

УДК 551.510.42, PACS 92.00.00, 89.60.Gg:

СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ НАПЕРЕДОДНІ ПОВНОМАСШТАБНОГО РОСІЙСЬКОГО ВТОРГНЕННЯ. ЧАСТИНА 2: ЗАГАЛЬНИЙ ВМІСТ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

М. В. Савенець, Л. М. Надточій, Т. В. Козленко, К. М. Комісар, Н. С. Жемера

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр-т. Науки, 37, 03028, Київ, Україна, savenets@uhmi.org.ua

Робота присвячена дослідженню загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в Україні для встановлення базового стану якості атмосферного повітря напередодні повномасштабного російського вторгнення. Дослідження проведені на основі щоденних даних супутникового зондування приладом TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на супутнику Sentinel-5 Precursor (5P) для діоксиду азоту (NO_2), діоксиду сірки (SO_2), монооксиду вуглецю (CO) та формальдегіду (CH_2O). Встановлено особливості просторового розподілу забруднюючих речовин з повним охопленням території України. Незважаючи на зростання ролі автотранспорту, найбільш забруднене повітря продовжувало спостерігатися над великими промисловими містами та над населеними пунктами із основними тепловими електростанціями. Високі значення вмісту забруднюючих речовин над такими містами під впливом переважаючого перенесення формують основні осередки забрудненого повітря, що охоплюють значні території. Так, основними забрудненими зонами є Донецька область; території центральної України вздовж р. Дніпро та колишнього Каховського водосховища; м. Харків і Зміївська ТЕС; м. Київ і Трипільська ТЕС; та територія на заході, що охоплює Львів, Добротвірську і Бурштинську ТЕС. Забруднення від цих районів визначає якість атмосферного повітря за переважаючим напрямком вітру. За умов високих швидкостей вітру, забруднене повітря від промислово навантажених районів може поширюватися на найбільш чисті території, якими є високігірні райони в Українських Карпатах та Криму, північ Полісся, і над заповідником «Медобори» на Поділлі. Для кожної забруднюючої речовини встановлені кількісні показники швидкості та напрямку вітру, які формують вищі значення загального вмісту над відносно чистими територіями. Залежно від висоти граничного шару атмосфери (ГША) змінюються умови розсіювання домішок в атмосфері. Встановлено, що за висот ГША менше ніж 500 м значно зростає загальний вміст NO_2 , CO та SO_2 як у містах, так і над чистими районами з відсутніми джерелами викидів. Виявлено зворотну залежність вмісту CH_2O від висоти ГША, пов'язану із інтенсивним фотохімічним утворенням домішки на висотах. Досліджений базовий стан якості атмосферного повітря може бути використано для оцінки наслідків воєнних дій в Україні та розробленні заходів післявоєнного розвитку.

Ключові слова: Sentinel-5P; загальний вміст; забруднення; викиди; атмосферне повітря.

1 ВСТУП

У лютому 2022 року розпочалося повномасштабне російське вторгнення на територію України. Перерозподіл джерел викидів, руйнування промислових підприємств, формування численних нових джерел викидів внаслідок воєнних дій та ракетних ударів – усе це призводить до зміни просторово-часових закономірностей формування поля забруднення над територією України. Будь-яка оцінка наслідку воєнних дій на стан якості атмосферного повітря потребує наявності опису базового стану забруднення напередодні війни. Тільки за умов порівняння із базовим станом є

можливим проведення надійної оцінки змін у концентраціях забруднюючих речовин та їх мінливості. У попередній роботі [1], представлено аналіз базового стану для приземного вмісту забруднюючих речовин на основі даних наземних спостережень. Проте, точковість вимірів та мала кількість постів спостережень не дозволяє отримати повне уявлення про якість атмосферного повітря. Враховуючи часткову втрати постів моніторингу, а також факт формування більшості джерел викидів на територіях без наземних спостережень, існує потреба у описі базового стану за даними супутникових спостережень, що дозволить повністю охопити

територію України та, у майбутньому, оцінити наслідки з повним просторовим охопленням.

Незважаючи на недоліки супутникового зондування, пов'язані із залежністю від хмарності та значеннями вмісту забруднюючої речовини у стовпі атмосфери, їх використання показало вкрай ефективний засіб для якісної оцінки рівнів забруднення [2-4] і вирішенням задач управління якістю атмосферного повітря [5]. Значне покращення просторової роздільної здатності вмісту хімічних складових відбулося із запуском супутника Sentinel-5 Precursor (5P) з приладом TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на борту, що дозволило деталізувати оцінки без погіршення у просторовому охопленні [6,7]. Показано хорошу узгодженість супутникових і наземних даних [8], що для території України може порушуватися у зв'язку із особливістю розташування постів спостережень поблизу прямого впливу джерел викидів [9]. Використання супутникових даних із метою окреслення базового стану якості атмосферного повітря для проведення порівняння було проведено для оцінки наслідків впливу пандемії COVID-19 [3,10-12]. Частково це вже починає розглядатися і у випадку російського повномасштабного вторгнення [13,14].

В Україні вже набуло широкого використання супутникових даних хімічних складових атмосферного повітря. Здійснені як якісна оцінка стану окремих урбанізованих територій чи усєї території України [15-17], так і кількісна оцінка різноманітних параметрів у поєднанні із даними наземних спостережень [9,18-20]. Розпочалися процеси з інтегрування супутникових даних із іншими джерелами інформації задля створення концепції сучасного моніторингу [21].

Метою даної роботи є оцінка типових статистичних характеристик забруднення атмосферного повітря за даними супутникових спостережень напередодні повномасштабного російського вторгнення, здійсненого для основних забруднюючих речовин (діоксиду сірки (SO₂), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та формальдегіду (CH₂O)). Важливим є врахування метеорологічних умов формування загального вмісту забруднюючих речовин задля встановлення територій, що найбільше потерпають від забруднення великих міст внаслідок атмосферного перенесення, та виявлення умов за яких високий вміст може формуватися над відносно чистими районами території України.

2 ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено на основі щоденних даних супутникових спостережень Sentinel-5P приладом TROPOMI із просторовою роздільною здатністю 3.5×5.5 км за період з 2019 до 2021 рр. Аналіз здійснено для загального вмісту діоксиду азоту (NO₂), монооксиду вуглецю (CO), формальдегіду (CH₂O) та діоксиду сірки (SO₂) у вертикальному стовпі атмосферного повітря (одиниці вимірювання: моль/м³). Дані завантажено із офіційного хабу Sentinel-5P (<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>) у вигляді режимних (англ.: offline (OFFL)) даних другого рівня архівації (Level-2).

У зв'язку з тим, що покриття Sentinel-5P відрізняється із дня у день і координати пікселів не співпадають, дані було впорядковано у регулярну сітку координат із кроком 0.1°×0.1° (англ.: binning procedure) із використанням програмного пакету HARP [22] для автоматизації процесу. Впорядкування у регулярну сітку дозволило сформувати часові ряди для кожного ґрідів (загальна кількість ґрідів для території України і суміжних областей складає 21000). Фільтрування даних проведено за рекомендованими стандартними значеннями індексу якості даних (англ.: quality assurance value) 0.75 для NO₂, та 1.0 для CO, CH₂O і SO₂.

Так як загальний об'єм супутникових даних Sentinel-5P використаних для дослідження перевищував 3 Тб, увесь процес обробки даних здійснено із використанням мов програмування Python, VB.NET та бат-скриптів.

Аналіз супутникових даних вмісту забруднюючих речовин супроводжувався аналізом метеорологічної інформації із реаналізу ERA5 [23]. Супутникові дані надходять один раз на добу близько 13:00, тому у випадку окремих розрахунків, що потребують сумісного використання даних забруднення та метеорологічної інформації, використано лише строк 10UTC. Загалом сумісний аналіз проведено для метеорологічних параметрів, що впливають на умови розсіювання домішок: напрямку та швидкості вітру, і висоти граничного шару атмосфери (ГША).

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Повне уявлення про базовий стан забруднення атмосферного повітря на основі даних супутникових спостережень, за яким можливо здійснити майбутню оцінку наслідку

воєнних дій, потребує як аналізу загального вмісту забруднюючих речовин, так і розуміння залежності формування поля забруднення від метеорологічних умов. Це дозволить виявити, які території перестали або почали зазнавати негативного впливу від викидів, та як перерозподіл джерел викидів вплинув на формування забруднення у відносно чистих районах. Тому, у даній статті аналіз результатів здійснено у два етапи: оцінки стану забруднення атмосферного повітря над територією України та оцінки впливу метеорологічних умов на поширення і зміни загального вмісту забруднюючих речовин.

3.1 Стан забруднення атмосферного повітря над територією України

Напередодні повномасштабного російського вторгнення, найбільш забруднене атмосферне повітря продовжувало спостерігатися у промислових містах України. Незважаючи на роль викидів від пересувних джерел та менші обсяги виробництва у порівнянні із попередніми десятиріччями, все ще зберігалася визначальна роль промисловості у формуванні локальних максимумів концентрацій забруднюючих речовин.

Середні значення загального вмісту NO_2 у 2019-2021 рр. були найвищими у промислових містах Донбасу та невеликих містах із потужними ТЕЦ, зокрема у Кураховому, Новому Світі, Донецьку, Світлодарську, Слов'янську, Краматорську (Донецька область), Бурштині (Івано-Франківськ область) та Добровірі (Львівська область). Типовими для цих міст є значення близько $5.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м³ (рис. 1а), що перевищували вміст у великих містах зі значним внеском автотранспорту (як Київ, Дніпро, Харків). Фонові значення відрізняються залежно від території та щільності розташування міст. На більшій частині території України фоновий вміст NO_2 складає $4.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м³, а у віддалених районах від промислових міст – близько $3.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м³. Більш чистими є північні райони Житомирської, Чернігівської та Сумської областей, південь Херсонської, північ і південь Одеської, західна частина Кіровоградської областей, а також більша частина Миколаївської області та АР Крим за умови віддаленості від великих міст більше ніж на 50 км. Мінімуми просторового розподілу NO_2 спостерігаються у високогірних районах Карпат та Криму.

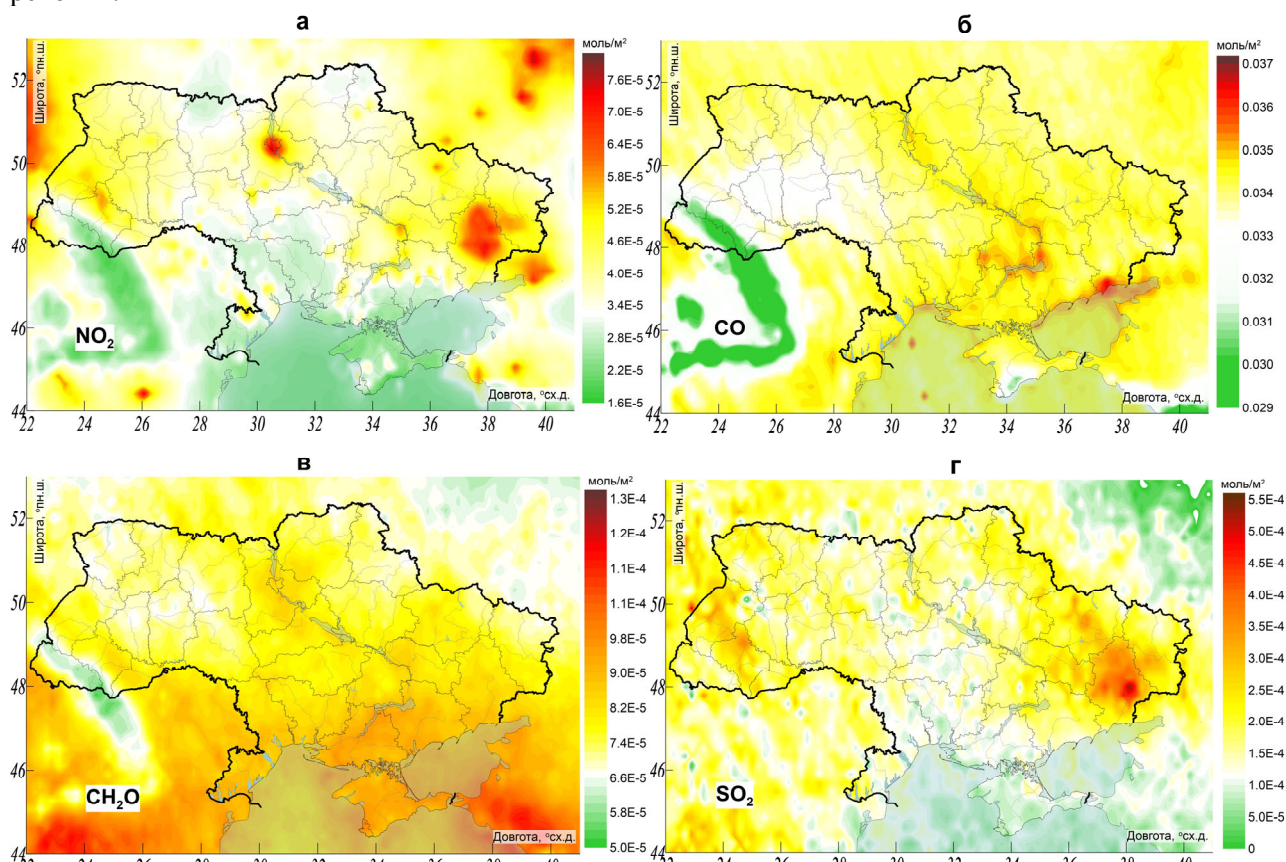


Рис. 1 – Просторовий розподіл загального вмісту NO_2 (а), CO (б), CH_2O (в) та SO_2 (г) за період 2019-2021 рр.
 Fig. 1 – Spatial distribution of NO_2 (a), CO (б), CH_2O (в) and SO_2 (г) total content for the period of 2019-2021

Загальний вміст CO в атмосфері розподілений більш однорідно завдяки довшому часу існування в атмосферному повітрі (кілька місяців у порівнянні із кількома годинами для NO₂), розподіляючись між основними районами із великою кількістю джерел викидів. Над територією України середні значення CO варіюють від 0.030 моль/м² до 0.036 моль/м² (рис. 1б). Максимуми у просторовому розподілі спостерігаються тільки на рівні окремих урбанізованих районів з потужними промисловими викидами. Такими містами на території України напередодні війни були Маріуполь, Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг, а також територія, що охоплює міста Марганець – Нікополь – Енергодар. Дещо менший вміст CO, з осередками підвищених значень на захід за переважаючим перенесенням повітряних мас, характерний для Києва й Українки, а також над містами Горішні Плавні, Кременчук і Світловодськ. Забрудненою є берегова лінія, що пов'язано із викидами морського транспорту, яке переважно використовує достатньо «брудне» паливо. Як було показано у [17], з травня по вересень значний внесок мали туристичні судна. Фонові значення над більшою частиною території України сягають 0.034 моль/м². Мінімуми просторового розподілу характерні для Подільської височини із загальним вмістом CO близько 0.033 моль/м²; Кримських гір із вмістом 0.031 моль/м², та Українських Карпат із вмістом близько 0.030 моль/м².

Менша точність визначення загального вмісту CH₂O призводить до неможливості детального визначення наслідків більшої кількості викидів. Просторовий розподіл над територією України переважно відображає закономірності сформовані великомасштабними процесами (рис. 1в), тобто процесами перенесення від найпотужніших джерел викидів та загальними закономірностями вторинного фотохімічного формування CH₂O внаслідок розкладу алкенів [24,25]. Загальний вміст CH₂O зростає у напрямку на південь зі зміною фонового вмісту із 7.5·10⁻⁵ моль/м² на півночі території України до 9.0·10⁻⁵ моль/м² на півдні. В той же час, простежуються наслідки викидів від великих міст, зокрема Києва, Дніпра, Запоріжжя, та ін. Оцінити кількісно ці наслідки неможливо, проте якісно CH₂O перевищує фонові значення приблизно на 30%. Мінімуми просторового розподілу характерні для Українських Карпат та заповідних територій в районі Шацьких озер і на

Подільській височині, де середній вміст CH₂O зменшується до 5.0·10⁻⁵ моль/м².

Загальний вміст SO₂ у атмосфері переважно використовується для виявлення наслідків потужних джерел викидів, у той час як чутливість приладів не дозволяє кількісно аналізувати невисокий вміст SO₂. Над територією України максимуми формуються над містами із великими ТЕС, та потужними промисловими підприємствами, що працюють на твердому паливі. Масштабний осередок високого вмісту SO₂ формується над Донецькою областю із значеннями вище 3.5·10⁻⁴ моль/м² (рис. 1г). Подібні осередки прослідковуються над Бурштинською, Добротвірською та Зміївською (сmt. Слобожанське) ТЕС. Фонові значення загального вмісту SO₂ не перевищують 1.5·10⁻⁴ моль/м².

Узагальнюючи просторовий розподіл загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі наведеному на рис. 1, стає можливим виокремити найзабрудненіші райони сформовані сукупністю викидів промислових міст, та найчистіші райони із мінімумами вмісту (рис. 2).

У першу чергу виокремлюється Донецька область, де високі значення забруднюючих речовин продовжували спостерігатися навіть після окупації 2014 року (на відміну від Луганської області). У цьому районі значні викиди продовжували спостерігатися по обидві сторони від лінії розмежування, що сприяло формуванню єдиного осередку забрудненого повітря. Загалом, цей осередок забрудненого повітря охоплює Слов'янськ, Краматорськ, Курахівську ТЕС, непідконтрольні Донецьк, Харцизьк, Новий Світ із Старобешівською ТЕС, та Маріуполь (до початку повномасштабного вторгнення).

Другий осередок сформовано вздовж р. Дніпро та Каховського водосховища внаслідок викидів від Дніпра, Запоріжжя, Нікополя, Марганця, Енергодара. До цієї ж забрудненої території можна віднести і Кривий Ріг, адже значна повторюваність перенесення атмосферного повітря із західною складовою часто сприяє поширенню шлейфів забруднення від Кривого Рогу змішуючись із забрудненим повітрям навколо міст на вже не існуючому після підризу дамби Каховському водосховищі. Горішні Плавні, Кременчук та Світловодськ на північ від розглянутої території формують невеликий за площею окремий осередок, який

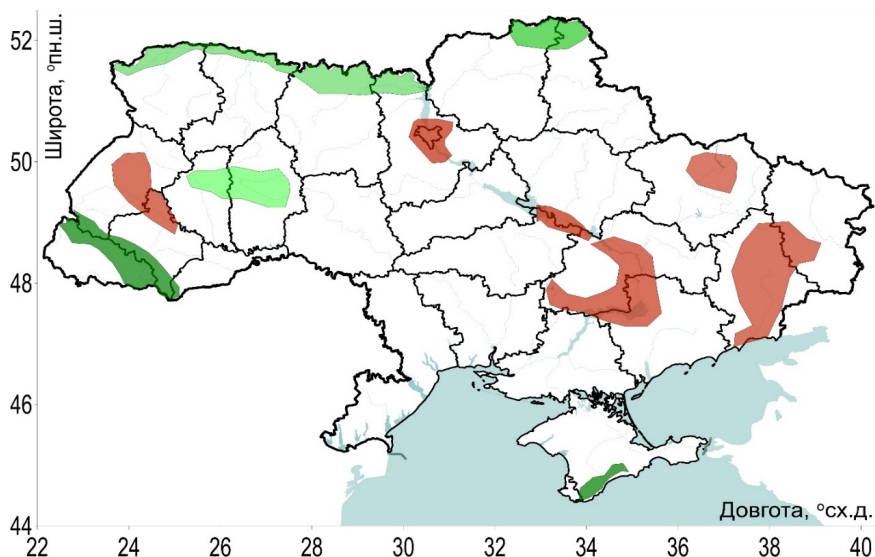


Рис. 2 – Найзабрудненіші (червоний відтінок) та найчистіші (зелений відтінок) райони території України
Fig. 2 – The most polluted (red tint) and the most clean (green tint) areas in Ukraine

можна розглядати як продовження описаного більшого осередку на півдні.

Осередок у Харківській області сформований забрудненим повітрям від викидів Харкова та Зміївської ТЕС у смт. Слобожанське. Загалом, вміст забруднюючих речовин тут нижчий у порівнянні з іншими промисловими районами, проте вирізняється на загальному фоні території.

Схожий за особливостями просторового розподілу і джерелами формування також осередок у Київській області, що сформований внаслідок викидів Києва та Трипільської ТЕС в Україні. Разом вони призводять до формування постійно існуючого осередку значного забруднення, що в останні роки співмірне із забрудненням в Донецькій області.

На заході території забруднений осередок сформовано викидами від Бурштинської та Добротвірської ТЕС, Львова та Калуша. Варто зауважити, що над усією західною частиною території України часто спостерігається трансграничне перенесення забруднення, переважно з промислових районів Польщі.

Щодо районів із найчистішим атмосферним повітрям, то найменші рівні забруднення спостерігаються у Карпатах та Кримських горах. Для більшості забруднюючих речовин, загальний вміст в атмосфері суттєво нижчий за фоновий вміст інших територій. Особливо варто зазначити наявність чистіших осередків на Поліссі, зокрема північ Житомирської та Чернігівської областей; заповідні території Подільської височини (природний заповідник

«Медобори»). У названих районах загалом вміст забруднюючих речовин нижчий, що може зрідка порушуватися перенесенням забрудненого атмосферного повітря з інших районів або формуванням лісових пожеж.

3.2 Вплив метеорологічних умов на поширення і зміни загального вмісту забруднюючих речовин

Супутникові дані, отримані для вертикального стовпа атмосферного повітря є зручними для аналізу впливу перенесення забруднюючих речовин вітром і залежності від інтенсивності вертикальних рухів, що простежується за даними висоти ГША. Недоліками є складність знаходження зв'язків із температурою повітря та вологісними показниками, оскільки їх дія спостерігається більшою мірою точково у просторі, тому для подібного аналізу важливими є дані наземної мережі спостережень.

Для даних Sentinel-5P аналіз виконано з метою оцінити напрямки поширення забруднюючих речовин від найбільших промислових міст та районів, і виявити наскільки викиди від міст визначали поле забруднюючих речовин у чистих районах території України. Переважаюче перенесення забруднюючих речовин від найбільш забруднених районів території України здійснено на основі рози вітрів (див. рис. 3). По-перше, варто звернути увагу, це зменшення ролі

західного перенесення у напрямку із заходу на схід. Тобто, на заході території України найбільш негативного впливу зазнають території на схід південний-схід від промислових міст, у центральних районах – вплив переважно однаковий за більшістю напрямків, і на сході території України – негативного впливу зазнають території на захід й північний-захід від промислових об'єктів.

Найбільше від перенесення забруднюючих речовин на заході та півночі території України потерпають райони на схід та південний схід від міст та промислових об'єктів, що є результатом переважаючого перенесення (рис. 3а,б). На півночі території України зростає роль вітру із південною складовою, у результаті чого спостерігається забруднення і на північ від промислових міст. Наприклад, найбільше від викидів м. Київ потерпають Бровари та

Бориспіль та навколишні сільські райони. Меншою мірою – Вишгород та населені пункти на північ від Києва.

У центральній та північно-східній частині території України суттєво розширюються повторюваність вітру за різними напрямками (рис. 3в). Негативного впливу в більшій або меншій мірі зазнають усі території навколо міст за винятком південних районів, через незначну повторюваність північного вітру. Переважаючий напрямок вітру на сході території України, де розташовані найбільш забруднені райони, сприяє поширенню домішок на захід і північний захід (рис. 3г). Так, від промислового забруднення Донецької області найбільше потерпають східні частини Запорізької, Дніпропетровської та південь Харківської областей.

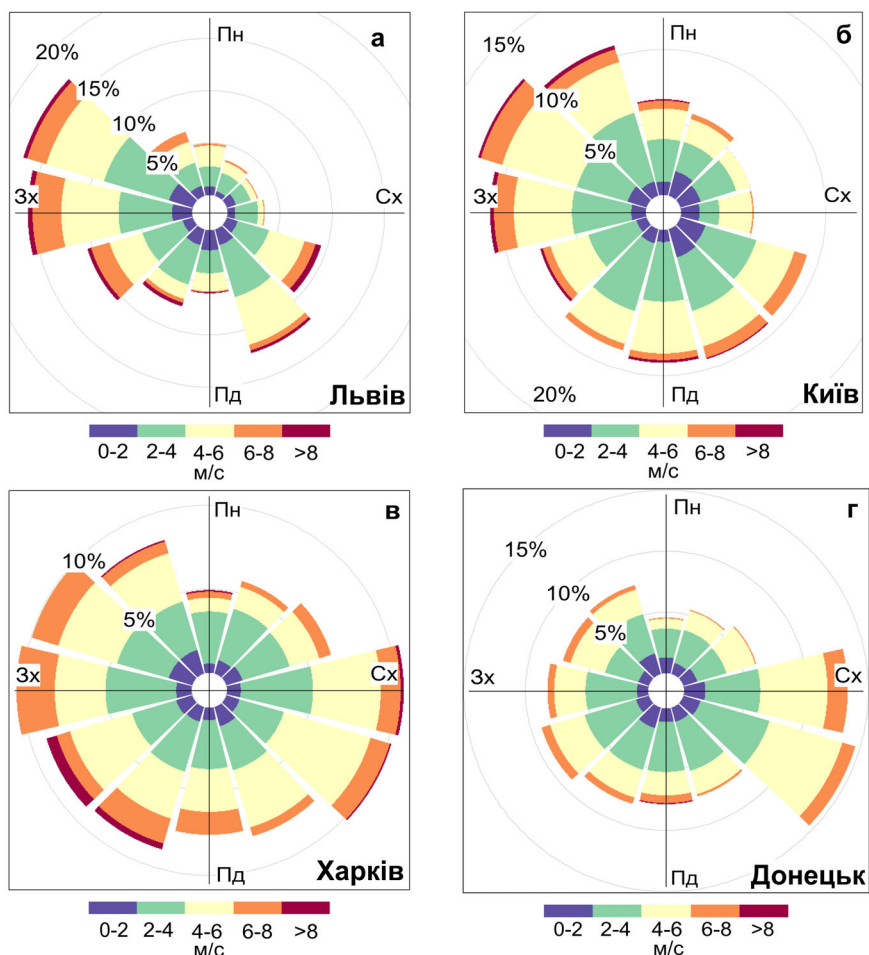


Рис. 3 – Залежність середнього вмісту NO₂ (а), SO₂ (б), CH₂O (в) та CO (г) на території Полісся (межа Житомирської та Київської областей) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 3 – The dependence of average NO₂ (a), SO₂ (б), CH₂O (в) and CO (г) on wind speed and direction on the Polissia (border between Kyiv and Zhytomyr Regions)

Вплив переважаючого напрямку вітру від найбільших міст та промислових районів узгоджується із формуванням поля забруднення у чистих районах території України. На рис. 4-7 зображено біваріативні графіки середнього вмісту забруднюючих речовин в атмосфері найбільш чистих районів території України.

Так, на Поліссі на півночі Київської та Житомирської областей найвищі концентрації NO_2 , SO_2 та CH_2O спостерігаються у випадку надходження повітря із півдня за швидкості вітру вище 7 м/с (рис. 4а-в). Це підтверджує факт, що найвищого забруднення ці райони зазнають внаслідок надходження забрудненого атмосферного повітря (ймовірно від м. Київ), адже за такої значної швидкості вітру забруднюючі речовини не встигають виводитися із атмосфери і шлейфи можуть бути зафіксовані на відстані більше 100 км від джерел викидів. Винятком є загальний вміст CO в атмосфері, де найвищі концентрації сформовані внаслідок західного перенесення (рис. 4г). Це є наслідком інтенсивних пожеж на півночі України в період з

2019 р. до 2021 р., що спостерігалися у Рівненській й Житомирській областях.

Вивчення надходження забруднення атмосферного повітря на територію Українських Карпат сильно залежить від орієнтації гірського рельєфу та розташування тієї чи іншої території по відношенню до джерел викидів. Це зумовлює відсутність однотипних залежностей для різних забруднюючих речовин (рис. 5). Так, в районі населеного пункту Воловець, NO_2 переважно надходить з північного-заходу за високих швидкостей вітру, що є наслідком активності Бурштинської ТЕС. З південного сходу надходять SO_2 та CH_2O , переважно за високої швидкості вітру, що ймовірно надходять з території Румунії та вже перебувають на значних висотах. В той же час, спостерігається локальний осередок SO_2 на захід від населеного пункту Воловець, проте причини його формування наразі неможливо встановити без польових вимірювань. CO надходить з південного заходу, також переважно внаслідок трансграничного перенесення.

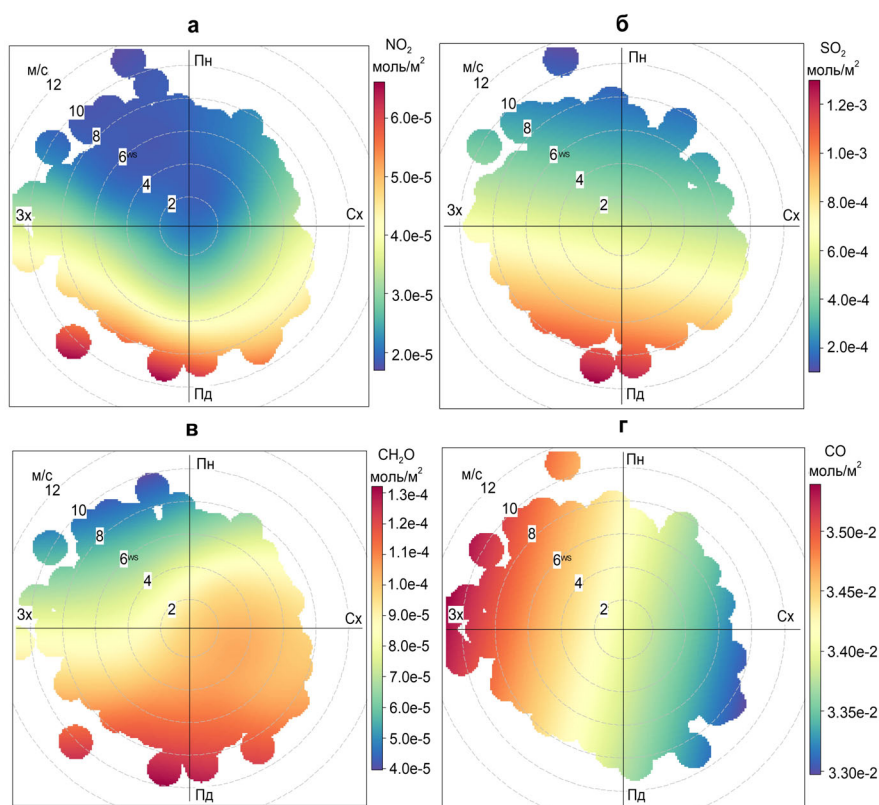


Рис. 4 – Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) на території Полісся (межа Житомирської та Київської областей) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 4 – The dependence of average NO_2 (a), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction on the Polissia (border between Kyiv and Zhytomyr Regions)

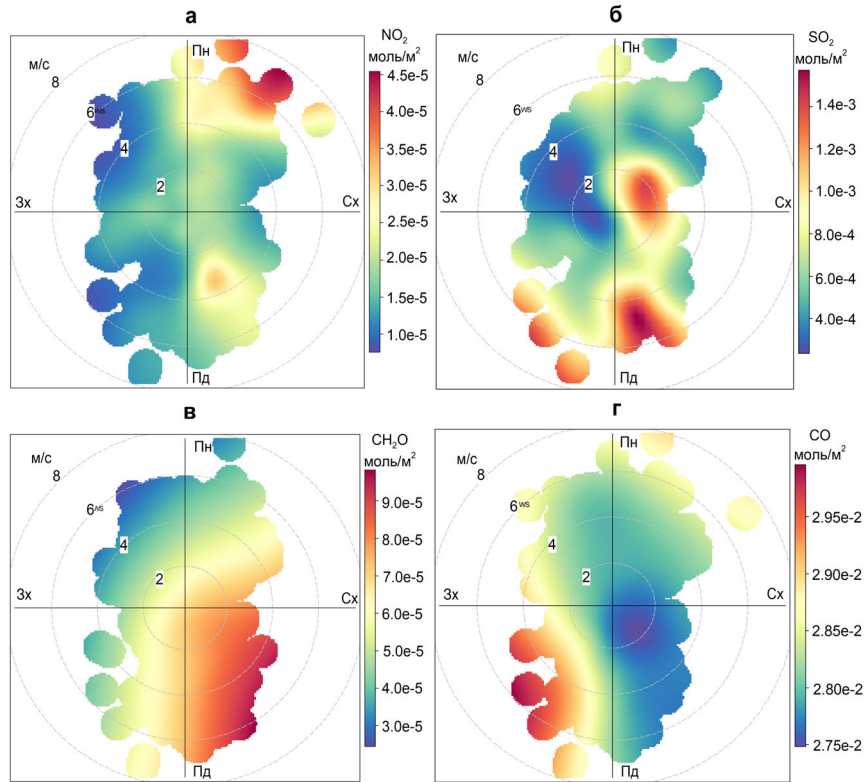


Рис. 5 – Залежність середнього вмісту NO₂ (а), SO₂ (б), CH₂O (в) та CO (г) в Українських Карпатах (район населеного пункту Воловець) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 5 – The dependence of average NO₂ (a), SO₂ (б), CH₂O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the Ukrainian Carpathians (near Volovets settlement)

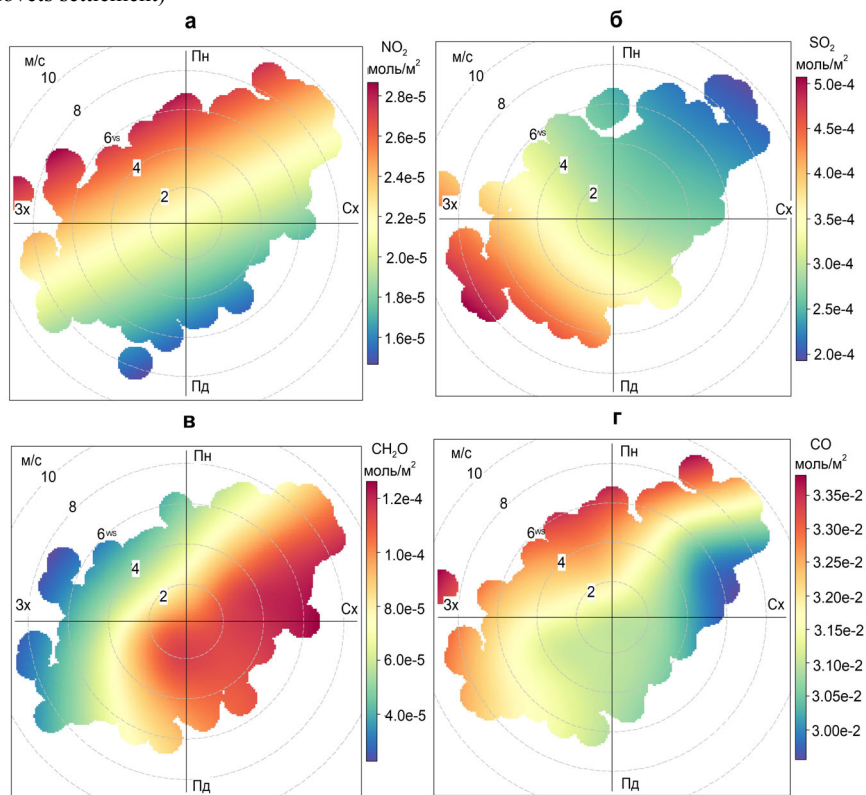


Рис. 6 – Залежність середнього вмісту NO₂ (а), SO₂ (б), CH₂O (в) та CO (г) у Кримських горах (район г. Роман-Кош) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 6 – The dependence of average NO₂ (a), SO₂ (б), CH₂O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the Crimea mountains (near Roman-Kosh peak)

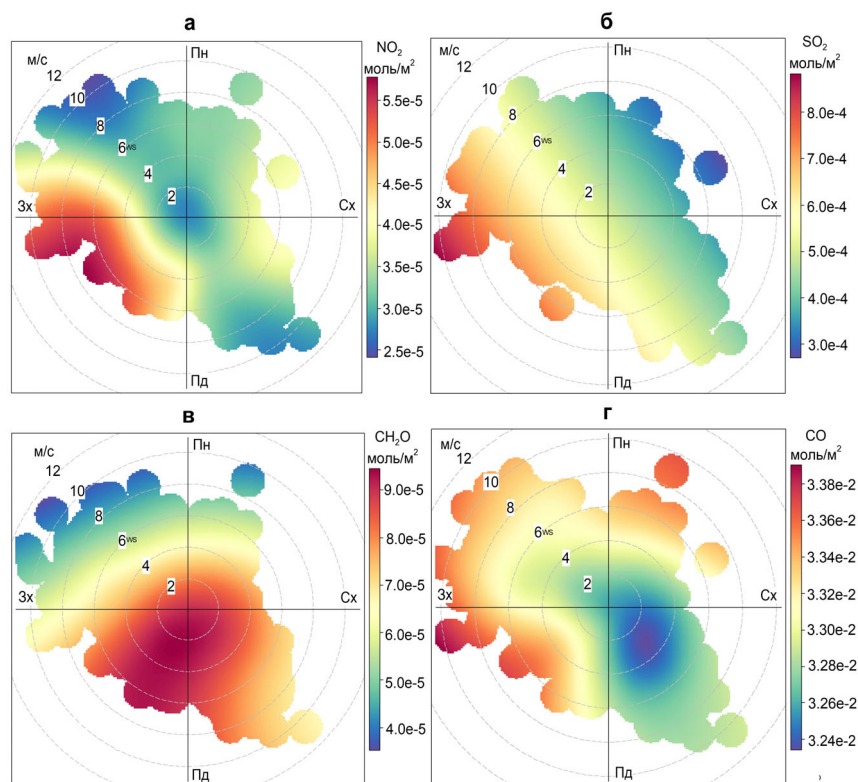


Рис. 7– Залежність середнього вмісту NO₂ (а), SO₂ (б), CH₂O (в) та CO (г) у природному заповіднику “Медобори” від напрямку та швидкості вітру
Fig. 7 – The dependence of average NO₂ (а), SO₂ (б), CH₂O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the “Medobory” national park

На території Кримських гір чітко простежується залежність від орієнтації рельєфу по відношенню до моря або суходолу (рис. 6). Такі речовини як NO₂ та CO поширюються від антропогенних джерел викидів на суходолі, в результаті чого спостерігається надходження максимумів з північного напрямку. У той же час, від морського транспорту активно надходять SO₂ та CH₂O, як результат ми спостерігаємо їх надходження зі сторони моря.

У природному заповіднику «Медобори», що також входить до числа найчистіших районів території України, надходження повітря спостерігається переважно із південного заходу (рис. 7). Це відбувається переважно внаслідок надходження забрудненого повітря від Тернополя та, знову ж таки, Бурштинської ТЕС. Варто відмітити інтенсивність формування CH₂O безпосередньо над заповідником. Це може свідчити про роль органічних сполук у формуванні вторинного CH₂O, безпосередньо вже над лісовими масивами.

Поряд із вітровими характеристиками для аналізу загального вмісту забруднюючих речовин у стовпі атмосфери, важливу роль відіграє висота ГША. Фактично, без аналізу висоти ГША неможливо встановити причини і

наслідки забруднення на короткотривалих проміжках часу. На рис. 8-9 відображено залежність концентрацій забруднюючих речовин від висоти ГША для забруднених (на прикладі м. Київ) та чистих (на прикладі півночі Полісся) районів території України.

Загальний вміст NO₂ та SO₂ більше ніж вдвічі вищий за висоти ГША до 500 м ніж за висоти вище 1000 м. Тобто, за низької висоти ГША спостерігаються кращі умови накопичення забруднюючих речовин в атмосфері, що чітко фіксується під час супутникових вимірювань. Подібна закономірність спостерігається і для CO над чистими районами. У той же час виявлено досить неочікувану закономірність розподілу CO за різних висот ГША над великими містами (рис. 8), при цьому подібна залежність характерна не тільки для Києва, але й для Харкова та Дніпра. Вміст CO зазвичай однаковий за винятком висот між 1000 і 1500 м. Пояснити формування такої залежності наразі важко, що залишається відкритим питанням для майбутніх досліджень. Цікавою особливістю характеризується загальний вміст CH₂O. Що над забрудненими містами, що над чистими заповідними територіями, вміст CH₂O зростає за значних висот ГША (тобто за кращих умов

розсіювання). Це означає, що вторинне утворення CH_2O в атмосфері внаслідок фотохімічних та хімічних реакцій з іншими

хімічними складовими на висотах, переважає антропогенні викиди CH_2O безпосередньо.

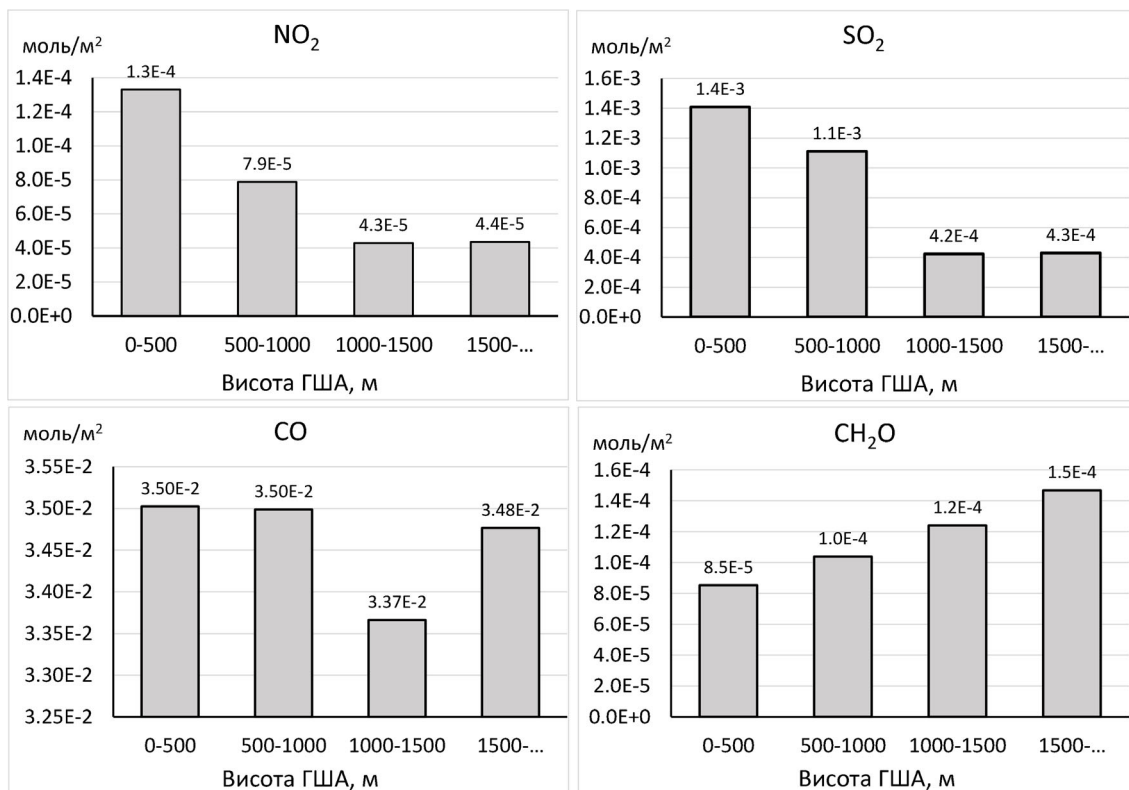


Рис. 8 – Залежність вмісту забруднюючих речовин від висоти ГША на прикладі м. Київ
 Fig. 8 – The dependence of pollutants' content on boundary layer height on the example of Kyiv

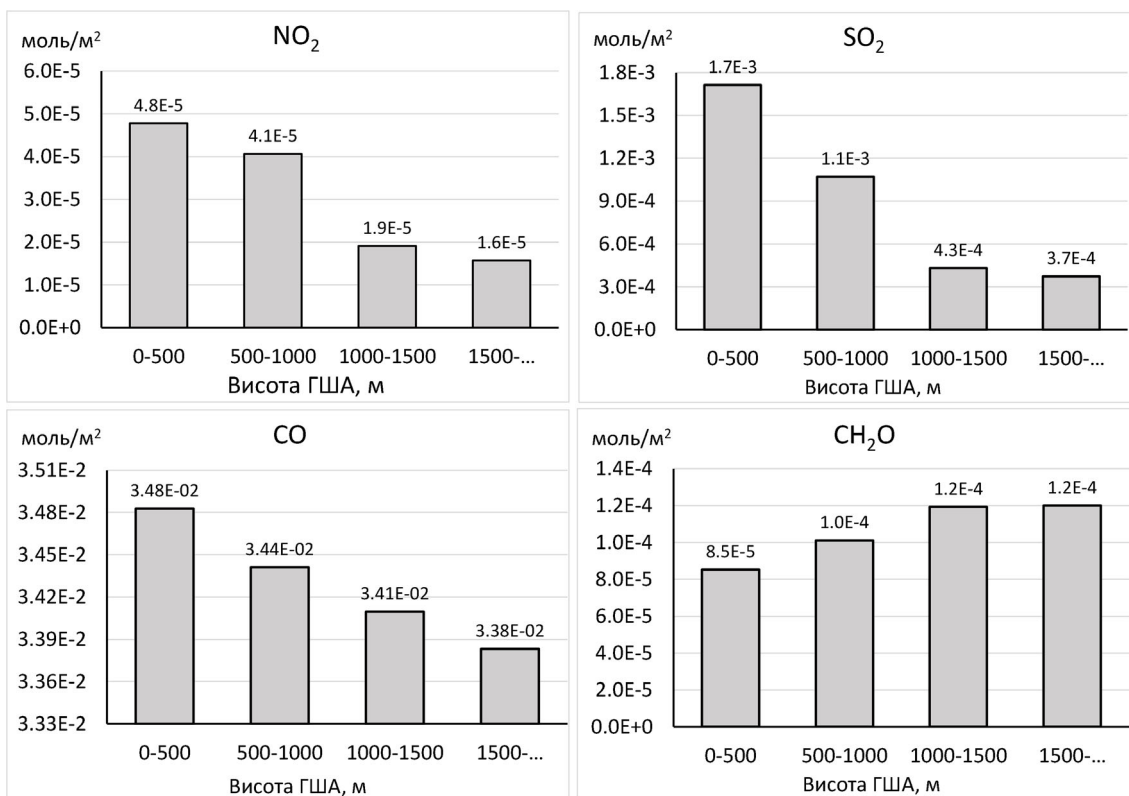


Рис. 9 – Залежність вмісту забруднюючих речовин від висоти ГША на прикладі півночі Полісся
 Fig. 9 – The dependence of pollutants' content on boundary layer height on the example of northern Polissia

3.3 Обговорення

У попередній частині досліджень [1], що присвячена даним наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря, наголошувалося на ряді проблем, із якими доводиться стикатися як дослідникам, так і управлінцям під час прийняття рішень. Війна в Україні ускладнює ситуацію через втрату деякої частини постів моніторингу, що й так покривали досить мало міст. Звичайно, на цьому фоні зростатиме роль супутникових даних та атмосферного моделювання. Незважаючи на усі недоліки та неможливість прямо отримати концентрацій у приземному шарі, наразі тільки супутникова інформація використовувалася для оцінки зміни забруднення атмосферного повітря на регіональному рівні [13,14].

У даній роботі наголошено на ключових показниках, що можуть бути використані в якості базового стану напередодні війни для порівняння. Враховуючи похибки індивідуальних значень в пікселях [26-29], найкращим способом є використання узагальнених показників. У цьому випадку, осереднення за певний інтервал часу показало хорошу можливість проводити окреслення найбільш забруднених та чистих районів. Посадання осередненої супутникової та метеорологічної інформації дає можливість встановити суміжні території із джерелами викидів, що найчастіше зазнають негативного впливу від викидів. Подібним шляхом можна оцінювати і умови перенесення високого вмісту забруднюючих речовин на заповідні та відносно чисті території України. Більшість змін, що відбудуться внаслідок перерозподілу джерел викидів на території України через воєнні дії (знищення промисловості, перерозподіл у викидах автотранспорту, поява нових джерел внаслідок руйнувань, тощо), зможуть бути виявлені подібним чином при порівнянні із базовим періодом.

Найбільшою проблемним залишається набір забруднюючих речовин за яким можна буде здійснити подібний аналіз. До розглянутих у статті речовин, можна додати лише можливість оцінки аерозольних параметрів та дуже експериментальне використання супутникових даних під час визначення вмісту метану (CH_4) [30], аміаку (NH_3) [31], тропосферного озону (O_3) [32], та подібних. Використання даних про вміст SO_2 та CH_2O , хоча і показує хороші результати виявлення максимумів концентрацій,

проте не дозволяє якісно проводити оцінку низьких значень [27,28], що погіршуватиме можливості виявлення наслідків воєнних дій поза тепловими електростанціями та промисловими об'єктами на твердому паливі, а також у містах із низькими чи середніми викидами забруднюючих речовин.

4 ВИСНОВКИ

У статті встановлено особливості просторового розподілу загального вмісту NO_2 , CO , SO_2 та CH_2O за даними супутникових спостережень Sentinel-5P напередодні повномасштабного російського вторгнення на територію України. Це дозволило описати базовий стан якості атмосферного повітря з повним просторовим охопленням придатним для порівняння і оцінки наслідки воєнних дій на території України.

Найзабрудненіші райони зосереджувалися навколо великих промислових міст та населених пунктів із потужними ТЕС. Так окремі осередки забрудненого повітря охоплюють наступні території: 1) Донецька область як з підконтрольними, так і окупованими з 2014 р. промисловими містами; 2) центральні райони території України вздовж р. Дніпро та навколо вже відсутнього Каховського водосховища; 3) територія, що охоплює Харків та Зміївську ТЕС у смт. Слобожанське; 4) територія, що охоплює Київ та Трипільську ТЕС в Україні; 5) територія, що охоплює Львів, Калуш, а також Бурштинську і Добротвірську ТЕС. Найчистіші території охоплюють високогірні райони у Карпатах та Криму, Полісся на півночі Житомирської та Чернігівської областей; та заповідні території Подільської височини (природний заповідник «Медобори»).

Аналіз переважаючого напрямку вітру для міст із найбільш забруднених районів дозволив встановити повторюваність за якою прилеглі території зазнаватимуть негативного впливу внаслідок атмосферного перенесення. У той же час, для відносно чистих районів встановлено закономірності формування високих рівнів забруднення. Зазвичай, найвищий вміст забруднюючих речовин над територією формується за умови значних швидкостей вітру більше 6 м/с із напрямків з основними джерелами викидів. Формування високих концентрацій за таких умов найчастіше буде відбуватися на висотах, а не в приземному шарі. На умови розсіювання забруднюючих речовин

значно впливає і висота ГША. За висоти ГША менше ніж 500 м, вміст NO₂, SO₂ та CO щонайменше вдвічі перевищує концентрації за умови висоти ГША більше 1500 м. У той же час, зворотна залежність характерна для CH₂O у зв'язку із фотохімічним утворенням домішки на висотах.

Отримані результати загального вмісту забруднюючих речовин, разом із попередньо опублікованим аналізом для приземного вмісту, дозволяє описати базовий стан якості атмосферного повітря для оцінки наслідків військових дій, та з метою розроблення заходів післявоєнного відновлення.

ПОДЯКИ

Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи №9/21 «Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань» (2021–2023 рр., номер державної реєстрації 0121U109319).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: приземний вміст забруднюючих речовин / Савенець М. В. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. Вип. 31. С. 69–87. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05>
2. Enhanced Capabilities of TROPOMI NO₂: Estimating NO_x from North American Cities and Power Plants / Goldberg D. L. et al. *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 53. Pp. 12594–12601. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488>.
3. Nitrogen dioxide (NO₂) pollution monitoring with sentinel-5P satellite imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak / Virghileanu M. et al. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(21). 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>
4. Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data / Saw G. K. et al. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259. 118514. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.1185>
5. Satellite data applications for site-specific air quality regulation in the UK: Pilot study and prospects / Potts et al. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. 1659. <https://doi.org/10.3390/atmos12121659>
6. High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: first results and validation over the Canadian oil sands / Griffin D. et al. *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. Pp. 1049–1060. <https://doi.org/10.1029/2018GL081095>
7. Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO₂ and CO Studies Aiming at Environmental Valuation / Bodah et al. *J. Clean. Prod.* 2022. Vol. 357. 131960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960>
8. Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data / van Geffen et al. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022. Vol. 15. Pp. 2037–2060. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022>
9. Comparison of TROPOMI NO₂, CO, HCHO, and SO₂ data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine / Savenets M. et al. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29(6). e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
10. Huang G., Sun K. Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO₂ over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI. *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 745. P. 141023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141023>
11. Impact of COVID-19 pandemic on air pollution in Poland based on Surface Measurements and Satellite Data / Filonchuk M. et al. *Aerosol Air Qual.* 2021. Vol. 21(7). P. 200472. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200472>
12. Air quality impacts of COVID-19 lockdown measures detected from space using high spatial resolution observations of multiple trace gases from Sentinel-5P/TROPOMI / Levelt P. L. et al. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 22. Pp. 10319–10351. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10319-2022>.
13. War Impact on Air Quality in Ukraine/ Zalakeviciute R. et al. *Sustainability*. 2022. Vol.14(21). 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
14. Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war / Chengxin Z. et al. *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 869. 161759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759>
15. Air pollution mapping with nitrogen and sulfur dioxides in the south-eastern part of Ukraine using satellite data / Stankevich S. et al. *Mining Science*. 2016. Vol. 23. Pp. 21–31.
16. Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020 / Babii V. et al. *Geoinformatics*. 2021. Vol. 2021. Pp.1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138>
17. Savenets M. Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Idojaras*. 2021. Vol. 125(2). Pp. 271–290. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
18. Putrenko V., Pashynska N. The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2017. Vol. IV-5/W1. Pp. 57–62. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017>.
19. Evaluation of particulate matter PM_{2.5}/PM₁₀ air pollution in the some of Ukraine and China cities / Milinevsky G. et al. *20th EGU General Assembly. EGU2018*. 2018. Austria. P. 3844.
20. Air quality estimation using satellite and in-situ data for Kyiv city within ERA-PLANET Project / Korsunskaya Y. et al. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P.p 1032–1036. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879843>
21. Essential variables for air quality estimation/ Shelestov A. et al. *International Journal of Digital Earth*. 2020. Vol. 13(2). Pp. 278–298. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1620881>
22. HARP manual. URL: <https://stcorp.github.io/harp/doc/html/index.html> (Accessed: 30.08.2023)
23. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) / Hersbach H. et al. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
24. Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its

- Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze / Leuchner et al. *Aerosol Air Qual. Res.* 2016. Vol. 16. Pp. 801-815. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334>
25. Measurement report: Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site of Shanghai in summertime / Wu et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. Pp. 2997–3014. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023>
 26. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen dioxide / Eskes H. et al. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands, 2022. 168 p.
 27. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO₂ / Romahn F. et al. DLR, 2022. 152 p.
 28. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Formaldehyde HCHO / Romahn F. et al. DLR, 2022. 122 p.
 29. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval/ Landgraf, J. et al. Netherlands Institute for Space Research. 2022. 83 p.
 30. Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities / Zhang S. et al. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 893. 164701. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701>
 31. Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1 – Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands/ Dammers E. et al. *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 169. Pp. 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067>
 32. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution / Fishman J. et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2003. Vol. 3. Pp. 893–907. <https://doi.org/10.5194/acp-3-893-2003>
- ## REFERENCES
1. Savenets, M.V. et al. (2023). Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale Russian invasion. Part 1: ground-level content of pollutants. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 31, pp. 69-87. <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05>
 2. Goldberg, D.L. et al. (2019). Enhanced Capabilities of TROPOMI NO₂: Estimating NO_x from North American Cities and Power Plants. *Environ. Sci. Technol.*, 53, pp. 12594–12601. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488>
 3. Virghileanu, M. et al. (2020). Nitrogen dioxide (NO₂) pollution monitoring with Sentinel-5P satellite imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>
 4. Saw, G.K. et al. (2021). Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, 259, 118514. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.1185>
 5. Potts, D.A. et al. (2021). Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere*, 12, 1659. <https://doi.org/10.3390/atmos12121659>
 6. Griffin, D. et al. (2019). High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: first results and validation over the Canadian oil sands. *Geophysical Research Letters*, 46, pp. 1049–1060. <https://doi.org/10.1029/2018GL081095>
 7. Bodah et al. (2022). Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO₂ and CO Studies Aiming at Environmental Valuation. *J. Clean. Prod.*, 357, 131960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960>
 8. van Geffen, et al. (2022). Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, pp. 2037–2060. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022>
 9. Savenets, M. et al. (2022). Comparison of TROPOMI NO₂, CO, HCHO, and SO₂ data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29(6), e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
 10. Huang, G. & Sun, K. (2020). Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO₂ over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI. *Sci. Total Environ.*, 745, 141023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141023>
 11. Filonchuk, M. et al. (2021). Impact of COVID-19 pandemic on air pollution in Poland based on Surface Measurements and Satellite Data. *Aerosol Air Qual.*, 21(7), 200472. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200472>
 12. Levelt, P.L. et al. (2022). Air quality impacts of COVID-19 lockdown measures detected from space using high spatial resolution observations of multiple trace gases from Sentinel-5P/TROPOMI. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, pp. 10319–10351. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10319-2022>
 13. Zalakeviciute, R. et al. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, 14(21), 13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
 14. Chengxin, Z. et al. (2023). Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war. *Sci. Total Environ.*, 869, 161759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759>
 15. Stankevich, S. et al. (2016). Air pollution mapping with nitrogen and sulfur dioxides in the south-eastern part of Ukraine using satellite data. *Mining Science*, 23, pp. 21-31.
 16. Babii, V. et al. (2021). Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020. *Geoinformatics*, 2021, pp. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138>
 17. Savenets, M. (2021). Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Idojaras*, 125(2), pp. 271–290. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6>
 18. Putrenko, V. & Pashynska, N. (2017). The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-5/W1, pp. 57–62. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017>
 19. Milinevsky, G. et al. (2018). Evaluation of particulate matter PM_{2.5}/PM₁₀ air pollution in the some of Ukraine and China cities. *20th EGU General Assembly, EGU2018*, 3844.
 20. Korsunskaya, Y. et al. (2019). Air quality estimation using satellite and in-situ data for Kyiv city within ERA-PLANET Project. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, pp. 1032-1036.
 21. Shelestov, A. et al. (2020). Essential variables for air quality estimation. *International Journal of Digital Earth*, 13(2), pp. 278-298. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1620881>
 22. HARP manual. Available at: <https://stcorp.github.io/harp/>

- [doc/html/index.html](#) (Accessed: 30.08.2023)
23. Hersbach, H. et al. (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. Leuchner, M. et al. (2016). Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze. *Aerosol Air Qual. Res.*, 16, pp. 801–815. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334>
 25. Wu, Y. et al. (2023). Measurement report: Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site of Shanghai in summertime. *Atmos. Chem. Phys.*, 23, pp. 2997–3014. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023>
 26. Eskes, H. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen Dioxide*. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands.
 27. Romahn, F. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO2*. DLR.
 28. Romahn, F. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Formaldehyde HCHO*. DLR.
 29. Landgraf, J. et al. (2022). *Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval*. Netherlands Institute for Space Research.
 30. Zhang, S. et al. (2023). Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. *Science of The Total Environment*, 893, 164701. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701>
 31. Dammers, E. et al. (2017). Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1 – Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands. *Atmospheric Environment*, 169, pp.97–112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067>
 32. Fishman, J. et al. (2003). Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.*, 3, pp.893–907. <https://doi.org/10.5194/acp-3-893-2003>

STATUS OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE PRIOR TO THE FULL-SCALE RUSSIAN INVASION. PART 2: POLLUTANTS TOTAL CONTENT ACCORDING TO THE SATELLITE DATA

M. V. Savenets, L. M. Nadtochii, T. V. Kozlenko, K. M. Komisar, N. S. Zhemera

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

The paper describes the main features of pollutant total content distribution over Ukraine that can be used as baseline air quality data observed before the full-scale Russian invasion in Ukraine. The study is based on the data derived from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard of the Sentinel-5 Precursor (5P) satellite that indicates nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO) and formaldehyde (CH₂O) levels. We defined the characteristics of pollutants spatial distribution with full coverage of Ukrainian territory. Despite the increasing role of automotive emissions, the most polluted air in Ukraine was still observed over large industrial cities and smaller settlements having the biggest thermal power plants (TPP). The high level of pollutants content over these locations negatively affects air quality in suburban and rural areas by the prevailing wind. They form relatively stable polluted spots over larger areas. Hence, main polluted areas include: Donetsk Region; territories in the central part of Ukraine along the Dnipro River and near the destroyed Kakhovka reservoir; Kharkiv and Zmiiv TPPs; Kyiv and Trypillia TPPs; and the territories in the western part, including Lviv, Dobrotvir and Burshtyn TPPs. The polluted air from these territories determines the air quality depending on a prevailing wind. In case of high wind speeds polluted air can be distributed from urban areas towards relatively clean territories such as Carpathian and Crimean Mountains, northern Polissia, and the Medobory National Park of Podillia. We determined quantitative parameters of wind speed and direction for every pollutant that causes higher total content over relatively clean territories. Pollutants dispersion in the atmosphere varies depending on a boundary layer height (BLH). It was found that NO₂, CO and SO₂ content significantly increased when the BLH was below 500 m over both urban areas and clean territories with no emission sources available. The inverse dependence on the BLH was identified for CH₂O. This can be explained by a more intense photochemical production at higher altitudes. The detected baseline air pollution conditions can be used in order to assess the impact of the war on air quality in Ukraine and come up with relevant post-war development measures.

Keywords: Sentinel-5P; total content; pollution; emissions; atmospheric air.

Подання до редакції : 09. 09. 2023
Надходження остаточної версії : 20. 09. 2023
Публікація статті : 21. 12. 2023