

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.5>

УДК: 551.510.42+[528.88:614.841.12]

Рибчинська В.О.^{1,2}, Савенець М.В.²

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України

ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

У статті представлено методику використання індексу NO_2/CO для оцінки ефективності перебігу процесів горіння на основі даних дистанційного зондування хімічних складових атмосферного повітря, що здійснено вперше для території України. Використано дані супутникового приладу TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) супутника Sentinel-5 Precursor, а також даних метеорологічних характеристик із реаналізу ERA5 для семи відібраних днів, включаючи дні із лісовими пожежами як еталонні для порівняння. Розроблена методика оцінки для території України включає у себе етап перевірки надійності даних супутникового зондування, аналіз умов хмарності, висоти граничного шару атмосфери та характеристик вітру, визначення фонових вмісту забруднюючих речовин і забруднення над джерелом викидів, та безпосередньо обчислення індексу NO_2/CO . На основі отриманих значень встановлено можливість розрізняти переважаюче спалювання твердого палива над територією від міст із різноманітними джерелами викидів. Перспективним напрямом подальшого використання індексу NO_2/CO є перехід до обчислення емісійних факторів і можливість встановлення багаторічної зміни у використанні переважаючих типів палива у містах.

Ключові слова: викиди, діоксид азоту, монооксид вуглецю, Sentinel-5P, дистанційне зондування, забруднення атмосфери.

Вступ. Погіршення стану забруднення атмосферного повітря, сформованого внаслідок потужного антропогенного впливу, переросло у глобальну проблему, подолання якої наразі неможливе без використання та розвитку сучасних технологій. Моніторинг якості атмосферного повітря відіграє важливу роль не тільки для виявлення потенційно небезпечних концентрацій, але і для формування контролю за викидами забруднюючих речовин, розвитку методів моделювання, інвентаризацій викидів, тощо [8]. Як наслідок, значні зусилля спрямовані на розроблення і покращення методів моніторингу, до яких відносяться й супутникове зондування [16].

На відміну від наземних систем моніторингу, супутникове зондування характеризується важливою перевагою – просторовим охопленням – що дозволяє виявляти зміни забруднення атмосферного повітря над будь-якою територією. По-перше, значно покращується можливість оперативного виявлення викидів забруднюючих речовин у віддалених районах (напр., лісові пожежі) та їх подальший аналіз і дослідження на основі зібраних супутникових даних [27]. По-друге, стає можливим встановлювати понаднормові або незаконні викиди забруднюючих речовин від промислових підприємств, що являє собою інструмент контролю [20]. Звичайно, потрібно зважати на недоліки супутникового зондування хімічних складових, пов'язаних із отриманням загального вмісту у стовпі атмосфери, похибками його відновлення, залежністю від хмарності, та поки що досить грубу просторову роздільну здатність (від 3,5 км до десятків км для газових складових атмосферного повітря) [27].

Серед газових складових атмосферного повітря найбільш зручним є аналіз нітрогено- та вуглецевмісних сполук. До їх викидів призводять процеси горіння, що характеризують активність переважної більшості джерел викидів [18]. Запуск супутника Sentinel-5 Precursor

(Sentinel-5P) із супутниковим приладом TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на борту значно розширили можливості використання даних газових складових атмосферного повітря, досягнувши просторової роздільної здатності 3,5x5,5 км [19]. На основі супутникових даних загального вмісту діоксиду азоту (NO_2) та монооксиду вуглецю (CO) досліджуються викиди від промисловості [5,23], автотранспорту [6], морського транспорту [21] природних пожеж [10, 17], та інших джерел.

Універсальність надходження нітрогено- та вуглецевовмісних сполук призвело до появи ряду індексів, що знаходяться як співвідношення вмісту різних забруднюючих речовин, зокрема CO_2/CO [24], NO_2/CO_2 [9], CO/CO_2 [7], NO_2/NO_x [29], NO_2/CO [13], тощо. На основі подібних індексів стало можливим оцінити ефективність перебігу процесів горіння (англ.: burning efficiency), що є ключовим параметром для знаходження емісійних факторів — коефіцієнтів, що дозволяють визначити інтенсивність викидів забруднюючих речовин за тих чи інших промислових/ природних процесів. Супутникове зондування відкрило нові можливості використання подібних індексів, адже стає можливим їх оцінка у реальних, а не лабораторних умовах. Особливо зручним у використанні є індекс NO_2/CO , що дозволяє оцінити ефективність та температуру спалювання і, як наслідок, опосередковано визначити переважаючий тип палива (газ, вугілля, тощо), що використовується. CO у цьому випадку відіграє роль контрольного параметра [3]: за умови спалювання твердого палива або горіння біомаси його викиди зростають, тоді як під час спалювання газу у атмосферу переважно надходять нітрогеновмісні сполуки. Співвідношення NO_2/CO вже активно використовується для аналізу викидів під час природних пожеж [28] та загалом від великих міст [13]. Цей індекс є перспективним як для оцінки ефективності використання палива у містах, так і для уточнення емісійних факторів, що сприятимуть зменшенню похибок під час створення інвентаризацій викидів.

Незважаючи на активне використання наведених індексів за кордоном, в Україні досі не було проведено жодних оцінок щодо можливості його застосування. При тому, що забруднення атмосферного повітря (в тому числі NO_2 і CO) залишається проблемним питанням [1,30]; а супутникове зондування хімічних складових вже активно використовується на практиці [4, 22]. Тому, **метою даної статті** є розроблення методики використання індексу NO_2/CO для оцінки перебігу процесів горіння і перевірка адекватності відображення показника на території України.

Матеріали та методи дослідження. Для розроблення методології використання індексу ефективності перебігу процесів горіння для території України обрано супутниковий прилад TROPOMI супутника Sentinel-5P (офіційний хаб: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>) у зв'язку із найкращою на сьогодні просторовою роздільною здатністю зондування газових складових атмосферного повітря (3.5 x 5.5 км). Супутниковий прилад TROPOMI являє собою спектрометр, що працює в ультрафіолетовому (UV), видимому (VIS), ближньому (NIR) і короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах для моніторингу озону (O_3), метану (CH_4), формальдегіду (CH_2O), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO_2), діоксиду сірки (SO_2) та аерозолів у атмосфері [15]. Для представлених досліджень використано режимні (offline) дані загального вмісту NO_2 у стовпі тропосфери, та загального вмісту CO у стовпі атмосфери.

У даній роботі, велика увага була приділена підбору даних: днів та районів дослідження. Дати обрано з урахуванням метеорологічних умов, з особливою увагою до безхмарних днів над районами дослідження. Це дозволило уникнути похибок супутникового зондування, що значно зростають в умовах щільної хмарності. Один із обраних днів для перевірки алгоритмів обрано із наявним хмарним покривом. Так як метою статті є розроблення методики використання індексу NO_2/CO та перевірки можливості його використання для урбанізованих територій, було обрано три райони з різними характеристиками емісії забруднюючих речовин. Перший район охоплює м. Київ та його околиці для оцінки перебігу ефективності процесів горіння у мегаполісі з великою кількістю різноманітних джерел викидів та використаним паливом. Обрано безхмарні дні 26.03. і 10.05.2021 р., та хмарний день 15.04.2021 р. Другий районом обрано м. Маріуполь та його околиці як приклад міста з потужною промисловістю, де переважаючим є вуглецевовмісне паливо. Обрано безхмарні дні 27.04 та 05.05.2021 р. Для оцінки адекватності відображення

даних NO₂/CO обрано третій район, що вважатиметься еталонним для порівняння. Це випадок інтенсивних лісових пожеж на півночі території України у квітні 2020 р. Еталонними днями обрано 10.04.2020 та 12.04.2020 з осередком на території Київської області. Саме лісові пожежі найкраще підходять для аналізу ефективності горіння як процес горіння біомаси та відсутності горіння газу, що призводять до високого вмісту CO (та інших вуглецевмісних сполук), у порівнянні з іншими забруднювальними речовинами. Варто зауважити, що усі досліджувані дні обрано у період до повномасштабного російського вторгнення, коли інформація про стан забруднення атмосферного повітря та викиди були офіційно встановлені.

Для правильної інтерпретації даних для кожного дня використано індекс якості даних (QA-index) у кожному пікселі, який дає можливість оцінити надійність вмісту NO₂ та CO. QA-index представлений серед набору даних для кожної окремої хімічної складовою. За умови QA-index < 0,50 дані вважаються ненадійні; за умови QA-index = 0,50...0,75 – дані потребують додаткового аналізу перед їх використанням; за умови QA-index > 0,75 – дані вважаються надійними.

Для оцінки метеорологічних умов та правильності обчислення індексу NO₂/CO використано метеорологічну інформацію, а саме висоту граничного шару атмосфери (ГША) та характеристики вітру. Вихідні дані вітру взято із реаналізу ERA5 для ізобаричних рівнів, де вони представлені у вигляді *u*- та *v*-компоненти (зональна та меридіональна складова) [11]. На їх основі розраховано напрямок (*wd*) та швидкість (*ws*) вітру:

$$ws = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$wd = \arctg\left(\frac{u}{v}\right) + flow \quad (2)$$

де *flow* = +180, якщо $\arctg\left(\frac{u}{v}\right) < 180$; *flow* = -180, якщо $\arctg\left(\frac{u}{v}\right) > 180$

Висоту ГША взято з реаналізу ERA5 із набору «однорівневих» параметрів (з англ. – single level) [12].

Оцінка ефективності перебігу процесів горіння здійснено на основі використання індексу NO₂/CO (у статті позначено як dNO₂/dCO), обчисленого за формулою (3):

$$\frac{dNO_2}{dCO} = \frac{NO_{2\text{джерело}} - NO_{2\text{фон}}}{CO_{\text{джерело}} - CO_{\text{фон}}} \quad (3)$$

де *NO*₂_{джерело} – максимальний загальний вміст NO₂ над джерелом викиду, *NO*₂_{фон} – фоновий загальний вміст NO₂ з навітряної сторони до джерела викидів; *CO*_{джерело} – максимальний загальний вміст CO над джерелом викиду; *CO*_{фон} – фоновий загальний вміст CO з навітряної сторони до джерела викидів.

Різниця у чисельнику та знаменнику вказують на надлишок забруднення атмосферного повітря сформованого впливом джерела викидів. Для більш зручного представлення значень індексу, чисельник (dNO₂) прийнято представляти у ммоль/м², тоді як знаменник (dCO) – у моль/м².

У випадку спалювання твердого палива або горіння біомаси, зростають викиди CO, що призводить до зменшення показника dNO₂/dCO. Низькі значення dNO₂/dCO відповідають менш ефективному перебігу процесів горіння. Якщо відбувається спалювання газу, показник dNO₂/dCO стрімко зростає, що стає індикатором ефективнішого горіння. Таким чином, за величиною dNO₂/dCO можна опосередковано визначати переважаючий тип палива, що використовується на підприємстві, або в цілому для міста. Зміна величини dNO₂/dCO вказуватиме на зміну типу палива.

Візуалізація результатів відбувалася з використанням програми «Panoply» для побудови карт вітрів, частки хмарності, QA-index; та із використанням мови програмування Python для карт загального вмісту NO₂ та CO.

Виклад основного матеріалу.

1 Оцінка метеорологічних умов та якості супутникових даних. Першим етапом, що передує розрахунку індексу dNO_2/dCO , є оцінка метеорологічних умов та якості супутникових даних. Як зазначалося вище, при аналізі районів дослідження та підбору даних для оцінки ефективності перебігу процесів велике значення має надійність даних супутникового зондування, що можна оцінити на основі QA-index та хмарного покриття.

Результати аналізу щільності хмарності над обраними районами показали, що над зонами дослідження хмарність у цілому не спостерігалася, що передбачалося при виборі днів для розроблення методики використання dNO_2/dCO для території України. Для кожного окремого району умови хмарності формувалися за різної синоптичної ситуації, що видно із просторового розподілу хмарності на регіональному масштабі (рис. 1).

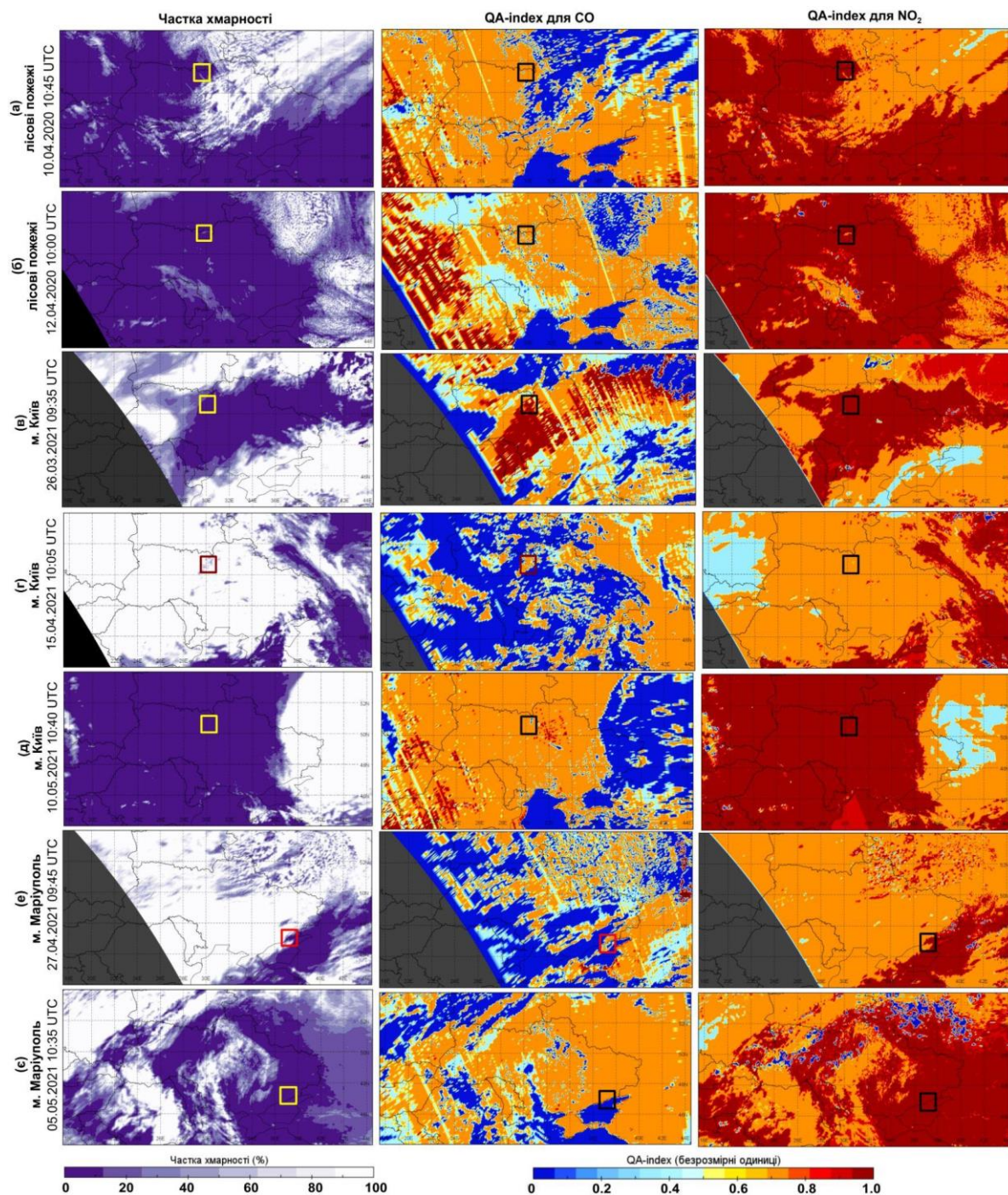


Рис.1 Вихідні супутникові дані хмарності та QA-index для CO та NO₂ для обраних днів на регіональному масштабі

Для м. Києва 26.03.2021 та 10.05.2021 над містом та околицями хмарність не спостерігалася (рис. 1 в, д). У даних випадках найближча хмарність спостерігалася на сході (10.05) та на заході України (26.03), як наслідок QA-index над зоною дослідження був статистично надійний: для CO 0,80–1,00 та 1,00 для NO₂. Для 15.04.2021 над більшою територією міста спостерігалася хмарність, але QA-index досліджуваних забруднюючих речовин був високим (рис. 1 г): для CO - 0,75; для NO₂ - 0,80, що говорить про надійність даних. Над територією м. Маріуполь в обрані дні 05.05.2021 (рис.1 е) та 27.04.2021 (рис.1 е) хмарність над містом була повністю відсутня, з її наявністю на околицях міста 27.04.2020 (рис.1 е). Як наслідок, маємо висоту якості даних: QA-index для CO 0,80; для NO₂ 1,00.

Для обраних еталонних днів із лісовими пожежами – 10.04.2020 та 12.04.2020 над територією Київської області також спостерігалися ідеальні умови для дослідження (рис.1 а, б). Дані CO та NO₂ мали високу якість, зі значенням індексу 0,80 для CO та 1,00 для NO₂, що стало наслідком відсутньої хмарності.

При розрахунках індексу dNO₂/dCO бралися до уваги вміст забруднюючих речовин у шлейфі. Шлейфом атмосферного забруднення будемо вважати локальні максимуми забруднення, що поширюються від джерела викидів за переважаючим напрямком вітру. Для правильної інтерпретації індексу dNO₂/dCO необхідно визначати вміст кожного з них (NO₂ та CO) у шлейфі, а також фонові значення з навітряної сторони. Вміст у шлейфі вказуватиме на рівні забруднення спричинені активністю джерел викидів, тоді як фонові значення з навітряної сторони - рівні забруднення без впливу конкретних джерел викидів.

Для визначення висоти на якій оцінюємо напрямок переносу забрудненого атмосферного повітря необхідно брати до уваги висоту ГША. На верхній межі ГША вітер максимально наближається до умов геострофічності, тобто вказує реальний напрямок переміщення повітряних мас не видозмінених впливом підстильної поверхні. Зважаючи на це, для аналізу характеристик вітру обираємо вітер на рівні найближчої ізобаричної поверхні до висоти ГША. Для обраних випадків, ця висота варіювалася від 1270 м (875 гПа) до 2070 м (800 гПа). Під час лісових пожеж 10.04.2020 та 12.04.2020 спостерігався південно-східний та північно-східний вітер зі швидкістю 10 м/с та 3-5 м/с відповідно (рис.2 а-б), що сприяло більш швидкому перенесенню забрудненого повітря.

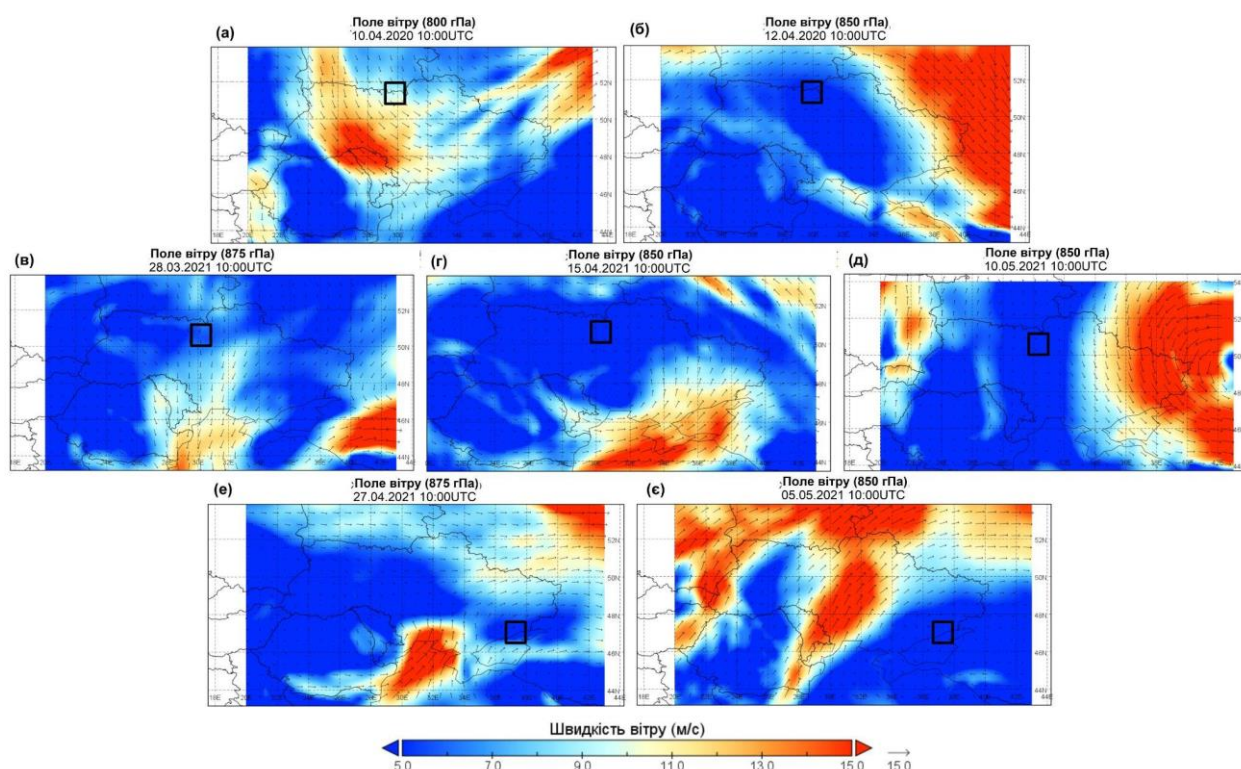


Рис.2 Поле вітру на верхній межі ГША для обраних днів на регіональному масштабі

У м. Києві у досліджувані дні загалом напрямом поширення забруднення був південний 10.05.2021 і 26.03.2021 (рис.2 д,в), та північний протягом 15.04.2021 (рис. 2г) із середньою швидкістю вітру до 6 м/с. У м. Маріуполь 27.04.2021 та 05.05.2021 спостерігався північно-східний та східний вітер зі швидкістю 7 м/с та 2-5 м/с відповідно (рис.2 е-є).

Таким чином, для оцінки ефективності перебігу процесів горіння шляхом розрахунку індексу dNO_2/dCO першочерговим є визначення щільності хмарності та розрахунку QA-index, як додаткового показника надійності отриманих супутникових даних. Наступним етапом є визначення швидкості та напрямку геострофічного вітру на відповідному ізобаричному рівні, вирахованим з використанням висоти ГША. Після аналізу напрямку та швидкості шлейфу можливо чітко обрати точки для визначення вмісту забруднюючих речовин з метою розрахунку індексу dNO_2/dCO .

2 Загальний вміст NO_2 та CO в атмосферному повітрі. На другому етапі методики визначення dNO_2/dCO , до уваги бралася кількість речовини в атмосферному стовпі (для NO_2 у тропосферному стовпі) над джерелом викидів та фоновий вміст. Проведений аналіз супутникової інформації показав, що для досліджуваних районів викиди забруднюючих речовин суттєво відрізнялися (рис. 3-4).

Загалом загальний вміст CO безпосередньо в досліджуваних зонах варіювався від 0,064 у Маріуполі до 0,330 над Київською областю під час лісових пожеж. Описуючи викиди CO над м. Київ, варто зазначити, що порівнюючи з іншими досліджуваними регіонами, вміст тут був меншим та мало відрізнявся від фонового. У ясні дні 26.03.2021 та 10.05.2021 кількість CO над джерелом викидів становила 0,039 моль/м² і 0,040 моль/м² відповідно та 0,033 моль/м² і 0,030 моль/м² поза шлейфом. Для 15.04.2021, коли над містом спостерігалася хмарна погода, викиди над джерелом забруднення становили 0,045 моль/м², а фоновий вміст складав 0,036 моль/м². Чіткий шлейф над м. Києвом у досліджувані періоди не спостерігався (рис.3 в-д).

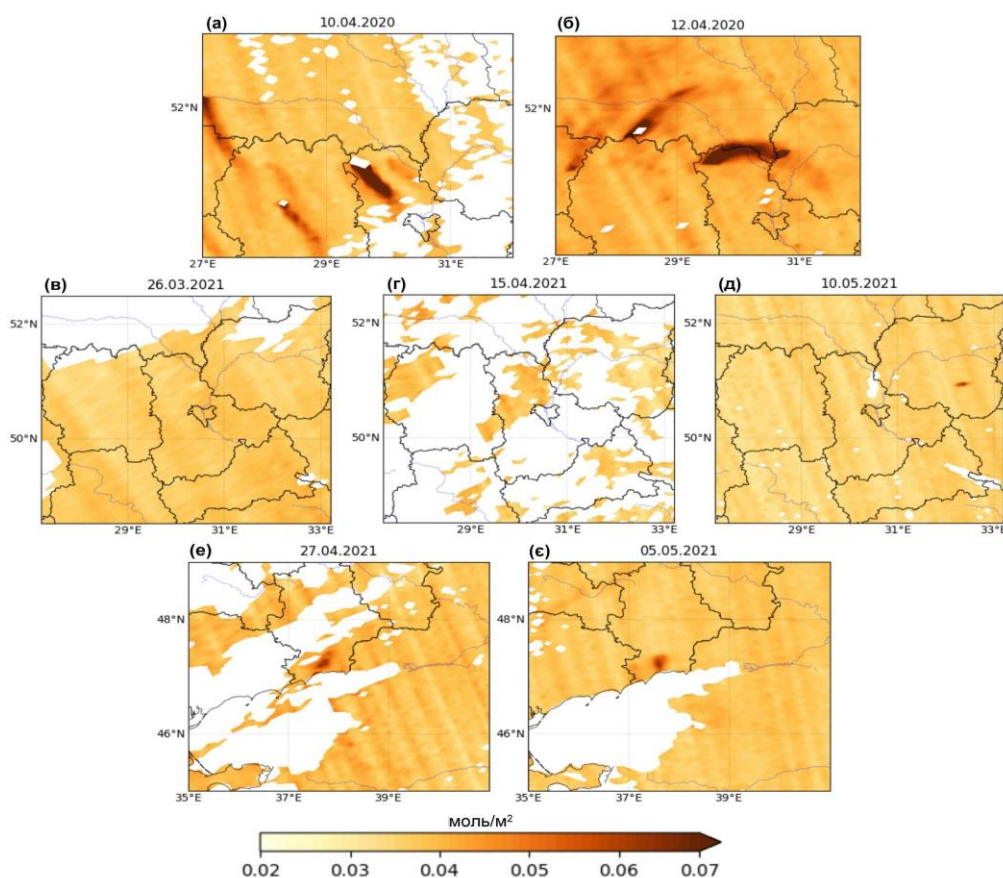


Рис.3 Загальний вміст CO в атмосфері для обраних днів і районів дослідження: лісові пожежі (а, б), м. Київ (в, г, д), та м. Маріуполь (е, є)

Вміст CO над промисловим районом м. Маріуполь був значно більшим, у порівнянні з м. Київ. 27.04.2021 кількість речовини над джерелом викидів становила $0,055 \text{ моль/м}^2$ та $0,034 \text{ моль/м}^2$ поза шлейфом (рис.3 е); 05.05.2021 – $0,064 \text{ моль/м}^2$ та $0,040 \text{ моль/м}^2$ відповідно (рис.3 є). У досліджувані дні викиди промислового комплексу м. Маріуполь у сукупності зі значним вітром утворювали видимий шлейф забруднення, що поширювався на околиці міста.

Досліджуючи вміст CO під час потужних лісових пожеж був суттєво вищий за попередньо описані показники. 10.04.2020 кількість CO у стовпі атмосфери над джерелом викидів була $0,15 \text{ моль/м}^2$ та $0,037$ поза шлейфі, що під дією сильного південно-східного вітру (10 м/с) сприяло потужному перенесенню забруднення, яке простягалось до околиць м. Києва (рис.3 а). 12.04.2020 спостерігалася подібна ситуація. Вміст CO над місцями горіння біомаси становив $0,330 \text{ моль/м}^2$ формуючи потужний видимий шлейф, який поширювався у північно-східному напрямку. Фоновий вміст з навітряної сторони до джерела викидів становив $0,040 \text{ моль/м}^2$. (рис.3 б).

Загальний вміст NO_2 варіювався в залежності від досліджуваної території: від $8,9 \times 10^{-5} \text{ моль/м}^2$ у м. Маріуполь до $1,0 \times 10^{-4} \text{ моль/м}^2$ у м. Києві (рис.4 в-д). Кількість речовини над джерелом викидів у всі дні була досить суттєвою: 26.03.2021 над містом вміст NO_2 становив $2 \times 10^{-4} \text{ моль/м}^2$; 15.04.2021 – $1,0 \times 10^{-4} \text{ моль/м}^2$; 10.05.2021 – $2,7 \times 10^{-4} \text{ моль/м}^2$.

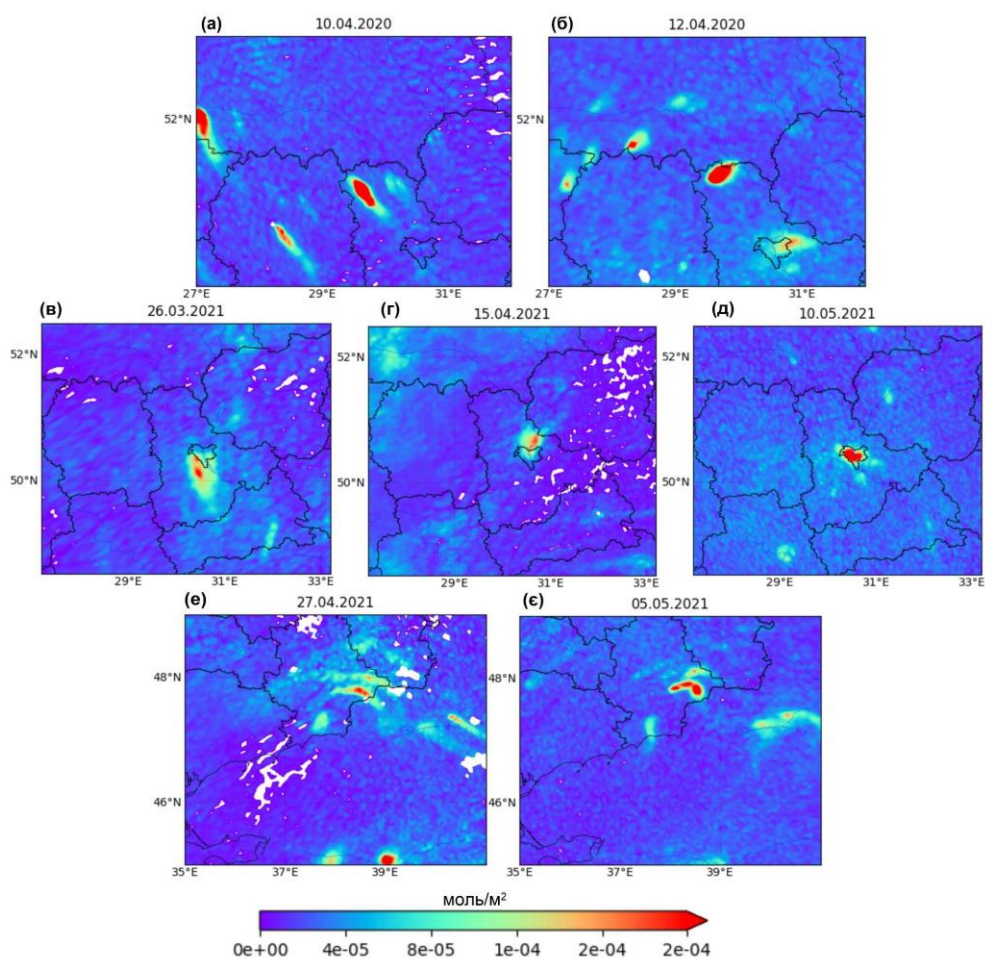


Рис.4 Загальний вміст NO_2 в атмосфері для обраних днів і районів дослідження: лісові пожежі (а, б), м. Київ (в, г, д), та м. Маріуполь (е, є)

Фоновий вміст NO_2 також значно варіювався: 26.03.2021 він становив $9,6 \times 10^{-6} \text{ моль/м}^2$; 15.04.2021 – $2,5 \times 10^{-6} \text{ моль/м}^2$; 10.05.2021 – $1,0 \times 10^{-5} \text{ моль/м}^2$. Протягом досліджуваних днів над м. Києвом спостерігався чіткий видимий шлейф, що переносив забруднене атмосферне повітря за напрямком вітру.

Вміст NO_2 над м. Маріуполем також утворював видимий шлейф забруднення (рис.4 е-

є). 27.04.2021 кількість речовини над джерелом викидів становила $1,1 \times 10^{-4}$ моль/м² та $1,3 \times 10^{-5}$ моль/м² поза шлейфом (рис.4 є); 05.05.2021 – $8,9 \times 10^{-5}$ моль/м² та $1,3 \times 10^{-5}$ моль/м² відповідно (рис.4 є).

Подібно до вмісту СО, при дослідженні вмісту NO₂ під час лісових пожеж у Київській області кількість речовини суттєво перевищувала попередньо описані випадки для міст. 10.04.2020 кількість тропосферного NO₂ у стовпі атмосфери над джерелом викидів становила $7,4 \times 10^{-4}$ моль/м² та $5,7 \times 10^{-6}$ моль/м² поза шлейфом, що під дією вітру (10 м/с) сприяло швидкому розповсюдженню забрудненню у південно-східному напрямку (рис.4 а). Вміст NO₂ 12.04.2020 під час горіння біомаси становив $7,8 \times 10^{-4}$ моль/м² та $3,0 \times 10^{-5}$ моль/м² у шлейфі, що теж створювало видимий шлейф, який рухався у північно-східному напрямку (рис.4 б).

3 Оцінка ефективності перебігу процесів горіння. Третім етапом оцінки ефективності перебігу процесів горіння є обчислення індексу dNO₂/dCO на основі перевірених на надійність даних загального вмісту NO₂ та СО у стовпі атмосфери. Вміст над джерелом викидів визначено за максимальним вмістом домішок у забрудненому шлейфі. Фонові вміст NO₂ та СО визначається за межами видимого забрудненого шлейфу з навітряної сторони перед джерелом або групою джерел викидів. Напрямок та швидкість вітру обрано на верхній межі ГША. Вхідні дані та обчислений індекс dNO₂/dCO наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Вхідні дані та значення dNO₂/dCO для досліджуваних випадків

Випадок	Лісова пожежа	Лісова пожежа	Викиди м. Київ	Викиди м. Київ	Викиди м. Київ	Викиди м. Маріуполь	Викиди м. Маріуполь
Дата	10 квітня 2020 р.	12 квітня 2020 р.	10 травня 2021 р.	15 квітня 2021 р.	26 березня 2021 р.	27 квітня 2021 р.	5 травня 2021 р.
Висота ГША, м	2070	1647	1662	1550	1270	1348	1473
Ізобарична поверхня, гПа	800	850	850	850	875	875	850
Напрямок вітру	Пд-Сх	Пн-Сх	Пд	Пн	Пд	Пн-Сх	Сх
Швидкість вітру, м/с	10 м/с	<5 м/с	<5 м/с	<5 м/с	6 м/с	7 м/с	<5 м/с
Вміст NO ₂ у шлейфі, моль/м ²	$7,4 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$8,9 \times 10^{-5}$
Фоновий вміст NO ₂ , моль/м ²	$5,7 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$9,6 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Вміст СО у шлейфі, моль/м ²	0.150	0.330	0.040	0.045	0.039	0.055	0.064
Фоновий вміст СО, моль/м ²	0.037	0.040	0.030	0.036	0.033	0.034	0.040
dNO ₂ /dCO	6.50	2.59	26.00	10.83	31.73	4.62	3.17

Обчислені значення індексу dNO₂/dCO для досліджуваних випадків варіюють в межах від 2.59 до 31.73. Для двох випадків із лісовими пожежами індекс складає 2.59 та 6.50; для трьох випадків викидів м. Київ — 10.83, 26.00 та 31.73; для двох випадків викидів м. Маріуполь — 4.62 та 3.17. Отримані показники вказують на можливість використання індексу dNO₂/dCO для території України. Загалом, індекс вловлює відмінності між малоефективним горінням як наприклад горіння біомаси і спалювання твердого палива, та більш різноманітними джерелами викидів, де поряд із твердим паливом використовується газ. Це свідчить про можливість опосередковано виявляти зміну типів палива за супутниковими даними загального вмісту NO₂ та СО в атмосферному повітрі.

У той же час, одразу простежується недолік, пов'язаний із великим розкидом значень. Фактично, це свідчить про неможливість використання індексу dNO₂/dCO для одиничних випадків. Тобто, точність оцінки ефективності перебігу процесів спалювання та виявлення зміни типу палива на підприємствах або загалом по місту можливе лише на основі використання відносно довгих статистичних рядів. Для зменшення ролі похибок доцільним

є проведення осереднення за тривалий проміжок часу та побудова статистичного розподілу dNO_2/dCO з метою оцінки повторюваності різних градацій значень.

Одним із перспективних напрямків використання супутникових даних хімічних складових атмосферного повітря та подібних індексів у майбутньому є оцінка емісійних факторів з виходом на обчислення маси викидів забруднюючих речовин. Той факт, що обчислені значення індексу dNO_2/dCO відображають відмінність м. Київ у порівнянні із лісовими пожежами та м. Маріуполь вказує на можливість переходу від сучасної якісної оцінки таких параметрів до більш точних кількісних показників із майбутнім розвитком супутникового зондування хімічних складових атмосферного повітря.

4 Обговорення. Для обраних випадків та територій, нами було отримано значення індексу dNO_2/dCO , що змінюється від 2.6 для лісових пожеж до 31.7 для м. Київ із великою різноманітністю джерел викидів. Отримані показники близькі за абсолютними значеннями до розрахунків закордонних вчених. Зокрема, для природних пожеж характерними є індекси від 1 у бореальній зоні до 6 у екваторіально-тропічній зоні [28]. Для міст значення подібних індексів вищі, особливо за умов використання не супутникових, а модельних даних [13, 26].

За умов хмарності нами для Києва отримано показник dNO_2/dCO близько 10.8, що є порівняно малим із іншими днями. Це дозволяє припустити, що будь-який хмарний покрив (навіть за умови збереження хорошої якості даних) завищує внесок CO, що призводить до зменшення індексу. Причиною цього може бути співпадіння довжин випромінювання тих хвиль, що поглинаються і CO, і водяною парою. Як наслідок вміст CO буде завищеним. Окрім похибок та ряду наближень при визначенні індексів для оцінки ефективності перебігу процесів горіння, значним чином на неузгодженості впливають виведення із радикалами OH [14].

Наразі використання подібних індексів відбувається окремо для супутникових, окремо для наземних, і окремо для модельних даних [26]. У подальшому за різних джерел даних, відбувається їх розгляд паралельно, проте взаємне порівняння абсолютних значень чи їх інтеграція поки неможлива. Потрібно розуміти, що методологія оцінки на основі супутникових даних даватиме нижчі показники.

Загалом, індекс dNO_2/dCO має хороші перспективи використання для джерел викидів на території України. Проте, надійні оцінки можна отримати лише на основі довгих часових рядів. Основну складність формування таких часових рядів представляє собою достатньо складна технічна реалізація обчислень. Розроблена та представлена у даній статті методика оцінки dNO_2/dCO дає можливість виходу на автоматизовані алгоритми обрахунку для найбільших міст території України та попередньо виявлених пожеж у природних екосистемах. Перш за все, реалізація методики потребуватиме алгоритми виявлення шлейфів забрудненого атмосферного повітря на основі вихідних пікселів даних супутникових спостережень.

Висновки. У представленій роботі вперше для території України здійснено перевірку можливості використання індексу dNO_2/dCO для оцінки перебігу процесів горіння на основі даних супутникових спостережень Sentinel-5P. Визначено основні етапи розрахунків, що включають у себе аналіз умов хмарності та статистичної надійності супутникових даних, встановлення переважаючого напрямку вітру із залученням даних про висоту ГША, оцінку вмісту NO_2 та CO над джерелом викидів та фоновий вміст із навітряної сторони, та розрахунок індексу dNO_2/dCO для оцінки перебігу процесів горіння. Отримані значення dNO_2/dCO , що варіювали від 2.6 до 6.5 для лісових пожеж, від 3.1 до 4.6 для м. Маріуполь із переважним використанням твердого палива, та від 10.8 до 31.7 для м. Києва із різноманітними джерелами викидів та типом палива, дозволяють стверджувати про адекватності відображення індексу і можливість його використання на території України. У зв'язку із наявними похибками і значною варіативністю показників dNO_2/dCO , наголошено на необхідності проведення аналізу на основі часових рядів.

У подальших дослідженнях необхідно провести розрахунок для періоду щонайменше рік, сформувавши часові ряди для найбільших міст території України. Планується проведення оцінки dNO_2/dCO до та після війни, що дозволить виявити зміну у використанні палива об'єктами промисловості. Перспективним напрямком подальших досліджень є вихід на розрахунок емісійних факторів та маси викидів за допомогою даних супутникового зондування.

Список літератури

1. Баштаннік, М.П., Жемера, Н.С., Кіптенко, Є.М., Козленко, Т.В. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2014. Вип. 266. С.70-93
2. Adams, C., McLinden, C. A., Shephard, M. W., et al. Satellite-derived emissions of carbon monoxide, ammonia, and nitrogen dioxide from the 2016 Horse River wildfire in the Fort McMurray area. *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 2577–2599. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2577-2019>
3. Andreae, M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmos. Chem. Phys.* Vol.19. P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
4. Babii V., Gordiienko O., Tsyupa I. Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020. *Geoinformatics (Kyiv, May 2021)*. Vol. 2021. P. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138>
5. Borsdorff, T., aan de Brugh, J., Hu, H., et al. Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmos. Meas. Tech.* 2018. Vol.11. P. 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>
6. Borsdorff, T., aan de Brugh, J., Pandey, S., et al. Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Vol.19 P. 3579–3588. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3579-2019>
7. Du, Z. Et al. The CO/CO₂ Ratio in the Products of the Carbon-Oxygen Reaction. *Fundamental Issues in Control of Carbon Gasification Reactivity*/ Ed. J. Lahaye, P. Ehrburger. NATO ASI Series, Vol 192. Springer, 1991. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3310-4_5
8. Emily G. Snyder, Timothy H. Watkins, Paul A. Solomon, et al. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, N.20 P.11369-11377 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es4022602>
9. Goldberg D.L., Lu G., Oda, T., et al. Exploiting OMI NO₂ satellite observations to infer fossil-fuel CO₂ emissions from U.S. megacities. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 695 P. 133805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133805>
10. Griffin, D., McLinden, C. A., Dammers, et al. Biomass burning nitrogen dioxide emissions derived from space with TROPOMI: methodology and validation. *Atmos. Meas. Tech.* 2021. Vol.14. P.7929–7957. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7929-2021>
11. Hersbach, H., et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). URL: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6> (Last accessed: 13.03.2023)
12. Hersbach, H., et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). URL: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> (Last accessed: 15.03.2023)
13. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K. F., et al. Quantifying burning efficiency in megacities using the NO₂/CO ratio from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmos. Chem. Phys.* 2020. Vol.20. P.10295–10310. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10295-2020>
14. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K. F., et al. Estimation of OH in urban plumes using TROPOMI-inferred NO₂/CO. *Atmos. Chem. Phys.* 2022. Vol.22. P. 16053–16071. <https://doi.org/10.5194/acp-22-16053-2022>
15. Lambert, J.-C., A. Keppens, S. Compernelle, et al. Quarterly Validation Report of the Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products #17: April 2018 – November 2022. *S5P MPC Routine Operations Consolidated Validation Report series*. 2022. Is. 17, Version 17.01.00. 225 p.
16. Lim H. S., MatJafri M. Z., Abdullah K., Wong C. J. Advances in Geoscience and Remote Sensing: Air Pollution Determination Using Remote Sensing Technique/ Ed. Jedlovec G. IntechOpen. 2009. 754 p. <https://doi.org/10.5772/8319>
17. Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O.C. et al. Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. *Fire*. 2021. Vol.4, N.2. P.25. <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
18. McDuffie, E. E., Smith, S. J., O'Rourke, P., et al. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- and fuel-specific sources (1970–2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS). *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. *Advances in Geoscience and Remote Sensing*. Vol.12. P.3413–3442. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3413-2020>
19. News. Copernicus Sentinel-5P increased spatial resolution change now operational. URL: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/asset_publisher/xR9e/content/copernicus-sentinel-5p-increased-spatial-resolution-change-now-operational (Last accessed: 24.03.2023)
20. Potts, D.A., Ferranti, E.J.S., Timmis, R., et al. Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, N.12. 1659. <https://doi.org/10.3390/atmos12121659>

21. Pseftogkas, A., Koukoulis, M.-E., Skoulidou, I., et al. A new separation methodology for the maritime sector emissions over the Mediterranean and Black Sea regions. *Atmosphere*. 2021. Vol.12, N.11. P.1478. <https://doi.org/10.3390/atmos12111478>
22. Savenets M., Osadchyi V., Oreshchenko A., Pysarenko L. Air Quality Changes in Ukraine during the April 2020 Wildfire Event. *Geographica Pannonica*, 2020. Vol. 24, N.4. P.271-284 <https://doi.org/10.5937/gp24-27436>
23. Saw, G.K., Dey, S., Kaushal, H., Lal, K. Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259. Art. 118514. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514>
24. Silva, S. J., Arellano, A. F., Worden, H. M. Toward anthropogenic combustion emission constraints from space-based analysis of urban CO₂/CO sensitivity. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40 P. 4971–4976, <https://doi.org/10.1002/grl.50954>
25. Tian, Y., Sun, Y., Borsdorff, T., et al. Quantifying CO emission rates of industrial point sources from Tropospheric Monitoring Instrument observations. *Environmental Research Letters*, 2022. Vol. 17, N. 1 Art. 014057. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3b1a>
26. Van der Velde, I. R., van der Werf, G. R., Houweling, S., et al. Biomass burning combustion efficiency observed from space using measurements of CO and NO₂ by the TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 597–616. <https://doi.org/10.5194/acp-21-597-2021>
27. Veeffkind P., van Oss R.F., Eskes H., et al. The Applicability of Remote Sensing in the Field of Air Pollution. *Institute for Environment and Sustainability*. 2007. EUR 22542 EN. 54 p.
28. Wan, N., Xiong, X., Kluitenberg, G. J., et al. Estimation of biomass burning emission of NO₂ and CO from 2019–2020 Australia fires based on satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. P.711–724. <https://doi.org/10.5194/acp-23-711-2023>
29. Xiang Sheng, Zhang Shaojun, Wang Hui, et al. *ACS ES&T Engineering*. 2022. Vol. 2, N.9. P. 1599-1610. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsestengg.2c00027>
30. Yatsenko, Y., Shevchenko, O., Snizhko, S. Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*. 2018. Vol. 3, N.82. P.87-95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>

References

1. Bashtannik, M.P., Zhemera, N.S., Kiptenko, Ye.M., Kozlenko, T.V. Stan zabrudnennia atmosfernoho povitria nad terytoriiu Ukrainy. [The conditions of atmospheric air pollution over Ukrainian territory] *Naukovi pratsi UkrNDHMI*. 2014. Vyp. 266. S.70-93
2. Adams, C., McLinden, C. A., Shephard, M. W., et al. Satellite-derived emissions of carbon monoxide, ammonia, and nitrogen dioxide from the 2016 Horse River wildfire in the Fort McMurray area. *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 2577–2599. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2577-2019>
3. Andreae, M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmos. Chem. Phys.* Vol.19. P. 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
4. Babii V., Gordienko O., Tsyupa I. Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020. *Geoinformatics (Kyiv, May 2021)*. Vol. 2021. P. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138>
5. Borsdorff, T., aan de Brugh, J., Hu, H., et al. Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmos. Meas. Tech.* 2018. Vol.11. P. 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>
6. Borsdorff, T., aan de Brugh, J., Pandey, S., et al. Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Vol.19 P. 3579–3588. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3579-2019>
7. Du, Z. Et al. The CO/CO₂ Ratio in the Products of the Carbon-Oxygen Reaction. *Fundamental Issues in Control of Carbon Gasification Reactivity*/ Ed. J. Lahaye, P. Ehrburger. NATO ASI Series, Vol 192. Springer, 1991. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3310-4_5
8. Emily G. Snyder, Timothy H. Watkins, Paul A. Solomon, et al. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47, N.20 P.11369-11377 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es4022602>
9. Goldberg D.L., Lu G., Oda, T., et al. Exploiting OMI NO₂ satellite observations to infer fossil-fuel CO₂ emissions from U.S. megacities. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 695 P. 133805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133805>
10. Griffin, D., McLinden, C. A., Dammers, et al. Biomass burning nitrogen dioxide emissions derived from space with TROPOMI: methodology and validation. *Atmos. Meas. Tech.* 2021. Vol.14. P.7929–7957. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7929-2021>

11. Hersbach, H., et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). URL: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6> (Last accessed: 13.03.2023)
12. Hersbach, H., et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). URL: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> (Last accessed: 15.03.2023)
13. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K. F., et al. Quantifying burning efficiency in megacities using the NO₂/CO ratio from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmos. Chem. Phys.* 2020. Vol.20. P.10295–10310. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10295-2020>
14. Lama, S., Houweling, S., Boersma, K. F., et al. Estimation of OH in urban plumes using TROPOMI-inferred NO₂/CO. *Atmos. Chem. Phys.* 2022. Vol.22. P. 16053–16071. <https://doi.org/10.5194/acp-22-16053-2022>
15. Lambert, J.-C., A. Keppens, S. Compernelle, et al. Quarterly Validation Report of the Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products #17: April 2018 – November 2022. *S5P MPC Routine Operations Consolidated Validation Report series*. 2022. Is. 17, Version 17.01.00. 225 p.
16. Lim H. S., MatJafri M. Z., Abdullah K., Wong C. J. Advances in Geoscience and Remote Sensing: Air Pollution Determination Using Remote Sensing Technique/ Ed. Jedlovec G. IntechOpen. 2009. 754 p. <https://doi.org/10.5772/8319>
17. Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O.C. et al. Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. *Fire*. 2021. Vol.4, N.2. P.25. <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
18. McDuffie, E. E., Smith, S. J., O'Rourke, P., et al. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- and fuel-specific sources (1970–2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS). *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. *Advances in Geoscience and Remote Sensing*. Vol.12. P.3413–3442. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3413-2020>
19. News. Copernicus Sentinel-5P increased spatial resolution change now operational. URL: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/asset_publisher/xR9e/content/copernicus-sentinel-5p-increased-spatial-resolution-change-now-operational (Last accessed: 24.03.2023)
20. Potts, D.A., Ferranti, E.J.S., Timmis, R., et al. Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, N.12. 1659. <https://doi.org/10.3390/atmos12121659>
21. Psftogkas, A., Koukoulis, M.-E., Skoulidou, I., et al. A new separation methodology for the maritime sector emissions over the Mediterranean and Black Sea regions. *Atmosphere*. 2021. Vol.12, N.11. P.1478. <https://doi.org/10.3390/atmos12111478>
22. Savenets M., Osadchyi V., Oreshchenko A., Pysarenko L. Air Quality Changes in Ukraine during the April 2020 Wildfire Event. *Geographica Pannonica*, 2020. Vol. 24, N.4. P.271-284 <https://doi.org/10.5937/gp24-27436>
23. Saw, G.K., Dey, S., Kaushal, H., Lal, K. Tracking NO₂ emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259. Art. 118514. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514>
24. Silva, S. J., Arellano, A. F., Worden, H. M. Toward anthropogenic combustion emission constraints from space-based analysis of urban CO₂/CO sensitivity. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40 P. 4971–4976, <https://doi.org/10.1002/grl.50954>
25. Tian, Y., Sun, Y., Borsdorff, T., et al. Quantifying CO emission rates of industrial point sources from Tropospheric Monitoring Instrument observations. *Environmental Research Letters*, 2022. Vol. 17, N. 1 Art. 014057. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3b1a>
26. Van der Velde, I. R., van der Werf, G. R., Houweling, S., et al. Biomass burning combustion efficiency observed from space using measurements of CO and NO₂ by the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 597–616. <https://doi.org/10.5194/acp-21-597-2021>
27. Veefkind P., van Oss R.F., Eskes H., et al. The Applicability of Remote Sensing in the Field of Air Pollution. *Institute for Environment and Sustainability*. 2007. EUR 22542 EN. 54 p.
28. Wan, N., Xiong, X., Kluitenberg, G. J., et al. Estimation of biomass burning emission of NO₂ and CO from 2019–2020 Australia fires based on satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. P.711–724. <https://doi.org/10.5194/acp-23-711-2023>
29. Xiang Sheng, Zhang Shaojun, Wang Hui, et al. *ACS ES&T Engineering*. 2022. Vol. 2, N.9. P. 1599-1610. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsestengg.2c00027>
30. Yatsenko, Y., Shevchenko, O., Snizhko, S. Assessment of air pollution level of nitrogen dioxide and trends of it changes in the cities of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*. 2018. Vol. 3, N.82. P.87-95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>

The use of remote sensing of atmospheric composition for burning efficiency estimation for Ukrainian territory

Rybachynska V., Savenets M.

Ratios of chemical compounds in the atmosphere are becoming more widely used for assessment of changes in fuel consumption by cities or specific industrial objects, as well as for correction of emission factors, which are crucial for emission inventories. The methodology for using the NO₂/CO ratio for analysis of burning efficiency based on remote sensing data was first implemented for Ukrainian territory. We selected seven case studies for analyses, including three days for Kyiv with a variety of emission sources, two days for Mariupol with prevailing coal-fired industrial facilities, and two days for wildfires as reference cases for comparison. We use NO₂ and CO column number densities derived from the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor, supported by the boundary layer height and wind parameters from the ERA-5 reanalysis. The overall methodology for NO₂/CO estimation includes data quality analysis using cloudiness and a quality assurance index; meteorological data processing for obtaining the prevailing wind field at the top of the boundary layer; retrieving NO₂ and CO content from emission sources and background values; and the NO₂/CO ratio computation itself. For selected cases, the NO₂/CO ratio equals 2.6 to 6.5 for wildfires, 3.1 to 4.6 for Mariupol, and 10.8 to 31.7 for Kyiv. Because of the available uncertainties, the necessity of estimating the NO₂/CO ratio using longer time series is emphasized. The prospects for using the NO₂/CO ratio are possibilities for the computation of emission factors and detecting the mass of pollutants emitted in Ukrainian cities. The NO₂/CO ratio can be used as an additional parameter for assessing the changes in fuel consumption, considering the war consequences in Ukraine.

Key words: emissions, nitrogen dioxide, carbon monoxide, Sentinel-5P, remote sensing, air pollution.

Надійшла до редколегії 25.03.2023

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.6>

УДК 551.574.42

Пясецька С.І.

Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського, м. Київ

ВИПАДКИ МАСОВОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СКЛАДНИХ ОЖЕЛЕДО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ПРОТЯГОМ ОСТАНЬНОГО ТРИДЦЯТИРІЧЧЯ 1991-2020 рр.

Стаття присвячена дослідженню випадків масового відкладення складних ожеледо-паморозевих відкладів на території України по окремих десятиріччях протягом періоду 1991-2020 рр., який відображає стан сучасного клімату в регіоні. За випадок масового відкладення складних ожеледо-паморозевих відкладів було прийнято випадок, коли в одну дату такі відклади спостерігались не менше ніж на 10 станціях та не менше ніж у двох областях. Дослідження проводилось по кожному місяцю холодного та окремих місяцях перехідних сезонів, а також десятиріччях досліджуваного періоду окремо.

Метою статті було встановити особливості просторо-часового розповсюдження випадків масового розповсюдження складних ожеледо-паморозевих відкладів на території України протягом останнього тридцятирічного періоду.

Встановлено, що випадки масового розповсюдження складних відкладів спостерігаються протягом зимових місяців у січні та грудні. Здебільшого у грудні таких випадків більше ніж у січні. Встановлено збільшення кількості таких випадків протягом останнього десятиріччя (2011-2020 рр.) у двічі порівняно із їх сумарною кількістю за два попередніх десятиріччя.

Доведено, що у випадках масового розповсюдження складних ожеледо-паморозевих відкладів вони спостерігаються щонайменше на 10 станціях в одну дату, проте іноді на 11-15 або 16-20 станціях. Територіально складні ожеледо-паморозеві відклади масового характеру розповсюдження спостерігаються на території щонайменше від 5-6 областей до щонайбільше 13-14. Проте найчастіше вони розповсюджуються на території 5-6 областей.

Ключові слова: територія України, складні ожеледо-паморозеві відклади, місяці холодного періоду року, масове просторово-часове розповсюдження складних відкладів.

Вступ. Протягом зимового періоду на території України поширеними є ожеледо-паморозеві відклади. Серед них виділяються відклади ожеледі, налипання мокрого снігу, складні відклади та відклади паморозі (кристалічної та зернистої або поєднання обох з них). Складні відклади утворюються завдяки почерговому відкладенню ожеледі та паморозі (здебільшого зернистої, але за умов зниження температури повітря кристалічної), а також іноді завдяки налипанню мокрого снігу, ожеледі та зернистої (в окремих випадках кристалічної) паморозі. Такі відклади утворюються при частих змінах температурних умов

ISSN:2306-5680 Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2023. № 2 (68)