

## САВЕНЕЦЬ

**Михайло Валерійович** –  
кандидат географічних наук,  
старший науковий співробітник  
Українського  
гідрометеорологічного інституту  
ДСНС України та НАН України

## ОСАДЧИЙ

**Володимир Іванович** –  
член-кореспондент НАН  
України, директор Українського  
гідрометеорологічного інституту  
ДСНС України та НАН України

## ОРЕЩЕНКО

**Андрій Васильович** –  
кандидат географічних наук,  
старший науковий співробітник  
Українського  
гідрометеорологічного інституту  
ДСНС України та НАН України

## МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ З ДЕТАЛІЗАЦІЄЮ ДЛЯ МІСТ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКА SENTINEL-5P

*На основі даних супутникових спостережень Sentinel-5P розроблено методи оперативного моніторингу якості атмосферного повітря над територією України з деталізацією над окремими містами. Автоматизоване оброблення даних здійснюється щодня для діоксиду азоту ( $NO_2$ ), монооксиду вуглецю ( $CO$ ), формальдегіду ( $HCHO$ ), діоксиду сірки ( $SO_2$ ) та загального вмісту озону ( $O_3$ ) приблизно через 3 години після зондування території України. Наведено опис процедури створення файлів даних третього рівня архівації з прив'язкою до регулярної координатної сітки та з фільтруванням статистично ненадійних даних. Для аналізу вмісту хімічних складових над окремими містами розроблено та реалізовано відповідні методи деталізації. Описано особливості інтерпретації супутникових даних за хімічними складовими атмосферного повітря, наголошено на типових причинах неправильної інтерпретації та хибних висновків щодо якості атмосферного повітря, які виникають під час аналізу за даними супутникових спостережень.*

**Ключові слова:** хімічні складові, якість атмосферного повітря, моніторинг, Sentinel-5P, супутникові спостереження.

Однією з найактуальніших проблем сьогодення, яка останнім часом постійно перебуває у фокусі суспільної уваги, є проблема забруднення атмосферного повітря, що спонукає людство шукати максимально ефективні та економічно вигідні шляхи зменшення шкідливих викидів. Потужним важелем впливу, який значно пришвидшує процес подолання проблеми незадовільної якості атмосферного повітря, є розвиток методів моніторингу. Велику роль при цьому відіграє супутникове зондування, оскільки цей метод має широке просторове охоплення. Стрімкий розвиток методів дистанційного моніторингу приводить до дедалі ефективнішої ідентифікації джерел промислової емісії забруднюючих речовин та сприяє поліпшенню планування розвитку міст з метою зменшення негативного впливу викидів від пересувних джерел.

Великим кроком уперед став запуск наприкінці 2017 р. супутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P), оснащеного приладом TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) [1]. Цей спектрометр дозволяє здійснювати вимірювання в ультрафіолетовій, видимій, ближній і короткохвильовій інфрачервоних ділянках спектра, що дає можливість значно поліпшити моніторинг якості атмосферного повітря у двох аспектах. По-перше, використання цього приладу істотно підвищує просторову деталізацію супутникового зондування, що сягає значень  $7 \times 3,5$  км. По-друге, збільшення просторової роздільної здатності не впливає на щоденне охоплення території планети, яке забезпечує щодобовий моніторинг.

Після певного часу перебування супутника Sentinel-5P на орбіті стало зрозумілим, що неузгодженість даних TROPOMI зовсім не перешкоджає проведенню якісного аналізу просторового розподілу забруднюючих речовин [2]. Інформація з Sentinel-5P дозволила з високою надійністю виявляти джерела викидів забруднюючих речовин у віддалених регіонах [3]. Тому висока просторова роздільна здатність TROPOMI стала однією з головних його переваг і зумовила створення цілої низки сервісів та додатків [4, 5].

У різних країнах Sentinel-5P зарекомендував себе як надійний допоміжний інструмент проведення аналізу та моніторингу якості атмосферного повітря [6–10]. Дані TROPOMI значно розширили можливості реаналізу хімічних складових атмосфери [11], який використовують не лише для інформування громадськості щодо стану забруднення, а й з метою отримання вхідної інформації для низки хіміко-метеорологічних моделей. Результати нещодавніх досліджень свідчать, що використання даних Sentinel-5P дає змогу значно підвищити ефективність довгострокового планування щодо поліпшення якості атмосферного повітря і може стати одним з ключових джерел інформації для прийняття управлінських рішень, а також дозволить аналізувати вміст хімічних складових у межах міст [9]. Широкі можливості відкриваються і для ідентифікації джерел викидів [12].

Дані Sentinel-5P підтвердили свій потужний потенціал у процесі їх застосування для аналізу актуального стану забруднення атмосферного повітря на території України [13]. Під час лісових пожеж у квітні 2020 р. оперативна інформація щодо вмісту діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) та монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) дала можливість проаналізувати наслідки емісії продуктів горіння [14] та щодня надавати необхідні дані для прийняття рішень Державною службою України з надзвичайних ситуацій.

З огляду на позитивний досвід використання даних Sentinel-5P для території України постало нове завдання: розробити методи щоденного моніторингу, який можна було б здійснювати в автоматичному режимі з можливістю деталізації вмісту хімічних складових для окремих міст на основі даних супутника Sentinel-5P.

**Вихідні дані супутника Sentinel-5P.** Дані супутника Sentinel-5P надаються у вигляді різних рівнів архівації, які відповідають різним стадіям оброблення даних зондування [15]. Найнижчий (нульовий) рівень архівації містить дані, отримані безпосередньо з чотирьох спектрометрів. За цими даними в подальшому обчислюють результати атмосферного зондування та проводять калібрування. Однак дані нульового рівня архівації не призначені для загального користування.

Перший рівень архівації містить відкалібровані дані випромінювання на верхній межі атмосфери для восьми спектральних діапазонів: 270–300 нм; 300–320 нм; 320–405 нм; 405–500 нм; 675–725 нм; 725–775 нм; 2305–2345 нм та 2345–2385 нм [16], а також відкалібровані дані сонячного випромінювання у спектрі 270–775 та 2305–2385 нм. Перший рівень архівації відкритий для загального користування.

Дані другого рівня архівації — це безпосередньо інформація щодо вмісту хімічних складових в атмосферному повітрі. На цьому рівні наведено дані щодо загального та тропосферного озону ( $\text{O}_3$ ), діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ), формальдегіду ( $\text{HCHO}$ ), а також інформацію щодо хмарності та вмісту

аерозолі [16]. У розроблених нами методах моніторингу якості атмосферного повітря на території України використано саме дані другого рівня архівації.

Серед даних другого рівня архівації для проведення моніторингу було обрано дані щодо  $\text{NO}_2$  (моль/м<sup>2</sup>),  $\text{CO}$  (моль/м<sup>2</sup>),  $\text{SO}_2$  (моль/м<sup>2</sup>),  $\text{НСНО}$  (моль/м<sup>2</sup>),  $\text{O}_3$  (моль/м<sup>2</sup>; з подальшим переведенням в одиниці Добсона) та хмарності (частка хмарності у безрозмірних одиницях). Проте кожному із зазначених параметрів надано різний пріоритет оброблення, що пов'язано з метою їх використання, точністю вимірювань, а також з обсягом «корисної» інформації, яку можна отримати від цих параметрів. Першочерговий пріоритет оброблення належить даним щодо  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  та хмарності, оскільки вплив переважної більшості джерел викидів під час супутникового зондування можна діагностувати за даними  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$  [17, 18]. Більш того, їх співвідношення може опосередковано давати інформацію про тип палива, згорання якого сформувало високі рівні забруднення атмосферного повітря [19]. Інформацію щодо хмарності використовують насамперед для фільтрування ненадійних даних за кожною з хімічних складових. Найвищий пріоритет оброблення даних щодо  $\text{NO}_2$  і  $\text{CO}$  дозволяє отримувати результат і надсилати користувачам відповідні файли даних та/або картографічні матеріали ще до того, як система завершить повне оброблення всіх завантажених даних.

Другими за пріоритетністю є дані щодо  $\text{SO}_2$  та  $\text{НСНО}$ , оскільки з точки зору супутникового зондування вони дають менше інформації про актуальний стан забруднення атмосферного повітря і потенційні джерела викидів. Крім того, якщо значення цих параметрів близькі до фонових рівнів, точність оперативних даних є досить низькою. Тому перш ніж представляти результати на основі даних щодо  $\text{SO}_2$  та  $\text{НСНО}$ , доцільно, щоб компетентні фахівці провели попередній аналіз з метою уникнення можливих хибних висновків з боку користувачів.

Супутникові спостереження за вмістом озону в атмосферному повітрі використовують переважно для моніторингу стану озонового

шару. Для території України оперативне отримання даних щодо  $\text{O}_3$  актуальне в літній сезон у зв'язку з необхідністю моніторингу та прогнозування рівня ультрафіолетового опромінення. Інформація щодо рівня ультрафіолетового опромінення потрібна для визначення часу безпечного перебування людей під відкритим сонцем, особливо тих, хто засмагає. Взимку через незначне надходження сонячної радіації до земної поверхні та сезонне підвищення загального вмісту  $\text{O}_3$  в атмосфері відпадає необхідність проведення оперативного моніторингу озону. Для вирішення наукових завдань доцільніше мати режимні, а не оперативні дані. Тому параметру щодо вмісту  $\text{O}_3$  надано найнижчий пріоритет оброблення з можливістю його змінення на першочерговий у літній сезон.

Дані супутника Sentinel-5P представлено у вигляді або режимних (offline), або близьких до реального часу (near-real time). Режимні дані точніші, проте надходять пізніше, що часто унеможливорює оперативний аналіз високих рівнів забруднення. Тому система моніторингу працює з близькими до реального часу даними. Вони стають доступними для завантаження та оброблення впродовж 2,5–3 годин після зондування. Оскільки Sentinel-5P пролітає над територією України у проміжок між 12:30 і 14:00 за місцевим часом, розроблена система моніторингу починає свою роботу щодня о 16:00.

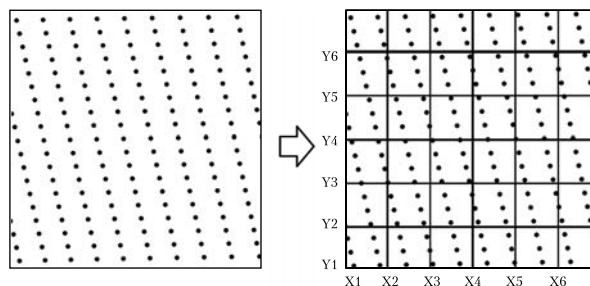
Просторову роздільну здатність даних Sentinel-5P поліпшено з  $7 \times 3,5$  км до  $5,5 \times 3,5$  км (від 6 червня 2019 р.) [20]. У розроблених нами методах моніторингу якості атмосферного повітря, описаних у цій статті, використано вхідну просторову роздільну здатність, близьку до  $5,5 \times 3,5$  км. Однак слід зазначити, що координати пікселів день у день змінюються. Це не становить проблеми для оцінювання стану атмосферного повітря на конкретну дату, проте унеможливорює об'єктивне порівняння даних для різних днів та отримання часових рядів супутникових спостережень у точці. Тому одним з перших кроків у роботі з супутниковими даними є їх прив'язка до стандартизованої регулярної сітки спостережень (процедуру описано нижче).

Дані у режимі, близькому до реального часу, надходять окремими блоками, для кожного з яких формується свій файл. З огляду на досить велику площу території України для повного її покриття надходить від 2 до 5 таких файлів залежно від дня зондування.

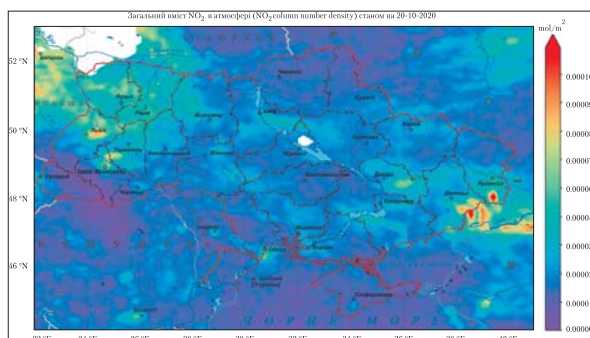
**Отримання й оброблення вихідних даних для території України в режимі, близькому до реального часу.** Першим етапом роботи системи моніторингу якості атмосферного повітря для території України є отримання списку наявних файлів для завантаження. На відміну від багатьох інших супутників, файли Sentinel-5 не містять у своїй назві ознак, за якими можна відразу ідентифікувати їх належність до конкретного дня чи часу зондування. Назви файлів Sentinel-5P складаються з 32-значного ідентифікатора UUID (Universally unique identifier), що являє собою згенерований цифро-буквенний код. Тому спочатку потрібно отримати UUID файлу, для чого система виконує відповідний запит. Саме з цього запиту і розпочинається о 16:00 робота системи моніторингу якості атмосферного повітря.

Запит містить певні обмеження. Максимальна кількість файлів у списку дорівнює 50, і вони впорядковані за часом надходження. Ускладнює запит розділення даних на окремі полігони та необхідність відображення доступних файлів для шести параметрів: газових складових та хмарності. Тому некоректно зроблений запит може не виявити необхідних файлів, навіть якщо вони є у хабі Sentinel-5P. Звичайно, можна було б реалізувати 6 окремих запитів для кожного з параметрів, проте це уповільнить процес оброблення. Запит виконують за певною ознакою, наприклад часом надходження файлу до хабу, назвою продукту (комбінація ідентифікаторів хімічної складової та рівня архівації), координатами полігону тощо. У розробленій нами системі реалізовано три можливі види запиту: за часом надходження файлів, за часом зондування та за назвою продукту, але в процесі роботи з'ясувалося, що оптимальним варіантом є запит за часом зондування території України.

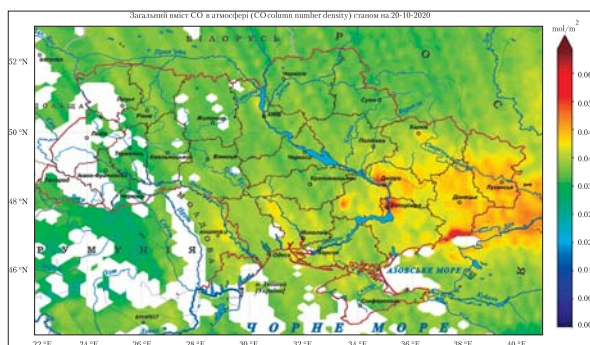
З отриманого списку файлів програмні модулі зчитують усі необхідні UUID, що дає змо-



**Рис. 1.** Прив'язка супутникових даних до стандартизованої регулярної сітки



**Рис. 2.** Приклад картосхеми загального вмісту  $\text{NO}_2$  в атмосфері



**Рис. 3.** Приклад картосхеми загального вмісту CO в атмосфері

гу перейти до безпосереднього завантаження даних Sentinel-5P. Завантаження файлів, обсягом від 0,5 до 1,0 ГБ, є найбільш тривалим етапом роботи системи, який займає від 15 до 30 хв.

Оброблення даних починається з прив'язки до стандартизованої регулярної сітки. По-

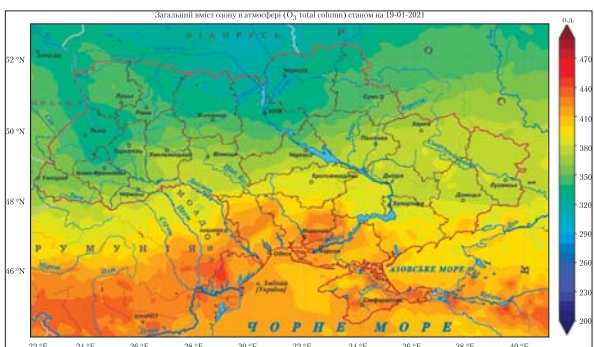




**Рис. 4.** Приклад картосхеми загального вмісту НСНО в атмосфері



**Рис. 5.** Приклад картосхеми загального вмісту SO<sub>2</sub> в атмосфері



**Рис. 6.** Приклад картосхеми загального вмісту O<sub>3</sub> в атмосфері

перше, це дозволяє щодня приводити дані до однакових географічних координат (як уже зазначалося вище, координати пікселів Sentinel-5P день у день змінюються) та порівнювати між собою спостереження в одних і тих самих

точках за будь-який період часу. По-друге, прив'язка дає змогу сформувати безперервні часові ряди спостережень та архівувати їх. Надалі ці часові ряди можна використовувати для статистичного аналізу. У процесі прив'язки осереднюють усі пікселі, що потрапляють до заданої у програмі регулярної сітки, і обчислюють середній вміст хімічної складової у квадраті з координатами  $[X_i Y_i, X_{i+1} Y_i, X_i Y_{i+1}, X_{i+1} Y_{i+1}]$  (рис. 1). Для території України розмірами квадрату за широтою та довготою обрано  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ .

Під час прив'язки одразу проводять процедуру фільтрації ненадійних даних супутникових спостережень з урахуванням інформації щодо хмарності. Для кожного пікселя визначають показник індексу якості (data quality value). Незважаючи на те, що не рекомендовано використовувати дані, індекс якості яких менший за 0,5 [21], для підвищення надійності моніторингу розроблена нами система відфільтровує як ненадійні всі значення, менші за 0,75. У результаті створюються нові файли у форматі netCDF, які можна вважати продуктом третього рівня архівації супутникових даних, адже він містить координатно прив'язані, статистично надійні та виокремлені виключно для території України дані. Для подальшого архівування з netCDF-файлу до текстових файлів експортують тільки дані широти, довготи та загального вмісту хімічної складової, що дає змогу значно зменшити об'єм кожного архівного файлу: з 30–40 Мб до 500–700 Кб.

Одразу після створення архівних файлів відбувається візуалізація просторового розподілу хімічних складових над територією України, яку реалізовано за допомогою мови Python з використанням basemap. Там, де супутникові дані було відфільтровано через їхню низьку якість, на картосхемі залишають незафарбовані поля. Результатом візуалізації є картосхеми просторового розподілу NO<sub>2</sub>, CO, HCHO, SO<sub>2</sub> і O<sub>3</sub>, які зберігають та архівують у вигляді рисунків. Приклади картосхем наведено на рис. 2–6.

На останньому етапі система автоматично відправляє картосхеми (зокрема, деталізовані для міст, як описано нижче) або файли з обробленими для території України даними. На-

разі автоматична розсилка відбувається через електронну пошту, проте в системі закладено можливість передачі файлів й іншими каналами зв'язку (Telegram, ftp тощо).

**Деталізація даних до масштабу окремих міст.** Дані для території України відображають картину реального стану атмосферного повітря, вказують на території з максимальним вмістом різних складових, дають уявлення про ступінь перевищення фонових концентрацій на віддалі від великих міст та промислових районів. Крім того, вони дають можливість діагностувати емісії від природних пожеж, техногенних аварій чи в разі значного перевищення допустимих викидів. За шлейфом від осередків підвищеного вмісту хімічних складових можна проаналізувати напрямок поширення забруднюючих речовин та оцінити територію, що зазнала негативного впливу. Це дає змогу опосередковано отримати інформацію про потенційне перевищення граничних концентрацій у районах, де відсутні будь-які наземні спостереження.

З метою отримання деталізованої картини щодо якості атмосферного повітря над окремими містами України в системі реалізовано можливість включення до оброблення доменів, пов'язаних безпосередньо з конкретним містом та його околицями. Для цього використовують процедуру так званої локалізації (downscaling), в результаті чого система отримує дані з просторовою роздільною здатністю 2 км.

Візуалізацію виконують за допомогою модулів, написаних мовою Python. Експорт та архівування результатів деталізації супутникових даних над містами відбувається у вигляді текстових файлів та картосхем просторового розподілу. На рис. 7–8 показано приклади картосхем для міст Київ і Кривий Ріг.

Результати деталізації дозволяють оцінити відмінності в рівні забруднення атмосферного повітря між різними районами міст на момент зондування. Для уникнення хибних висновків потрібно мати на увазі, що супутникові дані дають інформацію про рівні забруднення у стовпі атмосфери, а не щодо їх вертикального розподілу, тому висота, на якій спостерігається максимальний вміст забруднення, невідома.

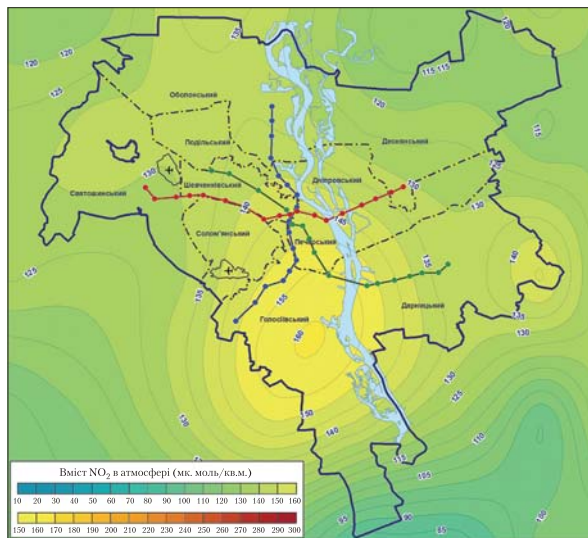


Рис. 7. Приклад картосхеми з деталізованим вмістом  $\text{NO}_2$  над м. Київ станом на 5 листопада 2020 р.

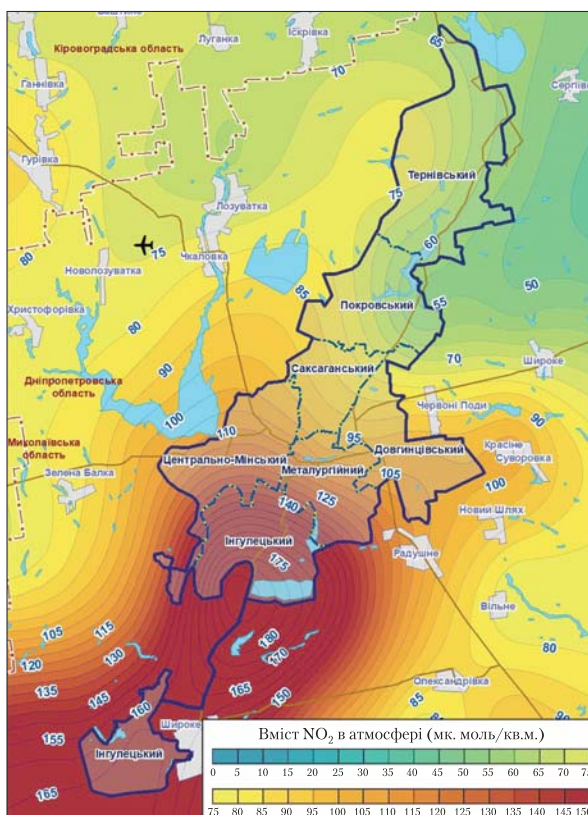


Рис. 8. Приклад картосхеми з деталізованим вмістом  $\text{NO}_2$  над м. Кривий Ріг станом на 11 січня 2021 р.

Враховуючи, що супутник Sentinel-5P зондує територію України в обідні години, повітря, забруднене в ранкові часи пік, за цей проміжок часу найчастіше поширюється на інші території за напрямком вітру та піднімається вгору. Отже, наявні максимуми у просторовому розподілі забруднюючих речовин не обов'язково можуть бути діагностовані за наземними спостереженнями, якщо основна маса речовин уже встигла піднятися вище.

**Особливості інтерпретації результатів моніторингу.** Головна особливість супутникових даних, яку обов'язково потрібно враховувати під час спроби зробити висновки щодо актуального стану забруднення атмосферного повітря, — це, як зазначалося вище, відображення вмісту хімічної складової в усьому вертикальному стовпі атмосфери на момент зондування. Нерозуміння цього факту, особливо нефаховими спеціалістами, часто призводить до хибних висновків. Отже, при роботі з супутниковими даними потрібно мати на увазі таке:

1) наявність високого вмісту забруднюючої речовини за супутниковими даними не завжди означає, що вона сконцентрована в нижніх шарах атмосфери і може бути виявлена наземними датчиками;

2) осередки високого вмісту хімічних складових часто можуть знаходитися на відстані від джерела викидів, іноді до кількох сотень кілометрів. За даними Sentinel-5P, над Україною неодноразово внаслідок транскордонного перенесення спостерігався високий вміст забруднюючих речовин, викиди яких сталися на території інших країн;

3) на сьогодні неможливо прямо (без залучення додаткових засобів аналізу та метеорологічних даних) перерахувати концентрацію за даними супутникових спостережень у приземну концентрацію; розроблення методів такого перерахунку залишається актуальним завданням у світі;

4) не можна робити висновки про відмінності у забрудненні атмосферного повітря над різними територіями, якщо відповідна різниця між ними є меншою за похибку визначення вмісту хімічної складової.

**Висновки.** Розроблено методи моніторингу якості атмосферного повітря за даними супутника Sentinel-5P у режимі, близькому до реального часу, з можливістю деталізації для міст. Оброблення здійснюється щодня в автоматичному режимі приблизно через 3 години після зондування супутником території України. У процесі реалізації методів моніторингу створюються файли нового (третього) рівня архівації. Вони містять виокремлені для території України дані, відфільтровані за індексом якості та прив'язані до регулярної координатної сітки  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ . Для моніторингу вмісту хімічних складових над окремими містами використовують методи деталізації даних, за допомогою яких щодня в автоматичному режимі можна надавати інформацію з просторовою роздільною здатністю  $2 \times 2$  км. Результатом роботи системи моніторингу є архівація файлів та створення картосхем просторового розподілу  $\text{NO}_2$ , CO, HCHO,  $\text{SO}_2$  і  $\text{O}_3$  над територією України з деталізованою візуалізацією над окремими містами.



## REFERENCES

## [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Tropospheric Monitoring Instrument. <http://www.tropomi.eu>
2. Verhoelst T., Compernelle S., Granville J., Keppens A., Pinardi G., Lambert J.-C., Eichmann K.-U., Eskes H., Niemeijer S., Fjæraa A.M., Pazmoni A., Goutail F., Pommereau J.-P., Cede A., Tiefengraber M. Quality assessment of two years of Sentinel-5p TROPOMI NO<sub>2</sub> data. EGU General Assembly 2020. EGU2020-15036. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..2215036V/abstract>
3. Abida R., Attié J.-L., El Amraoui L., Ricaud P., Lahoz W., Eskes H., Segers A., Curier L., de Haan J., Kujanpää J., Ni-jhuis A.O., Tamminen J., Timmermans R., Veeffkind P. Impact of spaceborne carbon monoxide observations from the S-5P platform on tropospheric composition analyses and forecasts. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. **17**(2): 1081–1103. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-17-1081-2017>
4. Zeng J., Gerasimov I., Adams J., Huwe P., Wei J., Meyer D. Exploration of Atmospheric Compositions by TROPOMI on Sentinel-5P. EGU General Assembly 2020. EGU2020-4330. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.4330Z/abstract>
5. Zeng J., Vollmer B., Ostrenga D., Gerasimov I. Air Quality Satellite Monitoring by TROPOMI on Sentinel-5P. AGU 2018 Fall Meeting. A33J-3280. DOI: <https://doi.org/10.1002/essoar.10500849.1>
6. Borsdorff T., Garcia Reynoso A., Stremme W., aan de Brugh J., Grutter M., Landgraf J. Monitoring CO emissions from urban districts in Mexico City using about 2 years of TROPOMI CO observations. EGU General Assembly 2020. EGU2020-5594. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.5594B/abstract>
7. Kaplan G., Yiğit Avdan Z. Space-borne Air Pollution Observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between Pollutants, Geographical and Demographic Data. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2020. **5**(3): 130–137. DOI: <https://doi.org/10.26833/ijeg.644089>
8. Omrani H., Omrani B., Parmentier B., Helbich M. Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France. *Data In Brief*. 2020. **28**: 105089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105089>
9. Petry L., Herold H., Meinel G., Meiers T., Müller I., Kalusche E., Erbertseder T., Taubenböck H., Zaunseder E., Srinivasan V., Osman A., Weber B., Jäger S., Mayer C., Gengenbach C. Air Quality Monitoring and Data Management in Germany – Status Quo and Suggestions for Improvement. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2020. XLIV-4/W2-2020: 37–43. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W2-2020-37-2020>
10. Safarianzengir V., Sobhani B., Yazdani M.H., Kianian M. Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2020. **13**: 709–719. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00827-5>
11. The use of Sentinel-5P air quality data by CAMS. ECMWF. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2019/19028-use-sentinel-5p-air-quality-data-cams.pdf>
12. Buchwitz M., Schneising O., Noel S., Reuter M., Vanselow S., Bovensmann H., Burrows J.P. Sentinel-5 Precursor methane and carbon monoxide column retrievals and assessments related to localized emission sources. EGU General Assembly 2020. EGU2020-7861. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.7861B/abstract>
13. Savenets M., Dvoretzka I., Nadtochii L. Current state of atmospheric air pollution in Ukraine based on Sentinel-5P satellite data. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Ser. Geology. Geography. Ecology*. 2019. **51**: 221–223. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-16>  
[Савенець М., Дворецька І., Надточій Л. Сучасний стан забруднення атмосферного повітря в Україні за даними супутника Sentinel-5P. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, сер. Геологія. Географія. Екологія*. 2019. Вип. 51. С. 221–233.]
14. Savenets M., Osadchyi V., Oreshchenko A., Pysarenko L. Air quality changes in Ukraine during the April 2020 wild-fire event. *Geographica Pannonica*. 2020. **24**(4): 271. DOI: <https://doi.org/10.5937/gp24-27436>
15. Sentinel-5P. Data Products. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>
16. Sentinel-5P. Products and Algorithms. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms>
17. Miyazaki K., Eskes H., Sudo K., Boersma K.F., Bowman K., Kanaya Y. Decadal changes in global surface NO<sub>x</sub> emissions from multi-constituent satellite data assimilation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. **17**(2): 807–837. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-17-807-2017>
18. Silva S., Arellano A. Characterizing Regional-Scale Combustion Using Satellite Retrievals of CO, NO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Remote Sensing*. 2017. **9**(7): 744. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070744>
19. Lama S., Houweling S., Boersma K.F., Eskes H., Aben I., van der Gon H.D., Krol M.C., Dolman H., Borsdorff T., Lorente A. Quantifying burning efficiency in megacities using the NO<sub>2</sub>/CO ratio from the Tropospheric Monitor-



- ing Instrument (TROPOMI). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. **20**(17): 10295–10310. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-20-10295-2020>
20. S5P Mission Performance Centre Nitrogen Dioxide Readme. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Nitrogen-Dioxide-Level-2-Product-Readme-File>
21. Sentinel Hub. Sentinel-5P L2. <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-5p-l2/>

*Mykhailo V. Savenets*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9429-6209>

*Volodymyr I. Osadchyi*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0428-4827>

*Andrii V. Oreshchenko*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8363-6885>

Ukrainian Hydrometeorological Institute of State Emergency Service of Ukraine  
and National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

#### ATMOSPHERIC AIR QUALITY MONITORING OVER THE TERRITORY OF UKRAINE WITH SPECIFICATION OVER THE CITIES USING SENTINEL-5P SATELLITE DATA

The study describes methods for operative monitoring of atmospheric air quality over the territory of Ukraine using the Sentinel-5P satellite data. The methods provide possibility for data specification over the cities. The data processing is fully automatic and deals with the column data of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), formaldehyde (HCHO), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and total ozone (O<sub>3</sub>). The system works every day and starts processing approximately 3 hours after the scanning of Ukrainian territory. The paper describes the procedure of files creation which represents the third level of data archiving. There are implemented the procedures of the adjusting to regular grids and the filtering of statistically unreliable data. The methods for data specification are developed which allow to analyze the content of chemical compounds over the cities. The paper discusses the main features for the interpretation of chemicals' spatio-temporal distribution. It is emphasized the typical reasons for false interpretation and mistaken conclusions about atmospheric air quality while analyzing the satellite observations.

**Keywords:** chemical compounds, atmospheric air quality, monitoring, Sentinel-5P, satellite observations.