

УДК 551.510.42:551.507.362

**Михайло Валерійович Савенець,**

к. геогр. н., с. н. с. відділу моніторингу атмосфери,  
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,  
пр-т Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,  
e-mail: [savenetsm@gmail.com](mailto:savenetsm@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>;

**Ірина Віталіївна Дворецька,**

к. геогр. н., с. н. с., зав. лабораторії моніторингу атмосферного повітря,  
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,  
e-mail: [dvoretska@uhmi.org.ua](mailto:dvoretska@uhmi.org.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>;

**Людмила Михайлівна Надточій,**

н. с. відділу моніторингу атмосфери,  
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,  
e-mail: [onoslyuda@uhmi.org.ua](mailto:onoslyuda@uhmi.org.ua), <https://orcid.org/0000-0003-3038-5960>

## СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКА SENTINEL-5P

Робота присвячена аналізу просторово-часових закономірностей розподілу діоксиду азоту, діоксиду сірки, монооксиду вуглецю та формальдегіду над територією України та акваторіями Чорного й Азовського морів за даними супутника Sentinel-5P. Період досліджень охоплює липень 2018 – червень 2019 рр., що дозволило проаналізувати сучасний стан забруднення та актуалізувати інформацію щодо найбільш забруднених міст території України. В середньому загальний вміст  $\text{NO}_2$  змінюється в межах від  $4 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> до  $7 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup>; у Києві та ряді промислових міст на Донбасі перевищує  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>. Виявлено спалахи високого вмісту  $\text{NO}_2$  взимку в чистих районах, під час яких концентрації значно перевищують середні показники, що зумовлено надходженням забрудненого повітря з великих міст. Особливості сезонного ходу  $\text{NO}_2$  залежать від рівня антропогенної емісії: у промислових містах максимуми спостерігаються взимку, у віддалених від міст районах – в теплий сезон. Встановлено, що  $\text{CO}$  характеризується однорідним просторовим розподілом (в середньому  $0.033$ – $0.035$  моль/м<sup>3</sup>) у зв'язку із кількомісячним часом існування в атмосфері. Найбільші перевищення характерні для Маріуполя, Запоріжжя, Дніпра, Кам'янського та берегової лінії Чорного й Азовського морів. За період досліджень виявлено чотири спалахи потужної емісії  $\text{CO}$ : три з яких спостерігалися у містах, одна пов'язана із лісовими пожежами на території Білорусі та півночі Рівненської області. В Україні завищений вміст  $\text{SO}_2$  спостерігається в Донецькій, Запорізькій та Дніпропетровській областях, а також над морськими акваторіями. Виявлено локалізацію з найбільшою емісією  $\text{SO}_2$  із загальним вмістом більше  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>, що спостерігається в районі Нового Світу Донецької області. Для  $\text{HCHO}$  спостерігається різниця у концентраціях між територіями Правобережної та Лівобережної України. Встановлено особливості забруднення морських акваторій. У перехідні сезони завищені концентрації забруднюючих речовин спостерігаються за основними морськими шляхами, у теплий період року – вздовж берегової лінії. За осередненими значеннями усього періоду найбільш забрудненими є саме берегова лінія, що свідчить про значну емісію від каботажних рейсів та рибачьких човнів під час курортного сезону.

**Ключові слова:** забруднення атмосферного повітря, супутник, домішки, антропогенна емісія, просторовий розподіл, промислові міста, акваторія.

**М. В. Савенець, И. В. Дворецкая, Л. М. Надточий. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В УКРАИНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-5P.** В работе рассмотрен анализ пространственно-временных закономерностей распределения диоксида азота, диоксида серы, монооксида углерода и формальдегида над территорией Украины и акваториями Черного и Азовского морей за данными спутника Sentinel-5P. Период наблюдения охватывает июль 2018 – июнь 2019 гг., что позволило проанализировать современное состояние загрязнения и актуализировать информацию о наиболее загрязненных городах территории Украины. В среднем общее содержание  $\text{NO}_2$  изменяется от  $4 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup> до  $7 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>3</sup>; в Киеве и ряде промышленных городов Донбасса превышает  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>. Выявлены всплески высокого содержания  $\text{NO}_2$  зимой в чистых районах, во время которых концентрации значительно превышают средние показатели, что обусловлено поступлением загрязненного воздуха из больших городов. Особенности сезонной изменчивости  $\text{NO}_2$  зависят от уровня антропогенной эмиссии: в промышленных городах максимумы наблюдаются зимой, в удаленных от городов районах – в теплый сезон. Показано, что для  $\text{CO}$  характерно однородное распределение (в среднем  $0.033$ – $0.035$  моль/м<sup>3</sup>) в связи с несколько месячным временем существования в атмосфере. Наибольшие превышения характерны для Мариуполя, Запорожья, Днепра, Каменского и береговой линии Черного и Азовского морей. За период исследования выявлены четыре всплески мощной эмиссии  $\text{CO}$ : три из них наблюдались в городах, одна связана с лесными пожарами на территории Беларуси и севере Ровенской области. В Украине высокое содержание  $\text{SO}_2$  наблюдается в Донецкой, Запорожской и Днепропетровской областях, а также над морскими акваториями. Выявлена локализация с наибольшей эмиссией с общим содержанием выше  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>, которая наблюдается в Новом Свете Донецкой области. Для  $\text{HCHO}$  характерна разница в концентрациях между территориями Правобережной и Левобережной Украины. Определены особенности загрязнения морских акваторий. В переходные сезоны повышенные концентрации загрязняющих веществ наблюдаются по основным морским путям, в теплое время года – вдоль береговой линии. На основе осредненных значений всего периода исследований наиболее загрязненными является именно береговая линия, что свидетельствует о значительной эмиссии от каботажных рейсов и рыбацких кораблей во время курортного сезона.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферного воздуха, спутник, примеси, антропогенная эмиссия, пространственное распределение, промышленные города, акватория.

**Вступ.** В умовах розвитку промисловості та постійного збільшення автотранспорту, якість атмосферного повітря в Україні, як і у більшості країн світу, викликає велике занепокоєння. За останні роки з'явилася велика кількість наукових праць, в яких проводиться різнобічний аналіз стану атмосферного повітря та часових змін вмісту забруднюючих речовин на території України [1-7]. Особлива увага приділяється основним та найнебезпечнішим специфічним домішкам, вміст яких у атмосфері, багато у чому, залежить від збільшення антропогенного навантаження у містах та промислових районах: пил, оксиди азоту, монооксид вуглецю, діоксид сірки, формальдегід, важкі метали, тощо.

Системи наземного моніторингу забруднення атмосферного повітря, на основі яких проведено більшу частину сучасних досліджень в Україні, характеризуються надійністю та високою якістю отриманих даних. Проте, неможливість значного просторового охоплення наземними пунктами спостережень часто стає визначальним недоліком під час аналізу та оцінки якості атмосферного повітря. Висока просторово-часова невизначеність розподілу забруднюючих речовин в атмосфері, особливо в умовах значного антропогенного навантаження, практично унеможливує проведення статистичного аналізу забруднення атмосферного повітря на деякій відстані від точки вимірювання [8]. Цей недолік здатні подолати хіміко-метеорологічні та дисперсійні моделі [9-11], проте точність моделювання суттєво залежить від якості вхідної інформації, зокрема, під час опису джерел емісії. Якщо в межах незначних за масштабом територій (напр. місто, район, тощо) моделювання стає незамінним інструментом аналізу якості атмосферного повітря, то на значних просторових масштабах з високою роздільною здатністю стрімко зростає залежність від комп'ютерної потужності, що є лімітуючим фактором для проведення таких досліджень.

Стрімкий розвиток супутникових методів вимірювання вмісту хімічних складових атмосфери багато у чому вирішує проблему аналізу забруднення на значних просторових масштабах [12,13]. У світовій практиці для досліджень вмісту хімічних складових атмосфери використовуються різні супутникові прилади: SCIAMACHY (на супутнику Envisat), OMI (Aura), VSSC (Venus), MODIS та MOPITT (Terra), VIIRS (Suomi-NPP), SAGE (ERBS), GOME-2 (Metop) та ряд інших. Частина супутників дозволяє аналізувати безпосередньо вміст забруднюючих речовин з визначеною просторовою роздільною здатністю. Супутникові технології у згаданих супутниках не дозволяють отримати дані хімічних складових з

високою деталізацією, а розміри пікселів охоплюють десятки квадратних кілометрів. Іншою можливістю аналізувати стан забруднення, більш того з високою просторовою роздільною здатністю, є використання супутників, що зондують підстильну поверхню, зокрема Sentinel-2 чи Landsat. У такому разі діагностується лише перенесення забруднюючих речовин, наприклад за «слідами» диму, в той час як визначити хімічний склад неможливо. 13 жовтня 2017 р. запущено новий супутник Sentinel-5P з інструментом TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) на борту, що здійснив революцію у сфері глобального моніторингу якості атмосферного повітря та суттєво покращив дані хімічних складових попередніх супутникових місій (SCIAMACHY/Envisat та OMI/Aura) [14]. З просторовою роздільною здатністю 7x3.5 км Sentinel-5P дозволяє відстежувати забруднення над промисловими містами та районами [15]. Сьогодні вимірювання на 8 спектральних діапазонах дозволяє отримати дані діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), монооксиду вуглецю (CO), озону (O<sub>3</sub>), формальдегіду (HCHO), метану (CH<sub>4</sub>), аерозольного індексу та потоків ультрафіолетового випромінювання [16]. Дані супутника Sentinel-5P, як й інших місій Copernicus, є відкритими для користувачів та представлені на офіційному хабі для попередньої обробки [17]. Незважаючи на усі переваги Sentinel-5P, використовувати інформацію потрібно з обережністю, так як наявність шуму, похибки вимірювальних систем та проведення атмосферної корекції можуть призводити до значних похибок у даних.

Використання детальної супутникової інформації надало можливість проведення досліджень та аналіз сучасного стану забруднення атмосферного повітря над усією територією України за 2018–2019 рр., включаючи міста та регіони, де не проводяться жодних наземних вимірювань; а також актуалізувати інформацію щодо найбільш забруднених міст території України. **Метою даної роботи** є встановлення просторово-часових закономірностей розподілу NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO та HCHO над територією України та акваторіями Чорного й Азовського морів.

**Методика досліджень та вихідні дані.** Для досліджень обрано 4 забруднюючі домішки (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO та HCHO), вміст яких у атмосфері сьогодні суттєво залежить від антропогенних джерел емісії. Період досліджень для NO<sub>2</sub> охоплює липень 2018 – червень 2019 рр. включно; для SO<sub>2</sub>, CO, HCHO – з листопада 2018 р. до червня 2019 р. Початок періоду обмежений не датою запуску супутника, а датами відповідних релізів даних, після яких стало можливе їх використання. Винятком є дані CO, адже реліз відбу-

вся у липні 2018 р., проте можливість їх опрацювання з'явилася у листопаді 2018 р. Дані концентрацій хімічних складових представлені як продукти другого рівня Sentinel-5P Level 2 (L2) [16]. Ці дані прив'язані за часом, а не за широтою/довготою, тому вирішено вихідну інформацію брати з платформи Google Earth Engine, де вона представлена у вигляді продуктів третього рівня (L3) [18], а конвертація з L2 до L3 здійснена з використанням інструменту "harconvert" [19], що містить операцію "bin\_spatial".

Одиничне значення концентрації хімічної складової в атмосфері за несприятливих умов може характеризуватися значними похибками [16]. Тому, в даних дослідженнях надійність отриманих результатів забезпечено двома принциповими процедурами. По-перше, дані L3 відфільтровано за т.з. індексом гарантії якості (quality assurance index) з показником менше 0.5. По-друге, підвищити надійність можливо з використанням осереднення інформації у просторі або у часі. Осереднення інформації у просторі погіршує просторову роздільну здатність, проте зберігає дискретність у часі. Часове осереднення погіршує дискретність, проте зберігає просторову деталізацію. Для даного дослідження просторова деталізація є більш важливою, адже дозволяє проведення аналізу над конкретними промисловими містами. Тому дані забруднюючих речовин осереднювалися за різні проміжки часу з максимально можливою просторовою деталізацією.

Для обробки даних, проведення обчислень та візуалізації результатів використано мову програмування JavaScript у веб-середовищі The Earth Engine Code Editor. Попередня обробка включала у себе вивантаження відповідних продуктів третього рівня L3 для обчислень на віддалені сервери Google. Це забезпечило можливість швидких обчислень великих масивів даних без залучення власних комп'ютерних ресурсів, які, зазвичай, є обмежені. Результатами обчислень, на основі яких проведено дані дослідження, є середні та максимальні концентрації домішок за загальний період, окремі місяці та періоди з виявленим нетиповим просторовим розподілом. Обчислення проведені для кожної точки земної кулі з використанням вбудованих у веб-середовище функцій JavaScript. Візуалізація включала в себе побудову графіків часового ходу домішок у попередньо заданих координатах та картографування просторового розподілу середніх значень для заданої області досліджень. Координати, властивості шкали та кольорова гамма задавалися безпосередньо у The Earth Engine Code Editor.

**Результати досліджень.** Діоксид азоту ( $NO_2$ ). Сумісний аналіз тропосферного, стратосферного та загального вмісту  $NO_2$  в атмосфері показав визначальний внесок тропосферних концентрацій, а тому дає чітке уявлення щодо ролі антропогенних джерел емісії. Для виявлення найбільш забруднених міст та найменш забруднених регіонів території України діоксидом азоту обчислено та проаналізовано середні значення за період липень 2018 – червень 2019 рр., що дозволило чітко локалізувати території зі значною антропогенною емісією (рис. 1). В той час, як показники для більшої частини території України знаходяться в межах від  $4 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup> до  $7 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup>, у найзабрудненіших районах вміст перевищує  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>2</sup>.

Найвищі концентрації  $NO_2$  спостерігаються у Києві та у ряді промислових міст на Донбасі: Новому Світі (Старобешівський район, Донецька область), Слов'янську, Краматорську, Костянтинівці, Кураховому та Харцизьку. Деякі із названих міст перебувають за лінією розмежування в зоні ООС, що суттєво ускладнює проведення аналізу через недостатню кількість достовірної інформації про діяльність промислових підприємств та обсяги викидів. Високі концентрації  $NO_2$  у Слов'янську, Краматорську, Костянтинівці та Кураховому, що перебувають на підконтрольній Україні території, найімовірніше обумовлені викидами з підприємств<sup>1,2,3,4,5</sup> та теплоелектростанцій (ТЕС)<sup>6,7</sup>, діяльність яких підтверджується зведеннями з офіційних джерел. В свою чергу, Харцизьк та Новий Світ характеризуються високими значеннями загального вмісту  $NO_2$ , що дозволяє припустити про наявність потужної емісії з місцевих підприємств, особливо Старобешівської ТЕС, що розташована у Новому Світі. Проте, надійного підтвердження про об'єми виробницт-

<sup>1</sup> Миська рада м. Слов'янськ. Економіка. URL:

<http://www.slavrada.gov.ua/?view=econom>

<sup>2</sup> Паспорт міста Слов'янськ, Донецька область. Станом на 1 жовтня 2018 р. URL:

<http://www.slavrada.gov.ua/uploads/File/pasport.pdf>

<sup>3</sup> Краматорськ. Інвестиційний паспорт. URL:

[http://www.krm.gov.ua/UserFiles/Image/invest/invest\\_overview\\_ua.pdf](http://www.krm.gov.ua/UserFiles/Image/invest/invest_overview_ua.pdf)

<sup>4</sup> Звіт про виконання програми економічного і соціального розвитку міста Краматорська за 2018 рік. URL:

<http://www.krm.gov.ua/article/view/776>

<sup>5</sup> Костянтинівська міська рада. Економіка і торгівля. URL: <http://konstrada.gov.ua/sotsialno-ekonomichni-rozvitok/ekonomika-ta-torgivlya>

<sup>6</sup> Східенерго. Курахівська ТЕС. URL:

<https://energo.dtek.com/business/generation/vostokenergo/>

<sup>7</sup> Донбасенерго. Слов'янська ТЕС. URL:

<https://de.com.ua/uk/structure-units>

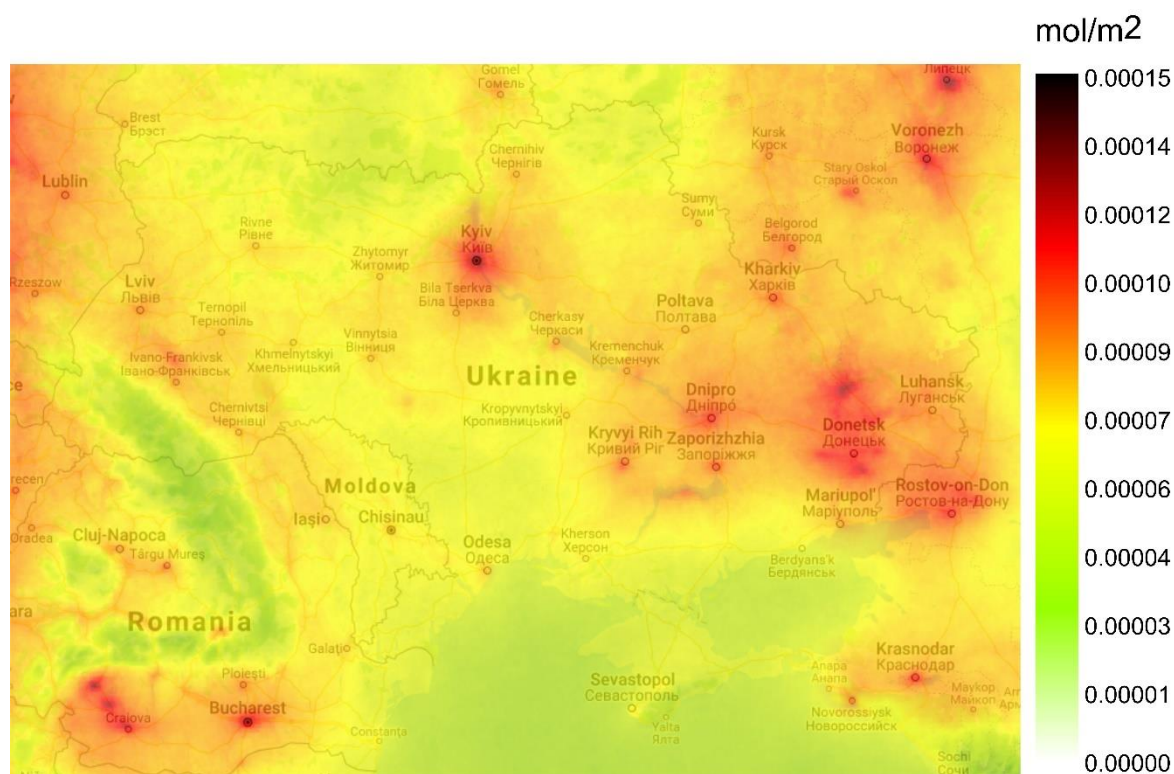


Рис. 1. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту  $\text{NO}_2$  (моль/м<sup>2</sup>) за липень 2018 – червень 2019 рр.

ва відсутні<sup>8,9,10</sup>.

Таким чином, на відміну від європейських міст, де найвищий вміст  $\text{NO}_2$  спостерігається у завантажених автотранспортом містах [20,21], в Україні найбільші перевищення, за винятком Києва, досі спостерігаються у регіонах з потужними промисловими викидами. У ряді міст України, серед яких як завантажені автотранспортом, так і промислові, середні концентрації знаходяться на рівні  $9 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>2</sup>, зокрема у: Харкові, Львові, Донецьку, Дніпрі, Запоріжжі, Одесі, Черкасах, Енергодарі, Кривому Розі, Горішніх Плавнях, Маріуполі, Кам'янському, Ладизині та Бурштині.

Виявлено регіони з мінімальними концентраціями  $\text{NO}_2$ : Кримські та Карпатські гори, територія Полісся на півночі Житомирської, Рівненської, Київської та Чернігівської областей. Найбільша за площею територія із загальним вмістом нижче  $4 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup> охоплена Карпатами (рис. 1).

Період спостережень за  $\text{NO}_2$  складає один рік, таким чином стає можливим проведення

аналізу сезонного та річного ходу за період 2018–2019 рр. Для усіх регіонів території України в теплий сезон року спостерігаються незначні варіації вмісту  $\text{NO}_2$ , тоді як у холодний сезон відбувається різке збільшення розкиду значень (рис. 2).

Період значного розмаху значень  $\text{NO}_2$  у районах віддалених від антропогенних джерел емісії спостерігався виключно у зимові місяці з грудня 2018 р. до лютого 2019 р., коли показники змінювалися в межах від  $1 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup> до  $3 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup> (рис.2а). У промислових містах збільшення варіацій загального вмісту  $\text{NO}_2$  почалося з жовтня 2018 р. та тривало до початку березня 2019 р., при цьому розкид значень значно перевищував чисті райони змінюючись в межах від  $8 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup> до  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>2</sup> (рис.2б).

Особливості річного та сезонного ходу залежать від рівня антропогенної емісії. Для чистих районів характерні мінімуми у зимові місяці та максимуми у літній сезон. У промислових містах, по-перше, різниця між сезонами виражена слабо, по-друге, максимальні значення спостерігаються у холодний сезон року, що повністю узгоджується із результатами попередніх досліджень за даними наземних спостережень [7]. Це пояснюється взаємодією метеорологічних умов, зокрема високою частотою інверсій та низькими температурами, з особливостями емісії під час опалювального сезону та використанням транспорту за низьких температур. Саме така взаємо-

<sup>8</sup> Донбасенерго. Старобешівська ТЕС. URL: <https://de.com.ua/uk/structure-units>

<sup>9</sup> Энергия Донбасса. Старобешевская ТЭС. URL: <https://don.energy/starobeshevskaya-tes>

<sup>10</sup> Метінвест. URL: <https://pipe.metinvestholding.com/ua/press/news/show/7394>

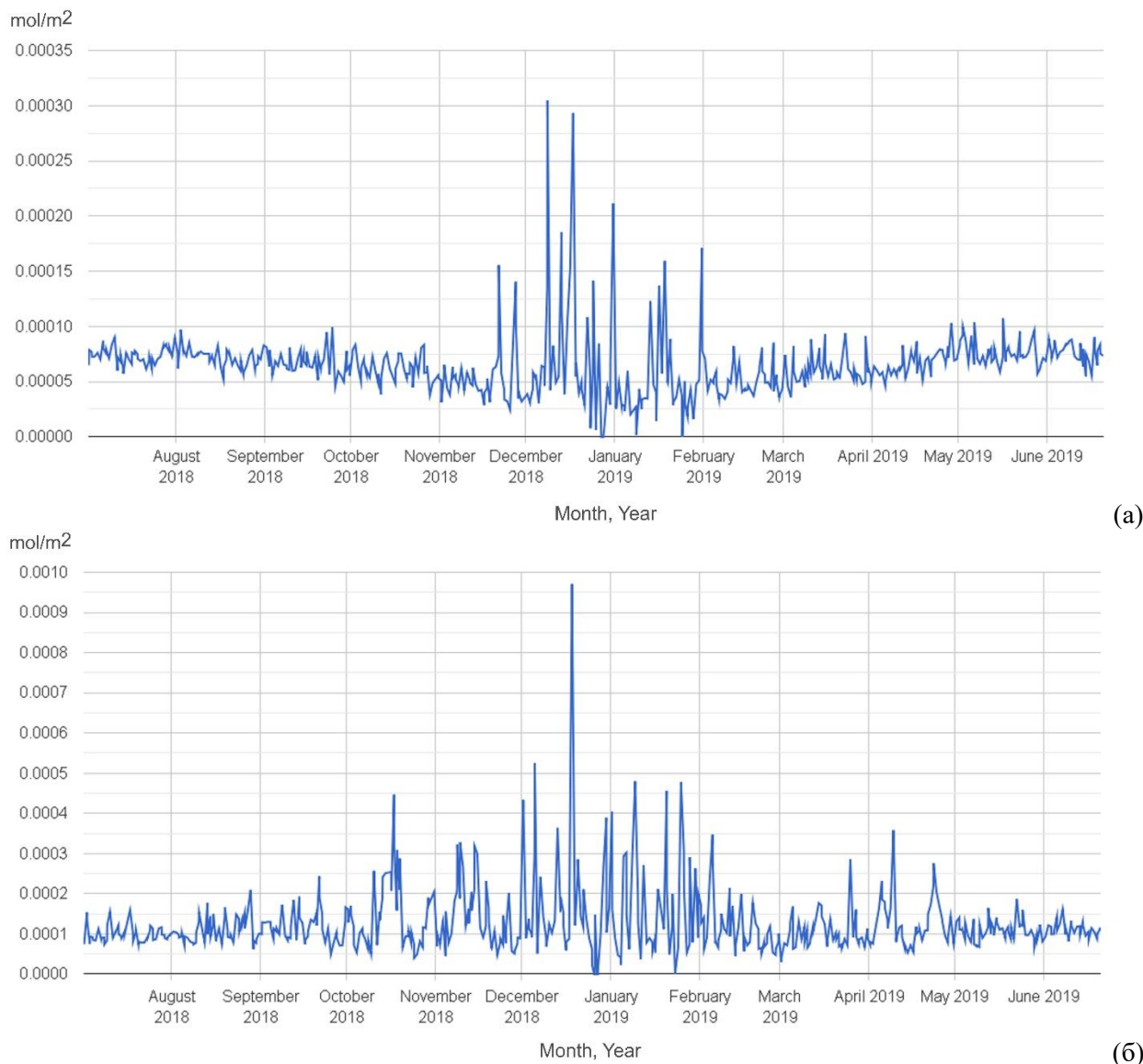


Рис. 2. Зміна середніх значень загального вмісту  $\text{NO}_2$  (моль/м<sup>2</sup>) за липень 2018 – червень 2019 рр. в Українських Карпатах (а) та Києві (б)

дія обумовила значне розповсюдження нехарактерних високих значень загального вмісту  $\text{NO}_2$  над усією територією України. Спалахи завищених значень у зимові місяці в чистих районах (рис. 2а) пов'язані із надходженням забрудненого  $\text{NO}_2$  повітря із промислових районів. Один із таких випадків зображено на рис. 3, коли  $\text{NO}_2$  поширився від районів антропогенної емісії до Карпат в період з 1 до 12 грудня 2018 р.

**Моноксид вуглецю (CO).** Загальний вміст CO в атмосфері характеризується однорідним просторовим розподілом (рис. 4), що пов'язано із кількомісячним часом існування в атмосфері. Таким чином, домішка встигає розповсюдитися на значну відстань від джерел емісії, що ускладнює ідентифікацію найбільш забруднених регіонів на основі осередненої інформації. В той же час, наявність точкових максимумів у полях концентрацій CO свідчить про потужну антропоген-

ну емісію домішки, що суттєво перевищує фоновий вміст.

В цілому на території України загальний вміст CO в стовпі атмосфери знаходиться в межах 0.033–0.035 моль/м<sup>2</sup> (рис. 4). Серед найменш забруднених районів вирізняються тільки гірські масиви Українських Карпат та Кримські гори з концентраціями в межах від 0.025 моль/м<sup>2</sup> до 0.031 моль/м<sup>2</sup>.

Найбільш забрудненими CO в Україні є міста: Маріуполь, Кривий Ріг, Запоріжжя, Дніпро, Кам'янське; а також практично вся берегова лінія Чорного й Азовського морів, де загальний вміст CO в атмосфері перевищує 0.037 моль/м<sup>2</sup>. За листопад 2018 – червень 2019 р. найгірша ситуація склалася у Маріуполі, де загальний вміст CO в атмосфері став одним із найвищих у Європі. Просторове охоплення та роздільна здатність супутника Sentinel-5P дозволяє проаналізувати

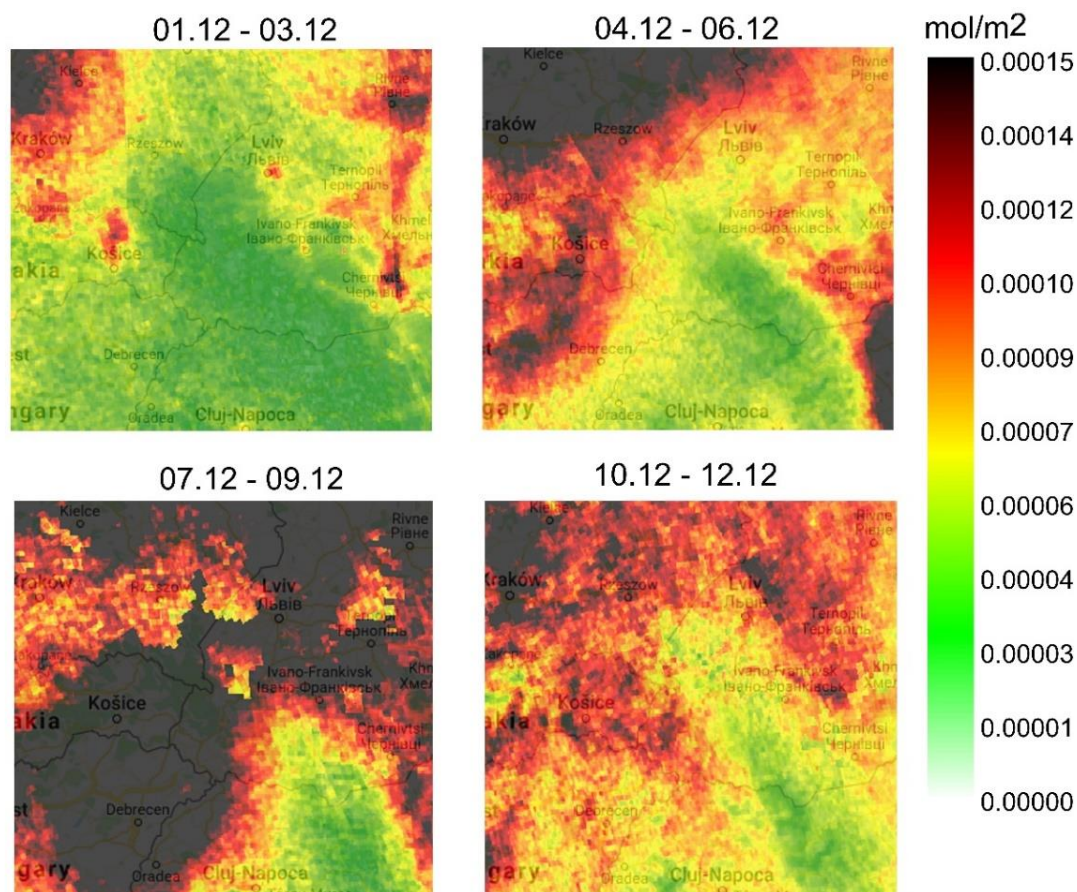


Рис. 3. Поширення високих концентрацій загального вмісту NO<sub>2</sub> (моль/м<sup>2</sup>) із промислових міст до Українських Карпат протягом 1–12 грудня 2018 р.

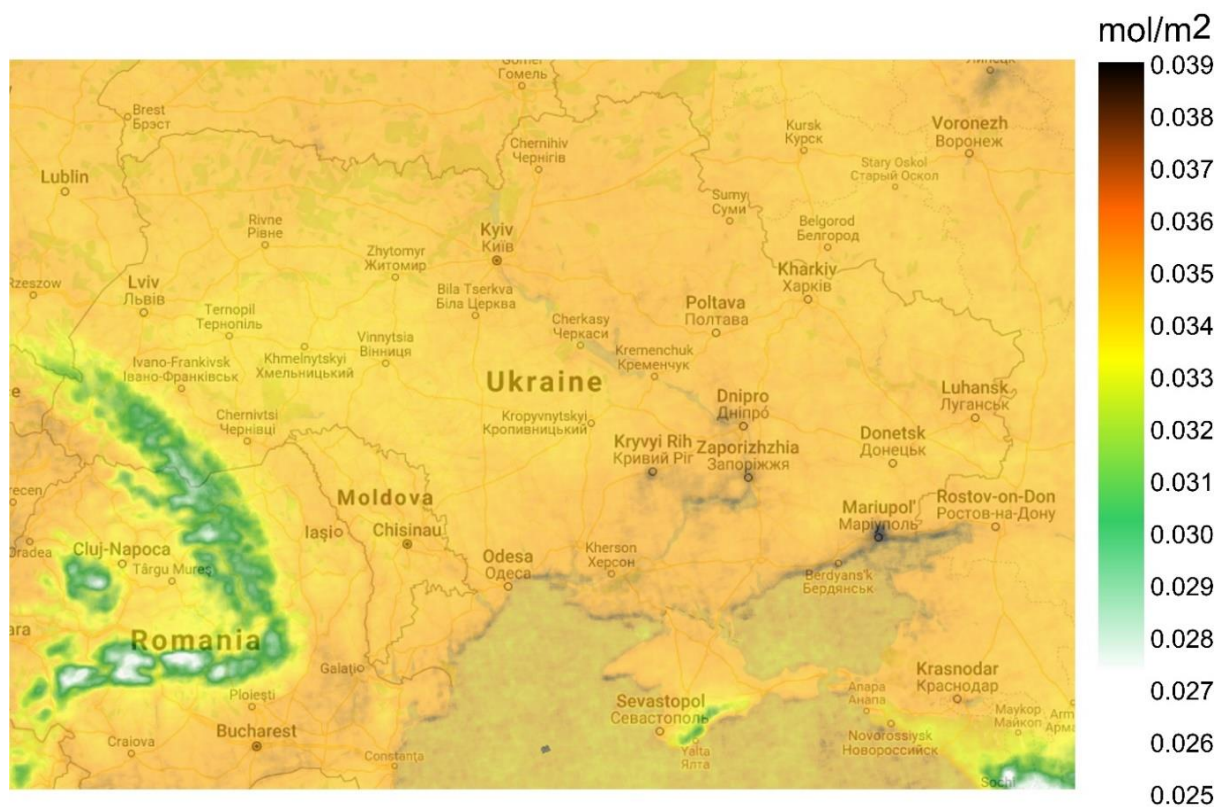


Рис. 4. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту CO (моль/м<sup>2</sup>) за листопад 2018 – червень 2019 рр.

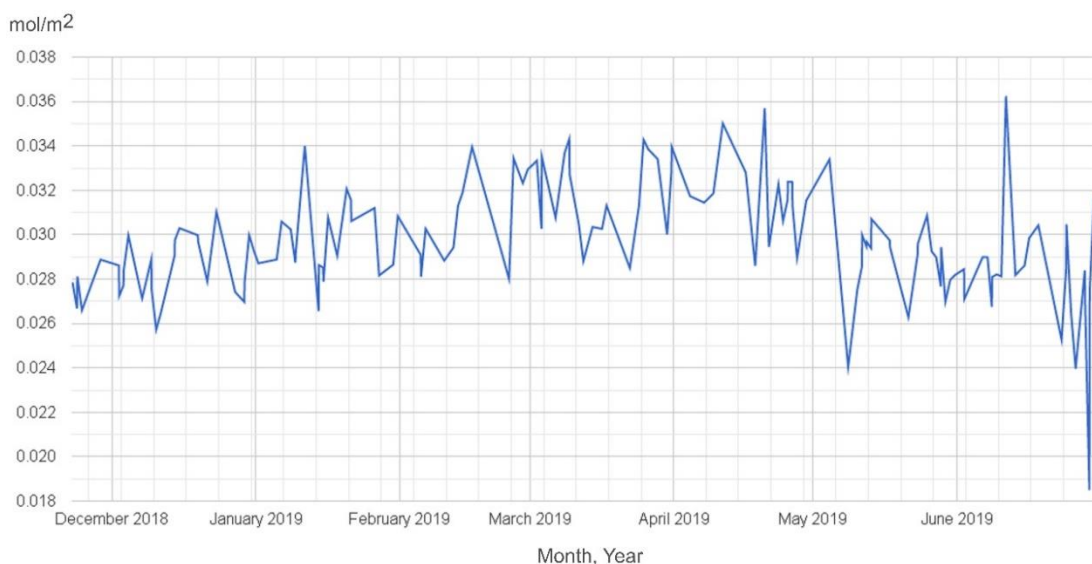
забруднення над морськими акваторіями та отримати уявлення про роль викидів від морського транспорту. Спричинене такими викидами атмосферне забруднення CO поблизу портів та вздовж берегової лінії, зазвичай, перевищує забруднення над материковою частиною України приблизно на 0.01–0.02 моль/м<sup>2</sup>.

Аналіз максимальних значень загального вмісту CO за розглянутий період досліджень дозволив виявити чотири осередки надзвичайно високого надходження домішки в атмосферу, один з яких має природне походження. В період з березня до квітня 2019 р. спостерігалися короткі у часі, проте потужні емісії CO у Кривому Розі, Маріуполі та Запоріжжі, що мають антропогенне походження. Проте, найбільшого розмаху набули емісії CO, спричинені лісовими пожежами на території Білорусі поблизу кордону з Україною, які перекинулися на північну територію Рівненської області у 20-х числах квітня 2019 р.

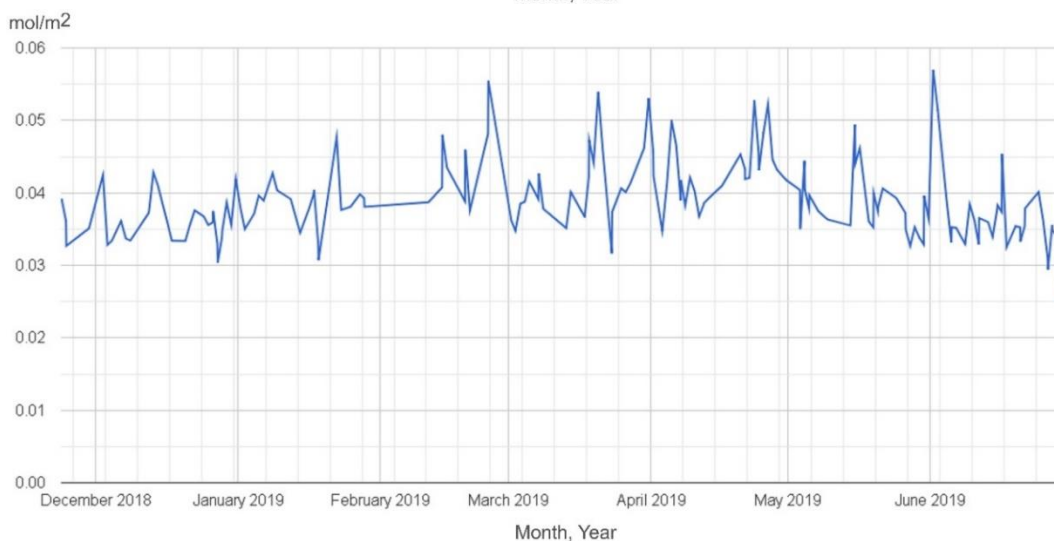
Для часового ходу CO характерні варіації з розмахом від 0.015 моль/м<sup>2</sup> у чистих районах до

0.035 моль/м<sup>2</sup> у найбільш забруднених містах. У березні, квітні та травні 2019 р. загальний вміст CO був вищим ніж у інші місяці (рис. 5), проте різниця є несуттєвою та не дозволяє на таких коротких рядах спостережень говорити про сезонні особливості сформованих концентрацій CO.

**Діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) та формальдегід (HCHO).** На відміну від NO<sub>2</sub> та CO, де спостерігається доволі однорідний просторовий розподіл з чіткою локалізацією максимальних концентрацій, для SO<sub>2</sub> та HCHO просторовий розподіл вкрай неоднорідний (рис. 6), що ускладнює процес виявлення окремих промислових міст зі значною емісією домішок. Більш того, враховуючи похибки вимірювання SO<sub>2</sub> та HCHO [16], надійну оцінку можна отримати тільки у районах із значним перевищенням концентрацій. Таким чином, під час аналізу осереднених даних існує можливість проведення досліджень тільки в межах окремих регіонів за максимумами у просторовому розподілі SO<sub>2</sub> та HCHO.



(a)



(б)

Рис. 5. Зміна середніх значень загального вмісту CO (моль/м<sup>2</sup>) за листопад 2018 – червень 2019 рр. в Українських Карпатах (а) та Маріуполі (б)

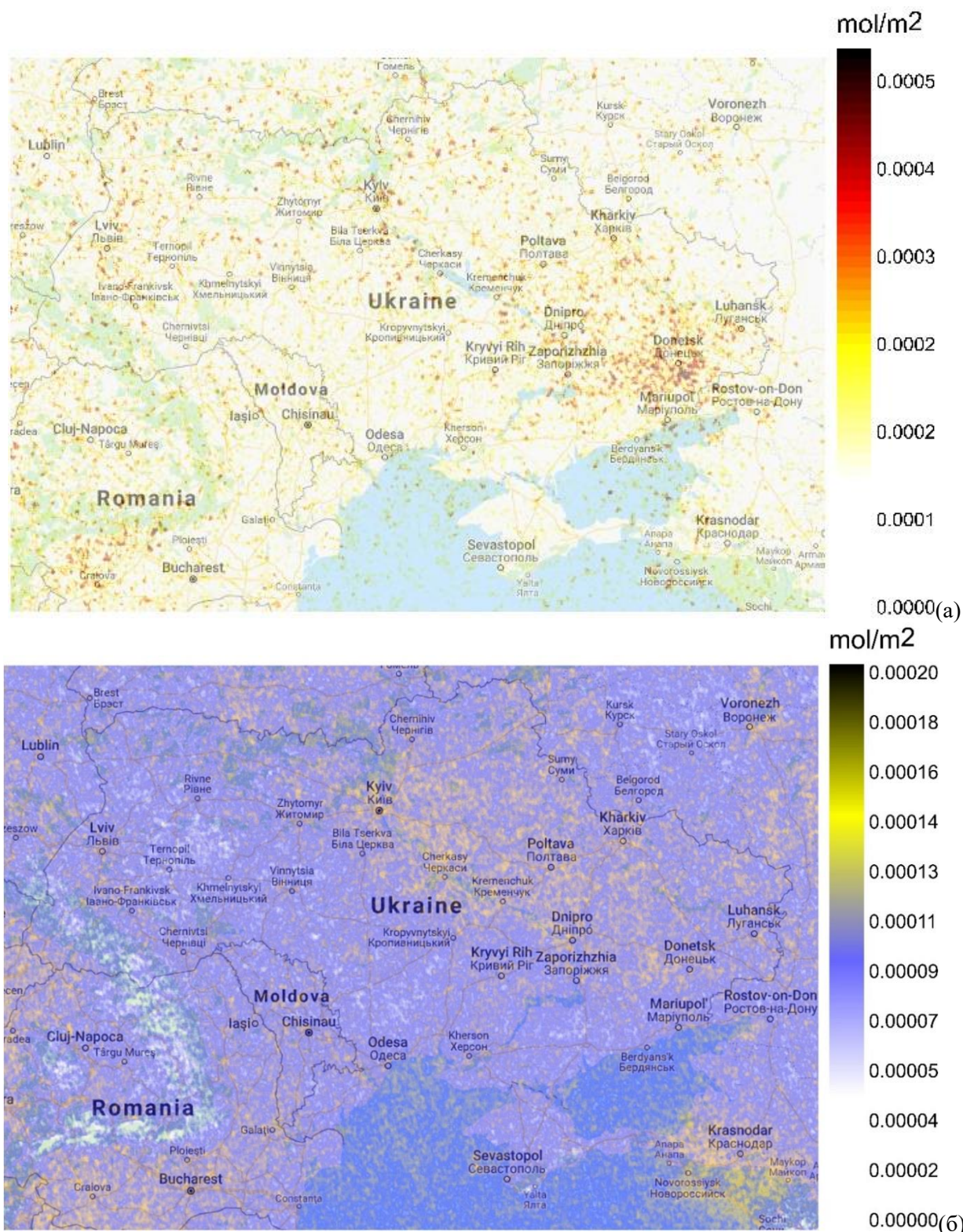


Рис. 6. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту  $\text{SO}_2$  (моль/м<sup>2</sup>) (а) та тропосферного вмісту  $\text{HCHO}$  (моль/м<sup>2</sup>) (б) за листопад 2018 – червень 2019 рр.

На території України є одна локалізація з високою емісією  $\text{SO}_2$  над селищем Новий Світ Донецької області, де загальний вміст за листопад 2018 – червень 2019 рр. перевищує  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>2</sup> (рис.6а). Основним джерелом викидів, як було зазначено вище, у цьому районі є Старобешівська ТЕС. Загалом, над територією України підвищений вміст  $\text{SO}_2$  спостерігається у Донець-

кій, Запорізькій та Дніпропетровській областях. Осереднені значення також мають перевищення у акваторіях Чорного й Азовського морів поблизу морських портів, що також підтверджує роль емісії від морського транспорту.

Аналіз просторового розподілу тропосферного вмісту  $\text{HCHO}$  дозволив виділити чіткий регіон з мінімальними значеннями, що спостеріга-



ються в Карпатах (рис. 6б), а також у північно-західній частині Подільської височини. Очікувані просторові мінімуми концентрацій в Поліссі не виявлено незважаючи на відсутність потужного антропогенного навантаження на хімічний склад атмосфери в цьому регіоні. Причиною цього, найімовірніше, є збільшення внеску природної емісії речовин (зокрема, метану), що беруть участь в хімічних реакціях формування формальдегіду внаслідок високої повторюваності лісових пожеж на півночі України та наявності значної площі заболочених територій. Варто відмітити різницю у концентраціях НСНО між Правобережною та Лівобережною Україною. Регіон із завищеними значеннями охоплює Полтавську, Харківську та Донецьку області, а також Лівобережну частину Київської, Черкаської та Дніпропетровської областей, де вміст у тропосфері перевищує  $1.4 \cdot 10^{-3}$  моль/м<sup>3</sup>.

Сумісний аналіз забруднюючих речовин дозволив виділити особливості забруднення повітря над морськими акваторіями. За осередненими значеннями усього періоду досліджень найвищі концентрації спостерігаються вздовж берегової лінії, а не за основними морськими шляхами, що свідчить про високу роль емісії з туристичних та рибачьких човнів, які, в основному, курсують поблизу берега. Проте, у різні місяці просторовий розподіл забруднення повітря над морськими акваторіями зазнає змін. Так, у зимові місяці важко виявити будь-які закономірності поширення домішок над Чорним та Азовським морем, що цілком узгоджується зі зменшенням судноплавства протягом холодного сезону. В період з лютого до березня починає вирізнятися центральна та південна частина Чорного моря, де концентрації забруднюючих речовин, зазвичай, більші. У цій частині проходять морські шляхи, що з'єднують Грузію, Туреччину та Болгарію. В період з березня до травня найбільш забрудненим стає акваторія вздовж морських шляхів, що ведуть із Чорноморська (Одеська область) на південь. Починаючи з травня, спостерігається підвищений вміст забруднюючих речовин вздовж берегової лінії, при цьому рівень забруднення у портах та віддалених від великих міст районах однаковий, що свідчить саме про викиди численних туристичних та рибачьких човнів під час курортного сезону. На цьому фоні стає практично неможливим виявити забруднення за основними морськими торговими шляхами. Спроби виявити особливості забруднення річкових акваторій не дали результату, так як на річках розташовуються міста з інтенсивними викидами, що перевищують емісію річкового транспорту, а просторова роздільна здатність супутника Sentinel-5P не дозволяє диференціювати емісію з ок-

ремих лінійних джерел на такому фоні забруднення.

Проведені дослідження на основі даних Sentinel-5P дало можливість отримати повну картину щодо просторового розподілу забруднюючих речовин над територією України та охопити територію, де наземні вимірювання відсутні. За результатами аналізу чотирьох домішок виділено найзабрудненіші міста України на сучасному етапі за 2018–2019 рр. Особливого занепокоєння викликає ситуація у Новому Світі, Маріуполі та Слов'янську; більш того надзвичайно забрудненими є Кривий Ріг, Запоріжжя та Дніпро. Вміст забруднюючих речовин у ряді міст хоч і не досягає настільки високих рівнів, проте суттєво перевищує фонові концентрації. Така ситуація спостерігається у Києві, Харкові, Львові, Одесі, Черкасах, Кам'янському, Енергодарі, Бурштині, Донецьку, Краматорську, Харцизьку, Горішніх Плавнях, Ладизині. Поза увагою, на сьогодні, залишається забруднення вздовж берегової лінії Чорного й Азовського морів спричинене викидами морського транспорту. За супутниковими даними стає зрозуміло, що забруднення повітря над морськими акваторіями в Україні потребує детального вивчення та підвищеної уваги з необхідністю проведення хоча б тимчасових наземних вимірювань.

**Обговорення.** Результати проведеного дослідження дозволили актуалізувати інформацію по найбільш забрудненим містам та регіонам України. Як було згадано, основною проблемою наземних даних є неможливість охопити усю територію. Таким чином, стає неможливим виявлення стану забруднення атмосферного повітря та появу/припинення викидів у багатьох промислових містах. Це стало причиною відсутності у раніше проведених дослідженнях різних авторів аналізу вмісту забруднюючих речовин у Новому Світі (Старобешівський район, Донецька область). За даними Sentinel-5P якість атмосферного повітря тут можна вважати однією із найгірших в Україні, особливо за вмістом NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>, що обумовлено викидами потужного стаціонарного джерела у цьому районі – Старобешівської ТЕС. Схожа ситуація спостерігається ще для ряду дуже забруднених промислових міст, серед яких Енергодар, Бурштин, Ладизин та Харцизьк.

Для більшості міст супутникові дані підтверджують проведені раніше дослідження [1-7], зокрема перебування Кривого Рогу, Донецька, Одеси, Львова, Києва, Дніпра, Запоріжжя та ряду інших у списку серед найбільш забруднених міст України.

Проте, порівняння супутникової інформації 2018–2019 рр. у даній роботі з результатами досліджень на основі наземних даних попередніх

років [1,4-7] у містах показало деякі відмінності у результатах, що може свідчити про зміни у джерелах емісії протягом останніх двох років. Так, наприклад, Красноперекоськ та Армянськ, що завжди фігурували як дуже забруднені міста, за 2018–2019 рр. характеризувалися концентраціями близькими до фонових. В той же час, Черкаси можна на сьогодні віднести до списку дуже забруднених міст, хоча до цього місто характеризувалося не настільки високим рівнем забруднення. Наведені відмінності свідчать про необхідність постійних безперервних досліджень та складність довгострокового прогнозування рівнів забруднення на основі історично сформованих вибірок та тенденцій. Подібне прогнозування можливо проводити як ансамблеве за умови залучення різних сценаріїв викидів, серед яких повинні враховуватися умови збільшення, зменшення та відсутності змін у обсягах антропогенної емісії.

Sentinel-5P дозволив поглянути на характер часових змін  $\text{NO}_2$  у найвіддаленіших від антропогенного внеску районах, що дозволило оцінити різницю з сезонними змінами вмісту домішок у містах. Зокрема, повністю підтверджені висновки про залежність сезонного ходу  $\text{NO}_2$  та зсуви фаз у річному ході від рівнів антропогенного навантаження, зроблені до цього лише на основі наземних даних постів у промислових містах, що розташовуються в межах більш чистих та більш забруднених районів [7].

**Висновки.** Використання супутникових даних Sentinel-5P за 2018–2019 рр. дозволили детально оцінити просторовий розподіл вмісту деяких забруднюючих речовин в атмосфері та актуалізувати інформацію щодо міст з найбільшими рівнями забруднення.

Вміст  $\text{NO}_2$  у найзабрудненіших містах та регіонах на порядок перевищує фонові концентрації, досягаючи  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>. Значна антропогенна емісія там зумовлює відсутність зимових мінімумів у річному ході, які є типовими для чистих регіонів. Більш того, взимку спостерігається висока повторюваність перенесення на великі відстані забрудненого діоксидом азоту повітря із великих міст, зумовлюючи спалахи підвищених концентрацій у віддалених від промисловості районах. Вміст  $\text{CO}$ , завдяки кількомісячному часі існування у атмосфері, характеризується однорідним просторовим розподілом з середніми концентраціями в межах 0.033–0.035 моль/м<sup>3</sup>. За розглянутий період чітко простежуються потуж-

ні антропогенні емісії у Маріуполі, Запоріжжі та Кривому Розі, що значно перевищують рівні в інших промислових містах; а також природні емісії від лісових пожеж на Поліссі. Виявлено територію дуже високого вмісту  $\text{SO}_2$ , локалізованої в районі міста Новий Світ Донецької області, з концентраціями вище  $5 \cdot 10^{-4}$  моль/м<sup>3</sup>.

Встановлено, що акваторії Чорного й Азовського морів характеризуються високим рівнем забруднення атмосферного повітря, особливо поблизу берегових ліній, що є результатом викидів морського транспорту. Враховуючи зосередження високих концентрацій вздовж усієї берегової лінії, включаючи віддалені від портів районах, можна стверджувати про значний внесок у рівні забруднення атмосферного повітря каботажними рейсами та рибачькими човнами. Вміст забруднюючих речовин поблизу берегової лінії перевищують середні фонові концентрації материкової України. В окремі місяці перехідних сезонів вдається розрізнити забруднення вздовж основних морських шляхів: в центральній та південній частині Чорного моря у більш холодні місяці та від Чорноморська на південь у більш теплі місяці.

**Перспективи подальших досліджень.** Просторове охоплення Sentinel-5P значно розширило горизонти досліджень стану атмосферного повітря та сприяє розвитку нових підходів у дослідженнях забруднюючих речовин. Для цілей моніторингу, за умов правильної фільтрації статистично ненадійних даних, стало можливим діагностувати тимчасові антропогенні (аварії, незаконні викиди та ін.) та природні (лісові пожежі та ін.) викиди, що відбуваються у місцях не охоплених наземними спостереженнями. Більш того, існують перспективи дослідження сезонної мінливості домішок в різних мезо- та макрокліматичних умовах. Забруднення атмосферного повітря в прибережних районах Чорного й Азовського морів повинно якомога швидше стати об'єктом подальших досліджень, враховуючи знайдені перевищення вмісту домішок та активний розвиток подібних досліджень для інших морських акваторій Європи. Абсолютно новим напрямком, що активно почав розвиватися у світі, проте відсутній в Україні, є поєднання деталізованих супутникових даних вмісту забруднюючих речовин з сучасними методами т.з. «штучного інтелекту», що у майбутньому дозволить дистанційно виявляти викиди від індивідуальних джерел емісії.

#### Література

1. Баштаннік, М.П. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України [Текст] / М.П. Баштаннік, Н.С. Жемера, Є.М. Кіптенко, Т.В. Козленко // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2014. – Вип. 266. – С. 70–93.
2. Лоева, І. Д. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста: методи аналізу, прогнозу, регулювання [Текст] / І.Д. Лоева, О.Г. Владимірова, В.А. Верлан. – К.: КНТ, 2008. – 224 с.

3. Надточій, Л.М. Особливості динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у деяких містах України [Текст] / Л.М. Надточій, М.В. Савенець, М.П. Баитаннік, І.В. Дворецька // Український географічний журнал – 2019. – №1(105). – С. 43–50. [[doi.org/10.15407/ugz2019.01.043](https://doi.org/10.15407/ugz2019.01.043)]
4. Сніжко, С. І. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста [Текст] / С.І. Сніжко, О.Г. Шевченко. – К.: Видавництво географічної літератури "Обрії", 2011. – 297 с.
5. Шевченко, О. Особливості часових змін концентрацій формальдегіду в атмосферному повітрі міст України [Текст] / О. Шевченко, Ю. Яценко, Н. Данілова // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. – 2016. – Вип. 2. – С. 24–29
6. Яценко, Ю. Оцінка сучасного рівня та тенденцій забруднення атмосферного повітря міст України діоксидом азоту [Текст] / Ю. Яценко, О. Шевченко, С. Сніжко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2018. – Вип. 3(82). – С. 87–95. [<https://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>]
7. Savenets, M. NO<sub>2</sub> seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities [Text] / M. Savenets, L. Nadtochii, I. Dvoretzka // *GeoScience Engineering*. – 2018. – Vol. LXIV, No. 4. – P. 29–36. [<https://dx.doi.org/10.2478/gse-2018-0019>]
8. Савенець, М.В. Оцінка невизначеності просторово-часового розподілу забруднюючих речовин міської атмосфери [Текст]: матеріали III міжн. наук.-практ. конф. / М.В. Савенець, Л.М. Надточій // Сучасні проблеми природничих наук: теорія, практика, освітні новації. – Ніжин (Україна), 2018. – С.383–385
9. Baklanov, A. et al. Enviro-HIRLAM online-integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) [Text] / A. Baklanov // *Geosci. Model Dev*. – 2017. – Vol. 10. – P. 2971–2999. [<https://dx.doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>]
10. Berkowicz, R. A simple Model for Urban Background Pollution [Text] / R. Berkowicz // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2000. – Vol. 65. – P. 259-267. [<https://dx.doi.org/10.1023/A:1006466025186>]
11. Gaiotti, D. The Chernobyl nuclear accident <sup>137</sup>Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system [Text] / D. Gaiotti, D. Oshurok, O. Skrynyk // *Atmospheric Pollution Research*. – 2018. – Vol. 9, Is. 3. – P.502-512. [<https://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>]
12. Su-Yin, Tan. *Meteorological Satellite System* [Text] / Su-Yin Tan – Springer, 2014. – 145 p.
13. Putrenko, V. The use of remote sensing data for modelling air quality in the cities [Електронний ресурс] / V. Putrenko, N. Pashynsk. – Режим доступу: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-5-W1/57/2017/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.pdf> (Дата звернення: 11.09.2019)
14. Sentinel-5P. ESA missions [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p> (Дата звернення: 02.07.2019)
15. Sentinel-5P. First data release [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus\\_Sentinel-5P\\_releases\\_first\\_data](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus_Sentinel-5P_releases_first_data) (Дата звернення: 02.07.2019)
16. Sentinel-5P. Products and Algorithms [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms> (Дата звернення: 02.07.2019)
17. Sentinel-5P hub [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Дата звернення: 23.07.2019)
18. Google Earth Engine platform [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://earthengine.google.com> (Режим доступу: 04.07.2019)
19. Harpconvert command line tool [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://cdn.rawgit.com/stcorp/harp/master/doc/html/harpconvert.html> (Дата звернення: 04.07.2019)
20. Kurtenbach, R. Primary NO<sub>2</sub> emissions and their impact on air quality in traffic environments in Germany / R. Kurtenbach, J. Kleffmann, A. Niedojadlo, et al. // *Environ Sci Eur*. – 2012. – Vol. 24. [<https://dx.doi.org/10.1186/2190-4715-24-21>]
21. Brussels Environment. State of the Environment. Report 2011–2014 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.environment.brussels/state-environment/report-2011-2014/air/air-quality-nitrogen-dioxide-concentrations> (Дата звернення: 04.07.2019)

**Внесок авторів:** всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 551.510.42:551.507.362

*Mykhailo Savenets,*

PhD (Geography), Senior Researcher, Department of Atmosphere Monitoring,  
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU  
37 Nauki Av., Kyiv, 03028, Ukraine,

e-mail: [savenetsm@gmail.com](mailto:savenetsm@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>;

*Iryna Dvoretzka,*

PhD (Geography), Senior Researcher, Head of Laboratory of the Atmosphere Air Monitoring,  
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,

e-mail: [dvoretzka@uhmi.org.ua](mailto:dvoretzka@uhmi.org.ua), <https://orcid.org/0000-0002-3625-4630>;

*Liudmyla Nadtochii,*

Researcher, Department of Atmosphere Monitoring,  
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,

e-mail: [onoslyuda@uhmi.org.ua](mailto:onoslyuda@uhmi.org.ua), <https://orcid.org/0000-0003-3038-5960>

## CURRENT STATE OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE BASED ON SENTINEL-5P SATELLITE DATA

**Introduction.** Industrial development and increasing traffic emissions cause air quality problems. The most accurate for air pollution analysis are ground-based data; however, it is very limited in space. Modeling could solve this problem, but huge amount of input information and limits of computational power make it difficult to analyze big territories with high resolution. Sentinel-5P satellite with TROPOMI instrument nowadays gives opportunities to monitor the air pollution with good spatial resolution. The **purpose of the study** is to analyse nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide and formaldehyde spatial and temporal distribution over Ukraine and Black Sea and Azov Sea.

**Methods and raw data.** There were selected Sentinel-5P data of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and HCHO for the period from first data release in 2018 to June, 2019. Data processing implemented in Google Earth Engine using JavaScript programming in The Earth Engine Code Editor.

**Results and discussion.** Joint analysis of NO<sub>2</sub> tropospheric, stratospheric and total columns showed the prevailing of tropospheric NO<sub>2</sub> content and therefore crucial role of anthropogenic emission sources. While background NO<sub>2</sub> total column varies from  $4 \cdot 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup> to  $7 \cdot 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup>, in the most polluted cities content exceeds  $1 \cdot 10^{-4}$  mol/m<sup>2</sup>. The highest values are observed in Kyiv and industrial cities in Donbas region. Some of them are situated in the area of Joint Forces Operation outside the demarcation line. Sentinel-5P data catch the large emissions from the local industries; however, no official confirmations about production volume are available. NO<sub>2</sub> dispersion increase during winter with the values range from  $1 \cdot 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup> to  $3 \cdot 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup> over clean territories and  $8 \cdot 10^{-5}$  mol/m<sup>2</sup> to  $1 \cdot 10^{-3}$  mol/m<sup>2</sup> in industrial cities. Seasonal maximal observed during warm period in unpolluted regions and during winter in the cities. Cold seasonal NO<sub>2</sub> content outbreaks in the mountains are the result of its transportation from industrial cities.

Spatial distribution of CO total column over Ukraine is rather homogeneous because of CO lifetime in the atmosphere up to several months. It could be transported on the long distances, which makes identification of polluted regions difficult. However, several cities with maximal average values of more than 0.037 mol/m<sup>2</sup> prove the existence of extreme anthropogenic emissions. Overall background CO contents vary within 0.033–0.035 mol/m<sup>2</sup>. Coastal regions of the Black Sea and Azov Sea are more polluted by CO compared to the mainland, which could be the consequences of ships emissions. Temporal analysis of CO total column found 4 powerful emissions: three of them are anthropogenic in industrial cities and one is natural, connected with forest fires in Belarus and northern part of Rivne region in April, 2019.

There is one location with huge SO<sub>2</sub> emission in Ukraine, observed in Novyi Svit (Donetsk region) outside the demarcation line of Joint Forces Operation, which corresponds to Starobeshivska thermal power station. In general, higher SO<sub>2</sub> contents are observed over Donetsk, Zaporizhia and Dnipro regions; also over the Black Sea and Azov Sea. For HCHO spatial distribution minimal values are typical for the Carpathians. It is well seen that SO<sub>2</sub> content are higher in the Southern part of Ukraine than in the Western part.

The research finds regularities in spatial distribution of pollutants over the sea area. During cold season higher concentrations could be observed over the main merchant vessels tracks in the Black Sea. In summer months, which coincide with the main tourist season, most polluted are shoreline area because of emissions from cabotage and fishing vessels.

The study updates information about most polluted cities in Ukraine, especially in the regions with absence of ground-based measurements. Some of them are mentioned for the first time among other research.

Air quality analysis in many industrial cities significantly changed over the last two years. It shows difficulties of long-term pollution forecast and scenarios based on historical data and observed trends. It is recommended to use ensemble modelling for this purpose with scenarios of emission reduction, increasing and temporal stability. Sentinel-5P data confirm the conclusions of previous research about dependence of NO<sub>2</sub> annual cycle and seasonality phases shift from the level of anthropogenic load.

**Prospects for further research.** Sentinel-5P spatial resolution expands the horizons for air pollution research. The most relevant are monitoring of short-term anthropogenic and natural emissions, pollutants' seasonality changes in different macroclimatic conditions, research of ships emissions in Black Sea and Azov Sea, combination of satellite air pollution data with methods of "artificial intelligence" for individual emissions detection.

**Keywords:** air pollution, satellite, pollutants, anthropogenic emission, spatial distribution, industrial cities, sea area.

#### References

1. Bashtannik, M.P., Zhemera, N.S., Kiptenko, E.N., Kozlenko, T.V. (2014). Stan zabrudnennia atmosfernogo povitria nad terytoryeyu Ukrainy. [The state of atmospheric air pollution over Ukraine]. Naukovi pratsi UkrNDGMI, 266, 70-93
2. Loyeva, I.D., Vladymyrova, O.G., Verlan, V.A. (2008). Otsinka stanu zabrudnennia atmosfernogo povitria velykogo mista: metody analizu, prognozu, reguliuvannia. [Estimation of the state of air atmosphere pollution of the big city (methods of analysis, forecast, regulations)]. Kyiv, Ukraine: KNT, 220.
3. Nadtochii, L.M., Savenets, M.V., Bashtannik, M.P., Dvoretzka, I.V. (2019). Osoblyvosti dynamiki zabrudnennia atmosfernogo povitria pylom u deyakyh mistah Ukrainy. [The features of dust air-pollution dynamics in certain Ukrainian cities]. Ukrainian Geographical Journal, 1(105), 43-50 [<https://dx.doi.org/10.15407/ugz2019.01.043>]
4. Snizhko, S.I., Shevchenko, O.H. (2011). Urbometeorologichni aspekty zabrudnennia velykogo mista. [Meteorological Aspects of Air Pollution of Urban Areas]. Kyiv, Ukraine: Obrii, 297.
5. Shevchenko, O., Yatsenko, Y., Danilova, N. (2016). Osoblyvosti chasovyh zmin koncentraciy formaldehidu v atmosfernomu povitri mist Ukrainy. [Features of temporal changes of formaldehyde in the air of Ukrainian cities]. Visnyk Kyivskogo Natsionalnogo Universytetu. Viiskovo-spetsialni nauky, 2, 24-29.
6. Yatsenko, Y., Shevchenko, O., Snizhko, S. (2018). Otsinka suchasnogo ravnia ta tendencii zabrudnennia atmosfernogo povitria mist Ukrainy dioksidom azotu. [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, 3(82), 87-95 [<https://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.82.11>]
7. Savenets, M., Nadtochii, L., Dvoretzka, I. (2018). NO<sub>2</sub> seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. GeoScience Engineering, LXIV, 4, 29–36. [<https://dx.doi.org/10.2478/gse-2018-0019>]
8. Savenets, M.V., Nadtochii, L.M. (2018). Otsinka neviznachenosti prostorovo-chasovogo rozpodilu zabrudnuyuchykh rehovyn miskoi atmosfery. [The estimation of uncertainties in spatio-temporal distribution of pollutants in the urban atmosphere]. Proceedings of III International conference. Suchasni problem pryrodnychkh nauk: teoriya, praktyka, osviti novatsii. Nizhyn (Ukraine), 383–385
9. Baklanov, A. et al (2017). Enviro-HIRLAM online-integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). Geosci. Model Dev., 10, 2971–2999. [<https://dx.doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>]
10. Berkowicz, R. (2000). A simple Model for Urban Background Pollution. Environmental Monitoring and Assessment. 65, 259-267. [<https://dx.doi.org/10.1023/A:1006466025186>]
11. Giaiotti, D., Oshurok, D., Skrynyk, O. (2018). The Chernobyl nuclear accident <sup>137</sup>Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. Atmospheric Pollution Research. Vol. 9, Is. 3, 502-512. [<https://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>]
12. Su-Yin, Tan (2014). Meteorological Satellite System. Springer, 145.
13. Putrenko, V., Pashynska, N. The use of remote sensing data for modelling air quality in the cities. Available at: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-5-W1/57/2017/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.pdf>
14. Sentinel-5P. ESA missions. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
15. Sentinel-5P. First data release. Available at: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus\\_Sentinel-5P\\_releases\\_first\\_data](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Copernicus_Sentinel-5P_releases_first_data)
16. Sentinel-5P. Products and Algorithms. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms>
17. Sentinel-5P hub. Available at: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>
18. Google Earth Engine platform. Available at: <https://earthengine.google.com>
19. Harpconvert command line tool. Available at: <https://cdn.rawgit.com/stcorp/harp/master/doc/html/harpconvert.html>
20. Kurtenbach, R., Kleffmann, J., Niedojadlo, A., et al (2012). Primary NO<sub>2</sub> emissions and their impact on air quality in traffic environments in Germany. Environ Sci Eur. 24 [<https://dx.doi.org/10.1186/2190-4715-24-21>]
21. Brussels Environment. State of the Environment. Report 2011–2014 Available at: <https://www.environment.brussels/state-environment/report-2011-2014/air/air-quality-nitrogen-dioxide-concentrations>