аналіз потребує залучення даних наземної мережі спостережень за забрудненням атмосферного повітря, офіційних зведень щодо змін викидів промислових підприємств під час повномасштабного вторгнення, статистики внутрішньо переміщених осіб, та додаткових метеорологічних даних. На даному етапі можливим є лише встановлення загальних закономірностей змін NO_2.

Загальний вміст CO у шлейфі забрудненого повітря міст зменшився на 9–17% (*рис. 6в*), тоді як для зменшення фонових значень характерна чітка однорідність просторового розподілу в межах 11–13% (*рис. 6г*). Характер зменшення фонових значень в околицях міст вказує на загальне регіональне зменшення вмісту CO, що вже було підтверджено у Савенець та ін. (2023). Таким чином, зміна CO у містах, перш за все, характеризується менш інтенсивним зменшенням, ніж фон. Це означає, що у містах продовжувалися викиди вуглецевмісних забруднюючих речовин. Визначити точно наслідки військових дій є неможливим, так як, з одного боку, руйнування промислових об'єктів призводить до зменшення викидів CO. У той же час, перехід на більш "брудне" паливо сприяє зростанню викидів CO. Реальний вміст формувався на основі співвідношення таких процесів. Загалом, спостерігається менш інтенсивне зниження CO на 2–3% у містах у порівнянні з фоновими значеннями за їх межами, за винятком 8 міст (Добротвір, Запоріжжя, Івано-Франківськ, Кривий Ріг, Ладижин, Рівне, Сімферополь, Харків). Подібно до NO_2, встановлення причин формування відмінностей у зменшенні CO між містами потребує залучення додаткових даних. Єдиним виключенням є Маріуполь, де за час повномасштабного вторгнення CO зменшилося на 17% і перевищило фонове зменшення. Зрозуміло, що причиною цього є зупинка роботи і повне знищення "Азовсталі", яка була основним джерелом викидів вуглецевмісних забруднюючих речовин у регіоні.

Зміни вмісту NO_2 та CO не були однаковими протягом повномасштабного російського вторгнення. Умовне розділення періоду до ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури та після чітко вказує

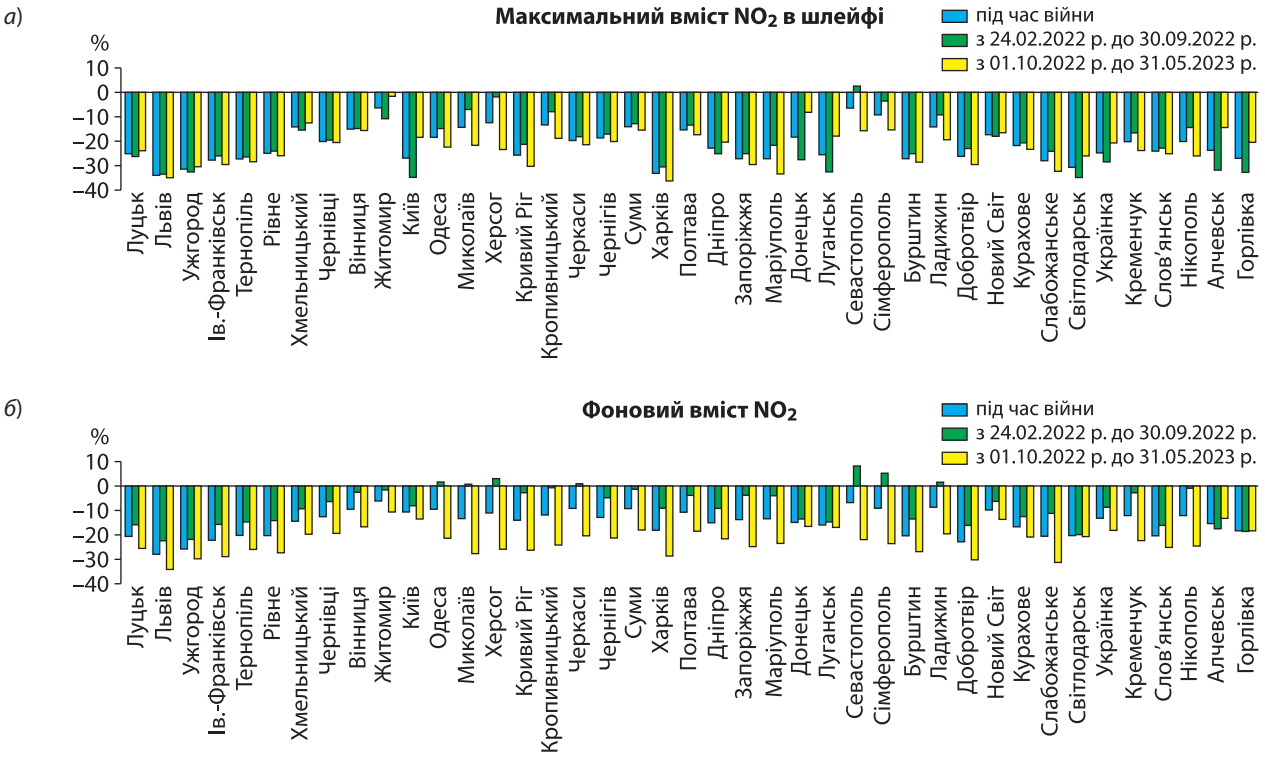

Рис. 7. Зміна загального вмісту NO2 в атмосфері за час повномасштабного вторгнення, до та після ударів по енергетичній інфраструктурі

на відмінності у змінах забруднення атмосферного повітря. Перш за все, чітко простежується інтенсивне фонове зменшення вмісту NO_2 в атмосферному повітрі після початку ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури (*рис. 7б*). Величина цих змін близька до величини змін у шлейфі забрудненого повітря міст (*рис. 7а*). Тобто, удари по об'єктах енергетичної інфраструктури дійсно мали значні наслідки для вмісту NO_2. У той же час, початок і перший досліджуваний період війни характеризувався значними наслідками саме у містах. Зокрема, зміни були більш інтенсивні в цей час у Луцьку, Хмельницькому, Житомирі, Києві, Українці, Дніпрі, Донецьку, Луганську, Світлодарську, Алчевську та Горлівці. Якщо для частини неокупованих українських міст більш значні зміни пов'язані із особливостями перебігу військових дій (напр., Київ та Житомир зазнали наймасштабнішого впливу у перші місяці війни), то велика частина окупованих міст Донецької та Луганської областей зазнали меншого впливу після 01.10.2022 р. за рахунок відсутності ракетних ударів по енергосистемі міст окупованих областей. Зміни вмісту CO у містах до та після ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури була більш однорідною (*рис. 8*), та загалом відповідає закономірностям, наведеним на рис. 6в,г і проаналізованим вище. Після початку ударів по енергетичній інфраструктурі, вміст CO збільшився як у шлейфі, так і за фоном (*рис. 8а, б*). Проте, наявного періоду досліджень недостатньо, щоб виокремити роль сезонного зростання CO у холодний період року.

Показник ефективності згоряння палива $d\mathrm{NO_2}/d\mathrm{CO}$, визначений за даними супутникових спостережень, є досить мінливим і наразі недостатньо точним показником. Як наслідок, його аналіз має супроводжуватися оцінкою змін відносно попередніх значень. За середніми даними в період до повномасштабного вторгнення $d\mathrm{NO_2}/d\mathrm{CO}$ коливався у межах 5,5–16,5 із найвищими значеннями у Києві (16,5), Новому Світі (16,4), Кураховому (15,4), Світлодарську (15,0) та Горлівці (14,9). Найнижчим $d\mathrm{NO_2}/d\mathrm{CO}$ був у Севастополі, Херсоні та Миколаєві (5,5–6,8). У період з початку повномасштабного вторгнення та ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури він коливався вже у межах 4,1–14,5. Найвищі його значення зафіксовані у Новому Світі (14,5), Кураховому (11,3), Донецьку (10,0), Києві (9,3) та Бурштині (8,6). У переважній більшості міст $d\mathrm{NO_2}/d\mathrm{CO}$ знаходився у межах 5,0–7,5. Найнижчі значення цього індексу відмічалися у Севастополі та Херсоні. Після початку обстрілів енергетичної інфраструктури $d\mathrm{NO_2}/d\mathrm{CO}$ коливався від 5,5 до 14,9, з найвищими значеннями у Донецьку (14,9), Києві (14,0), Кураховому (13,5), Новому Світі (13,5), та Дніпрі (11,6). Найнижчі значення, як і в попередній період, були у Севастополі та Херсоні.

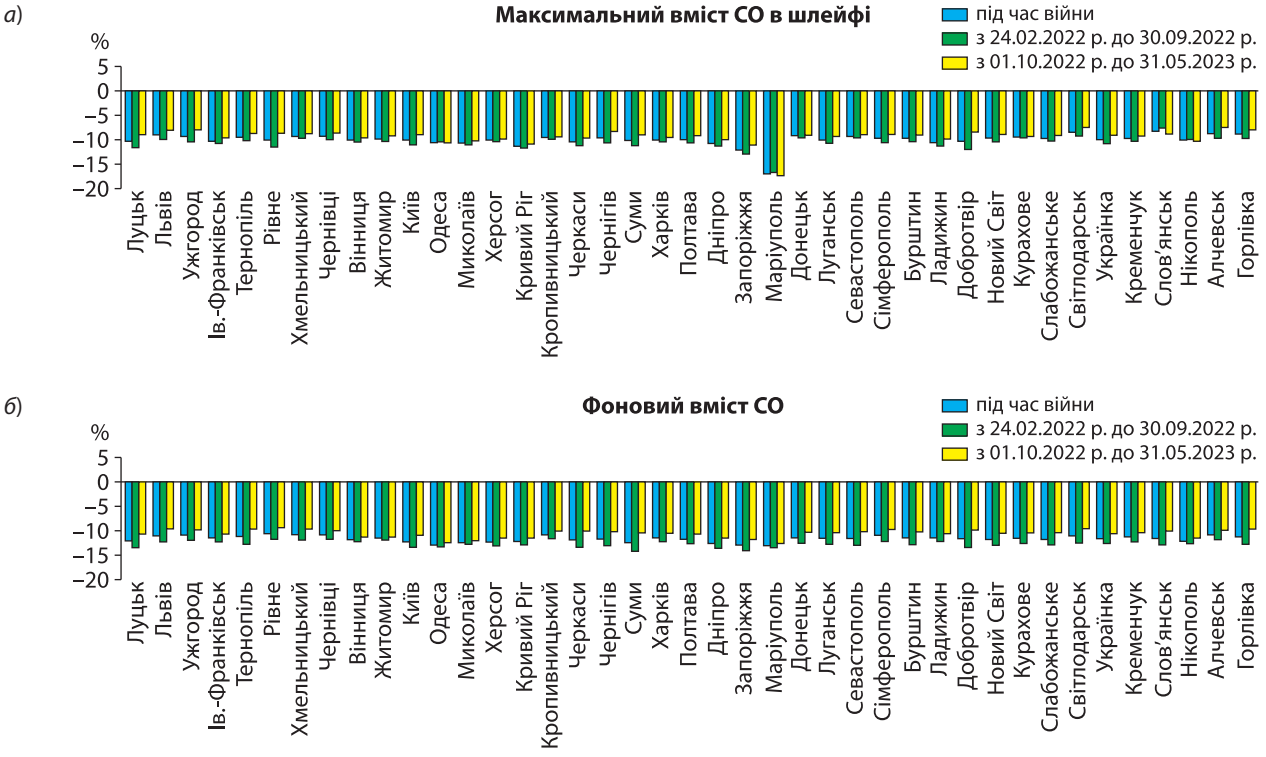

Рис. 8. Зміна загального вмісту CO в атмосфері за час повномасштабного вторгнення, до та після ударів по енергетичній інфраструктурі

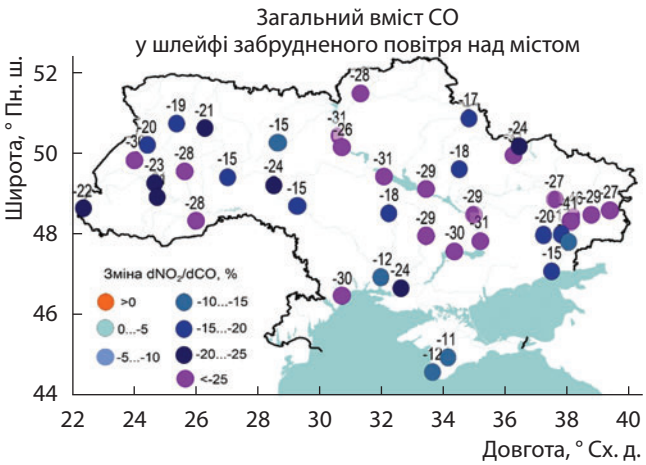

Рис. 9. Зміна показника ефективності згоряння палива (dNO_2/dCO) за час повномасштабного вторгнення (у % від значень за період 01.01.2021–23.02.2022 р.)

Загалом, за час повномасштабного російського вторгнення, dNO_2/dCO зменшився на 11–46% (*рис. 9*), що означає збільшення використання твердого палива або мазуту у містах України і зменшення використання газу. Особливо значні зміни спостерігалися у Донецькій (за винятком південної частини) та Луганській областях, усіх містах вздовж р. Дніпро від Києва до Нікополя, а також в Одесі, Чернівцях, Тернополі та Львові.

Зміни dNO_2/dCO відбулися одразу після початку повномасштабного вторгнення. При цьому, показник dNO_2/dCO є досить чутливим саме до змін NO_2 у шлейфі забрудненого повітря. Найбільші зміни до 53% зафіксовані протягом 24.02.2022–30,09.2022 у містах Світлодарськ, Горлівка, Дніпро, Київ, Луганськ, Кременчук, Українка, Нікополь та Одеса. Слід відмітити, що в період з 01.10.2022 у Севастополі, Сімферополі, Миколаєві та Донецьку dNO_2/dCO зріс до 5% від періоду до повномасштабного вторгнення (*рис. 10*).

Поряд із встановленими змінами dNO_2/dCO, важливим є продовження накопичення статистичних даних та проведення аналізу на довших часових рядах у майбутньому. Враховуючи великі похибки при визначенні загального вмісту NO_2 та CO у вертикальному стовпі атмосферного повітря, не усі причини можливо чітко виділити за досліджуваний період. Зміна типу палива є найбільш суттєвою, враховуючи той факт, що ТЕЦ/ТЕС в Україні формували основне поле забруднення, яке можна було діагностувати за даними супутникових спостережень (Осадчий та ін., 2023). Проте, повномасштабне російське вторгнення призвело до переміщення значної кількості населення, а відповідно, і перерозподілу викидів автотранспорту. Близькість територій до лінії фронту також може мати відображення на змінах показника dNO_2/dCO, беручи до уваги потенційно значну роль викидів військової техніки (Savenets et al., 2023) та інтенсивні лісові пожежі внаслідок артилерійських обстрілів (Осадчий та ін., 2023; Savenets et al., 2023).

ВИСНОВКИ

У статті встановлено особливості зміни загального вмісту NO_2 та CO над містами України у шлейфі забрудненого повітря та фонових показників унаслідок впливу воєнних дій. На основі проаналізованого стану якості атмосферного повітря напередодні повномасштабного російського вторгнення, встановлено загальне зменшення NO_2 на 6–34% та зменшення CO на 9–17%. У порівнянні із фоновим вмістом, зменшення NO_2 в межах міст було більш інтенсивним, що не було характерно для CO (за винятком Маріуполя). У більшій частині міст почав спостерігатися сезонний перерозподіл вмісту NO_2 в атмосферному повітрі з максимумами влітку. Після початку ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури стало чітко простежуватися фонове

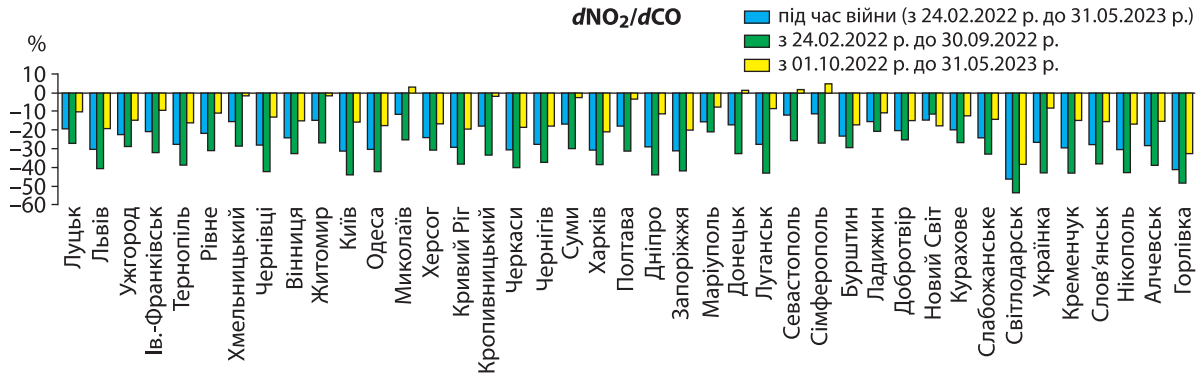

Рис. 10. Зміна показника ефективності згоряння палива (dNO_2/dCO) за час повномасштабного вторгнення, до та після ударів по енергетичній інфраструктурі

зменшення NO_2 в атмосферному повітрі. Загальний вміст CO характеризується однорідними змінами над усією територією України, суттєвих відмінностей між сезонами та періодами війни не виявлено. На основі досліджуваних показників обчислено параметр dNO_2/dCO, що дозволив виявити зміни ефективності згоряння палива у містах як індикатора зміни переважаючих типів палива. Загалом, за час повномасштабного російського вторгнення dNO_2/dCO зменшився на 11–46%, що опосередковано може свідчити про збільшення використання твердого палива або мазуту у містах України і зменшення використання газу. Зміни dNO_2/dCO почали спостерігатися відразу після початку повномасштабного вторгнення, більш чутливо реагуючи до змін вмісту забруднюючих речовин у шлейфі.

Проведені дослідження доводять, що вже за перший рік війни наслідки руйнування підприємств та об'єктів енергетичної інфраструктури спричинили зміни забруднення атмосферного повітря на регіональному рівні.

Врахування таких регіональних змін разом із перерозподілом джерел викидів є необхідними для перегляду всіх планів управління якістю атмосферного повітря, та відбудовою чи створенням інфраструктурних об'єктів як під час війни, так і в післявоєнний період.

Супутникове зондування проявило потенціал до оцінки параметрів ефективності згоряння палива, який може слугувати підтримкою інвентаризації викидів, що вкрай важко зробити під час воєнних дій.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Apituley, A., Pedergnana, M., Sneep M., et al. (2022). Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Carbon Monoxide. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands.
2. Assessment of the Environmental Impact of Military Activities During the Yugoslavia Conflict. Preliminary Findings. (1999). The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe.
3. Austin, J.E., & Bruch, C.E (Eds.). (2000). The Environmental Consequences of War: Legal, Economic and Scientific Perspectives. Cambridge University Press.
4. Borsdorff, T., García Reynoso, A., Maldonado, G., Mar-Morales, B., Stremme, W., Grutter, M., & Landgraf, J. (2020). Monitoring CO emissions of the metropolis Mexico City using TROPOMI CO observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20 (24)**, 15761–15774. https://doi.org/10.5194/acp-20-15761-2020
5. Du, Z., Sarofim, A.F., Longwell, J.P., & Tognotti, L. (1991). The CO/CO_2 Ratio in the Products of the Carbon-Oxygen Reaction. In *Fundamental Issues in Control of Carbon Gasification Reactivity* (pp. 91–106). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3310-4_5
6. Eskes, H., van Geffen, J., Boersma, F., et al. (2022). Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogendioxide. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands.
7. Griffin, D., McLinden, C.A., Dammers, E., Adams, C., Stockwell, C.E., Warneke, C., Bourgeois, I., Peischl, J., Ryerson, T.B., Zarzana, K.J., Rowe, J.P., Volkamer, R., Knote, C., Kille, N., Koenig, T.K., Lee, C.F., Rollins, D., Rickly, P.S., Chen, J., … Makar, P. (2021). Biomass burning nitrogen dioxide emissions derived from space with TROPOMI: methodology and validation. *Atmospheric Measurement Techniques*, **14 (12)**, 7929–7957. https://doi.org/10.5194/amt-14-7929-2021
8. Goldberg, D.L., Lu, Z., Oda, T., Lamsal, L.N., Liu, F., Griffin, D., McLinden, C.A., Krotkov, N.A., Duncan, B.N., & Streets, D.G. (2019). Exploiting OMI NO_2 satellite observations to infer fossil-fuel CO_2 emissions from U.S. megacities. *Science of The Total Environment*, **695**, 133805. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133805
9. Ialongo, I., Bun, R., Hakkarainen, J., Virta, H., & Oda, T. (2023). Satellites capture socioeconomic disruptions during the 2022 full-scale war in Ukraine. *Scientific Reports*, **13 (1)**, 14954. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42118-w
10. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K.F., Eskes, H., Aben, I., Denier van der Gon, H.A.C., Krol, M.C., Dolman, H., Borsdorff, T., & Lorente, A. (2020). Quantifying burning efficiency in megacities using the NO_2/CO ratio from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20 (17)**, 10295–10310. https://doi.org/10.5194/acp-20-10295-2020
11. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K.F., Aben, I., Denier van der Gon, H.A.C., & Krol, M.C. (2022). Estimation of OH in urban plumes using TROPOMI-inferred NO_2/CO. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22 (24)**, 16053–16071. https://doi.org/10.5194/acp-22-16053-2022
12. OESD (2022). Environmental impacts of the war in Ukraine and prospects for a green reconstruction. Retrieved from https://www.oecd.org/ukraine-hub/policy-responses/environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine-and-prospects-for-a-green-reconstruction-9e86d691/ (Accessed: 28.08.2023)
13. Payne, C.R., & Sand, P.H (Eds.). (2011). Gulf War Reparations and the UN Compensation Commission. Environmental Liability. Oxford University Press.
14. Sadiq, M., & McCain, C. (Eds.). (1993). The Gulf War Aftermath: An Environment Tradegy. Springer Netherlands.
15. Sasmoko, Imran, M., Khan, S., Khan, H. ur R., Jambari, H., Musah, M.B., & Zaman, K. (2023). War psychology: The global carbon emissions impact of the Ukraine-Russia conflict. *Frontiers in Environmental Science*, **11**. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1065301
16. 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
17. Saw, G.K., Dey, S., Kaushal, H., & Lal, K. (2021). Tracking NO_2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, **259**, 118514. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514
18. Silva, S.J., Arellano, A.F., & Worden, H.M. (2013). Toward anthropogenic combustion emission constraints from space-based analysis of urban CO_2/CO sensitivity. *Geophysical Research Letters*, **40 (18)**, 4971–4976. https://doi.org/10.1002/grl.50954

19. Solomon, N., Birhane, E., Gordon, C., Haile, M., Taheri, F., Azadi, H., & Scheffran, J. (2018). Environmental impacts and causes of conflict in the Horn of Africa: A review. *Earth-Science Reviews*, **177**, 284–290. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.016
20. UNEP (2023). The toxic legacy of the Ukraine war. Retrieved from https://www.unep.org/news-and-stories/story/toxic-legacy-ukraine-war (Accessed: 28.08.2023)
21. Wan, N., Xiong, X., Kluitenberg, G.J., Hutchinson, J.M.S., Aiken, R., Zhao, H., & Lin, X. (2023). Estimation of biomass burning emission of NO_2 and CO from 2019–2020 Australia fires based on satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23 (1)**, 711–724. https://doi.org/10.5194/acp-23-711-2023
22. WWF (2022). Assessing the environmental impacts of the war in Ukraine. Retrieved from https://wwfcee.org/our-offices/ukraine/assessing-the-environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine (Accessed: 28.08.2023)
23. 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
24. Zhang, C., Hu, Q., Su, W., Xing, C., & Liu, C. (2023). Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war. *Science of The Total Environment*, **869**, 161759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759
25. Osadchyi V., Oreshchenko A. & Savenets M. (2023). Satellite monitoring of fires and air pollution. Kyiv: State Emergency Service of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukrainian Hydrometeorological Institute. https://doi.org/10.15407/uhmi.2023_1 [In Ukrainian]
26. Rybchynska, V. & Savenets, M. (2023). The use of remote sensing of atmospheric composition for burning efficiency estimation for Ukrainian territory. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology]*, **2 (68)**, 43–55. https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.5 [In Ukrainian]

Lyudmyla Nadtochii[1]
ORCID: 0000-0003-3038-5960
onoslyuda@uhmi.org.ua

Valeriia Rybchynska[1,2]
ORCID: 0009-0008-5343-8723
valeriia.rybchynska@studio.unibo.it

Mykhailo Savenets[1]
ORCID: 0000-0001-9429-6209
savenets@uhmi.org.ua

[1] *Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[2] *University of Bologna, Bologna, Italy*

CHANGES IN ATMOSPHERIC AIR POLLUTION AND FUEL COMBUSTION EFFICIENCY IN UKRAINIAN CITIES DUE TO MILITARY ACTIONS

The full-scale russian invasion of Ukraine significantly changed atmospheric air pollution in Ukrainian cities. Most changes can be identified using only remote sensing data due to its spatial coverage. In the presented paper, we perform the analysis of war impacts on nitrogen dioxide (NO_2) and carbon monoxide (CO) spatial distribution derived from the TROPOspheric MOnitoring Instrument (TROPOMI) of the Sentinel-5 Precursor (S5P) satellite data for the period of January 2021 – May 2023. Based on their content in polluted plumes over the city and in the background, the parameter dNO_2/dCO for burning efficiency assessment was calculated and processed. The overall decrease in NO_2 and CO content was detected in the cities, reaching 6–34% and 9–17%, respectively. In comparison to background content, the NO_2 drop in cities was more significant. At the same time, CO decreased by 2–3% more in the background than over the cities (except Mariupol, where Azovstal was totally destroyed). Since the full-scale hostilities have started, total NO_2 content began redistributing seasonally and its summer maxima started to appear in the majority of cities. Starting from the period of regular drone and missile attacks on energy infrastructure, background NO_2 significantly decreased, showing a regional response. CO total content has changed mostly homogeneously over the entire studied domain. There were no seasonal shifts or dependencies during the period of war. Using the four parameters mentioned, we estimated burning efficiency changes based on the dNO_2/dCO parameter. It allowed us to detect possible changes in fuel use. Overall, dNO_2/dCO decreased by 11–46% which indirectly proved the increase in solid or "dirty" fuel use and less gas consumption. Burning efficiency dropped immediately after the full-scale invasion started, becoming more sensitive to pollutants content in the plume. The consideration of the researched parameters is important for making new atmospheric air quality management plans in cities, rebuilding damaged infrastructure, and creating emission inventories during the wartime.

Keywords: *nitrogen dioxide, carbon monoxide, Sentinel-5P, plume, background content.*