

Малий Д. К., аспірант;

Дудар Т. В., д-р. техн. наук, проф.

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, Україна

СУЧАСНІ ДИСТАНЦІЙНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ: СУПУТНИКОВІ ПЛАТФОРМИ ТА БПЛА

Забруднення повітря залишається однією з найсерйозніших екологічних проблем, а в Україні воєнні дії одночасно створюють нові джерела забруднення (вибухи, пожежі) та унеможливають роботу багатьох стаціонарних постів. Так, у Бахмуті й Торецьку екологічний контроль було призупинено від початку повномасштабного вторгнення. Це зумовлює потребу в дистанційних технологіях моніторингу, що дозволяють збирати дані без присутності людини в небезпечних зонах.

До таких засобів належать безпілотні літальні апарати (БПЛА) та супутникові системи. Дрони можуть нести сенсори для аналізу повітря, а супутники забезпечують широкий просторовий і часовий огляд. Для України ключовими є міжнародні платформи (Sentinel-5P, CAMS, Landsat, NASA Worldview), оскільки власних супутників екологічного моніторингу країна не має. Угода ДКАУ з Єврокомісією (2018) відкрила доступ до даних Sentinel і розширила можливості використання глобальних спостережень.

Мета огляду — проаналізувати сучасні дистанційні методи контролю якості повітря в умовах війни, оцінити можливості й обмеження БПЛА та супутників і визначити перспективи інтеграції цих даних у державну систему моніторингу.

Методи дистанційного моніторингу атмосферного повітря

Безпілотні літальні апарати (БПЛА)

В останні роки БПЛА стрімко увійшли до практики екологічного моніторингу як мобільні платформи для оперативного збору даних. Оснащені портативними газоаналізаторами та іншими сенсорами, безпілотники здатні вимірювати концентрації забруднювальних речовин безпосередньо в приземному шарі атмосфери. Зокрема, сучасні промислові БПЛА з газоаналізаторами можуть отримувати дані про вміст газів на різних висотах і будувати детальні тривимірні карти забруднення повітря.

Наприклад, спеціалізоване обладнання типу Sniffer4D, встановлене на БПЛА, забезпечує швидке та високоточне 3D-сканування розподілу домішок у повітрі з одночасним виявленням різних небезпечних газів. Це дозволяє використовувати БПЛА для вирішення широкого кола задач: від експрес-моніторингу повітря під час надзвичайних ситуацій (для оцінки хімічної небезпеки) до контролю викидів на промислових об'єктах та пошуку місць витоку токсичних речовин. Дрони здатні підлетіти безпосередньо до джерела забруднення (наприклад, до труб заводів або місць пожеж) і відібрати проби чи провести вимірювання, що значно підвищує точність та оперативність екоконтролю порівняно зі стаціонарними наземними постами.

Однак, використання безпілотників має і суттєві обмеження, особливо в умовах бойових дій. По-перше, це обмежений радіус дії та час автономного польоту більшості БПЛА – вони можуть покривати відносно невелику площу і потребують регулярної підзарядки чи заміни батарей. По-друге, в районах, наближених до фронту, діють жорсткі регуляторні заборони на польоти, зумовлені питаннями безпеки. Згідно з правилами воєнного стану, в зонах активних бойових дій польоти БПЛА цивільними особами повністю заборонені без дозволу військових, у прифронтових регіонах – можливі лише за погодженням із військовою адміністрацією. Навіть у відносно безпечних областях запуск БПЛА дозволяється тільки після подання заявки та отримання спеціального дозволу від відповідних органів. Порушення цих правил може розглядатись як загроза: кожен несанкціонований безпілотник поблизу лінії фронту ризикує бути виявленим і знищеним як ворожа ціль, а оператор притягнений до відповідальності. Окрім ризику фізичного знищення, військові технології радіоелектронної боротьби (РЕБ) можуть придушувати сигнали управління БПЛА, роблячи їх використання небезпечним і малоефективним у прифронтовій зоні. Таким чином, попри високий потенціал БПЛА у екологічному моніторингу, їх застосування в умовах війни значно обмежене як практичними (малий радіус дії), так і нормативними факторами (заборони польотів, ризику безпеки).

Супутникові платформи та служби моніторингу (Sentinel-5P, CAMS, Landsat, NASA Worldview)

Супутникове спостереження атмосфери надає унікальну можливість відстежувати якість повітря на великих територіях з мінімальним часовим інтервалом. Програма ЄС Copernicus має спеціалізовані місії для моніторингу атмосфери – передусім, супутник Sentinel-5P (TROPOMI), запущений у 2017 році. Sentinel-5P здійснює щоденні глобальні спостереження та вимірює концентрації ряду

газоподібних забруднювачів, зокрема діоксиду азоту (NO_2), озону (O_3), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO_2), формальдегіду (HCHO) та метану (CH_4).

Просторова роздільна здатність TROPOMI становить близько 7×7 км (покращена до $\sim 5,5$ км після середини 2019 року), що дозволяє досить детально картувати забруднення над містами та промисловими зонами. Дані цього супутника є відкритими і доступними практично в режимі реального часу через інтернет-сервіси (наприклад, Sentinel Hub). Для України інформація із Sentinel-5P стала цінним джерелом відомостей про стан атмосфери, особливо в регіонах, де відсутні наземні станції або неможлива робота фахівців. За допомогою знімків Sentinel-5P отримано картину середнього рівня забруднення повітря по країні: найбільш несприятливими виявились індустриальні області – Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Луганська, а також Київський регіон. У розрізі міст найвищі показники забруднення (наприклад, за вмістом NO_2) зафіксовано над такими великими центрами, як Дніпро, Донецьк, Кривий Ріг, Київ, Маріуполь, Запоріжжя. Ці результати супутникового моніторингу узгоджуються з очікуваним розподілом промислових і урбанізованих територій, підтверджуючи достовірність методики.

Важливо, що супутники дозволяють оцінити вплив надзвичайних подій (таких як війна) на якість повітря. Так, аналіз даних Sentinel-5P за період повномасштабного конфлікту 2022 року показав суттєві зміни в концентраціях деяких забруднювачів порівняно з «довоєнними» роками. Зокрема, на тлі загального спаду промислової активності рівні NO_2 та SO_2 в Україні знизилися, тоді як фоновий озон (O_3) та монооксид вуглецю в ряді регіонів зросли. За даними досліджень, концентрація SO_2 у розпал бойових дій зменшилась у середньому вчетверо, що пояснюється зупинкою багатьох підприємств та зниженням викидів від спалення палива. Водночас, поодинокі епізоди сильного забруднення реєструвались під час бомбардувань і масштабних пожеж – передусім зростали рівні дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2.5}$ та інших продуктів горіння. Такі пікові випадки часто мають локальний характер і короточасні, тому їхня фіксація з супутника залежить від часу прольоту та наявності хмарності. Тим не менш, загальна картина, отримана із космосу, свідчить про істотний вплив війни на якість повітря в Україні, що важливо враховувати при оцінці ризиків для здоров'я населення.

Окрім безпосередніх спостережень супутників, для комплексного моніторингу атмосфери використовуються *моделі та сервіси прогнозування*. Один з ключових інструментів такого типу – Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), що є частиною програми Copernicus. CAMS забезпечує глобальні та регіональні (зокрема

європейські) оцінки якості повітря, поєднуючи дані спостережень з супутників і наземних станцій із сучасними моделями хімії атмосфери. На європейському рівні CAMS щодня формує детальний аналіз стану повітря з просторовою роздільною здатністю $\sim 10 \times 10$ км та прогнозує його на 4 дні вперед. Для цього залучено ансамбль з дев'яти моделей, результати яких усереднюються, а також виконується асиміляція даних спостережень – зокрема, враховуються виміри стаціонарних станцій Європейського агентства з довкілля, щоб уточнити модельні поля. Важливо, що CAMS надає інформацію про такі показники, які не вимірюються безпосередньо Sentinel-5P.

Наприклад, концентрації твердих часток $PM_{2.5}$ та PM_{10} отримують із моделі CAMS, оскільки супутникові прилади наразі не дають прямого вимірювання масової концентрації аерозолі. Це дозволяє заповнити прогалини у даних: комбінуючи спостереження Sentinel-5P (для газів) з модельними оцінками CAMS (для дрібного пилу), можна отримати повний набір параметрів якості повітря. Серія даних CAMS доступна через відкритий портал Atmosphere Data Store і надається з високою часовою роздільністю (1 година) на різних висотних рівнях, що дає можливість аналізувати добові коливання забруднення та перенос домішок у вертикальному профілі атмосфери. В контексті України, де наземна мережа моніторингу пилу обмежена, CAMS є практично єдиним джерелом даних про розподіл $PM_{2.5}/PM_{10}$ по всій території, особливо в районах, недосяжних для наземних спостережень через бойові дії.

До переліку корисних дистанційних засобів варто також включити мультиспектральні оптичні супутники, зокрема американські Landsat та аналогічні їм Sentinel-2. Хоча вони не вимірюють хімічний склад атмосфери, їхні знімки високої роздільної здатності (10–30 м) можуть допомогти побічно виявляти екологічні проблеми. Наприклад, на супутникових фото добре видно шлейфи диму від великих пожеж або пилові бурі; порівняння знімків до і після техногенних аварій дозволяє оцінити масштаби викидів (за площею вигорілих лісів, вигорання нафтових резервуарів тощо). Такі спостереження доповнюють дані спеціалізованих атмосферних місій і додають контекст для аналізу ситуації на місцевості.

Для оперативної візуалізації та аналізу різномірних супутникових даних широко використовується онлайн-платформа NASA Worldview. Це інструмент, що надає інтерактивний доступ до понад 1200 шарів супутникових зображень та продуктів спостереження Землі. Worldview підтримує *часово-критичні застосування* – зокрема, моніторинг лісових пожеж, оцінку якості повітря та відстеження погоди – оскільки більшість шарів оновлюється протягом кількох годин після спостереження супутником.

Через цю платформу екологи та управлінці можуть у зручному режимі переглядати актуальні карти аерозольного оптичного товщини (AOD), концентрації діоксиду азоту, наявності пожеж (термальні аномалії) та інших показників у будь-якій точці світу. Великим плюсом є можливість переглядати історичні дані за минулі періоди, що дозволяє аналізувати динаміку змін якості повітря у часі. Наприклад, використовуючи Worldview, можна зіставити зображення території України до війни і під час активних бойових дій, побачивши, як змінились показники забруднення над окремими регіонами. Інтерфейс Worldview доволі простий і не вимагає спеціальних знань з обробки супутникової інформації, що робить цей ресурс цінним для оперативного прийняття рішень. Попри певні обмеження (зокрема, супутникові дані доступні зазвичай з добовим інтервалом і недоступні під час хмарності), Worldview та подібні інструменти відкривають широкі можливості для країн, де бракує густої мережі наземних датчиків. Вони фактично знімають інформаційний вакуум над «білими плямами» на карті моніторингу, надаючи критично важливі дані про стан атмосфери над морем, тимчасово окупованими чи небезпечними територіями, тощо.

Аналіз та обговорення

Обмеження БПЛА та переваги супутників у воєнний час

У повномасштабній війні можливості БПЛА та супутників різко відрізняються. З одного боку, безпілотники дають високу локальну точність: вони відбирають проби повітря безпосередньо з дихального рівня й досліджують окремі об'єкти з просторовим розрізненням до кількох метрів. Це незамінно для оцінки викидів конкретного підприємства чи концентрації небезпечних речовин у житловій зоні. Недоліком є обмежений радіус дії та тривалість польоту: для отримання регіональної картини потрібні сотні апаратів і операторів, що практично неможливо.

Супутники, натомість, охоплюють територію всієї країни. Sentinel-5P щодня здійснює глобальне сканування, CAMS надає щогодинні оцінки й прогнози. Дрони можуть працювати лише епізодично, тоді як супутники забезпечують регулярність і неперервність моніторингу.

За спектром показників БПЛА обмежуються кількома сенсорами, тоді як супутники й CAMS дають комплексну картину: гази (NO_2 , SO_2 , O_3), аерозолі (AOD), концентрації $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ та метеопараметри. У безпосередній близькості до джерела забруднення дрони точніші, адже супутники зазвичай вимірюють інтегральні значення по вертикальному стовпу атмосфери, що потребує моделей для перерахунку у

приземні концентрації. Оптимальним є використання наземних станцій і БПЛА для калібрування супутникових даних.

Щодо безпеки та вартості: супутники працюють із орбіти, не наражаючи людей на ризик, і забезпечують ефект масштабу — їхні дані доступні багатьом країнам. Дрони ж можуть бути збиті, а їх широке застосування у прифронтових умовах економічно й технічно неефективне.

Отже, БПЛА та супутники слід розглядати як взаємодоповнюючі. Перші виконують точкові завдання (хімічні аварії, локальні викиди), другі — забезпечують фон і аналіз загальних тенденцій. Поєднання цих методів дає найповнішу картину стану атмосферного повітря.

Висновки

У воєнних умовах дистанційні методи моніторингу якості повітря стали критично необхідними: вони компенсують втрату стаціонарних постів і забезпечують дані для небезпечних або недосяжних територій. БПЛА ефективні для локальних вимірювань, аварійних ситуацій і 3D-візуалізації забруднення, проте обмежені технічно та регуляторно. Супутники Copernicus і NASA забезпечують регулярні спостереження та широкий огляд, а CAMS доповнює їх оцінками концентрацій твердих часток і прогнозами.

Порівняльний аналіз показує: супутники перевершують БПЛА у масштабності та сталій доступності даних, натомість БПЛА точніші для локального контролю. Оптимальною є їхня комбінація — супутники для фонових моніторингу та трендів, дрони для перевірки і уточнення критичних точок.

Для України, яка не має власних супутників, ключовим завданням є інтеграція міжнародних даних у національну систему моніторингу. Це дозволить підвищити надійність контролю, своєчасно реагувати на загрози та планувати післявоєнне відновлення промисловості з урахуванням екологічних вимог. Поєднання БПЛА, супутників і наземних станцій є основою екологічної безпеки та сталого розвитку країни.

Література

1. Карпенко О., Шелестов А., Яйлимова Г. Інформаційні технології супутникового моніторингу якості повітря: рішення для України. *ECOBUSINESS. Екологія підприємства*. 2021. URL: <https://ecolog-ua.com/news/informaciyini-tehnologiyi->

- suputnykovogo-monitoryngu-yakosti-povitrya-rishennya-dlya-ukrayiny (дата звернення: 06.09.2025).
2. Яка якість повітря у Дружківці. *Дружківка на долонях*. 18.07.2025. URL: <https://druzhkivka.city/articles/3797/yaka-yakist-povitrya-u-druzhkivci> (дата звернення: 08.09.2025).
3. Чи можна використовувати дрон у воєнний час? *Zelen-Store*. 2023. URL: <https://zelen-store.com.ua/blogs/dron-u-voyennij-chas> (дата звернення: 08.09.2025).
4. DroneUA запускає перші системи для еко-моніторингу. *DroneUA*. 2020. URL: <https://drone.ua/droneua-zapuskae-pershi-systemy-dlya-eko-monitoryngu/> (дата звернення: 10.08.2025).
5. Mehrabi M., Konovalov I., Beekmann M., et al. Air quality monitoring in Ukraine during 2022 military conflict using Sentinel-5P imagery. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01536-y>.
6. Zalakeviciute R., Jhun I., Lopez-Villada J., et al. War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(19). P. 12233. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912233>.
7. Air Pollution in Ukraine from space. *Arnika Association*. 2020. Оновлено 2024. URL: <https://english.arnika.org/air-pollution-in-ukraine-from-space> (дата звернення: 22.08.2025).
8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Стан та перспективи розвитку державної системи моніторингу довкілля. Аналітична записка. Київ: Міндовкілля, 2023. 32 с. URL: <https://mepr.gov.ua> (дата звернення: 08.09.2025).
9. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Technical Documentation. ECMWF, 2020. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu> (дата звернення: 06.09.2025).
10. NASA ARSET. Satellite Air Quality Monitoring: Introduction to the NASA WorldView. NASA Applied Remote Sensing Training, 2015. URL: <https://arset.gsfc.nasa.gov/airquality/webinars/2015> (дата звернення: 01.09.2025).
11. Khabarova H.V., Kovalenko G.D., Barbashev S.V. Application of satellite technologies for monitoring the radiation state of the atmospheric air during the war and post-war reconstruction of Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2025, № 3(157), с. 194–199. DOI: 10.46813/2025-157-194.