



САВЕНЕЦЬ

Михайло Валерійович – кандидат географічних наук, завідувач лабораторії моніторингу атмосферного повітря Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України

ІНТЕГРОВАНИЙ ПОГЛЯД НА СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
12 липня 2023 року

Доповідь присвячено аналізу нинішнього стану забруднення атмосферного повітря над територією України, здійсненому на основі інтегрованого використання даних наземних спостережень, супутникового зондування та чисельного моделювання атмосферних процесів з урахуванням аерозольних ефектів. Розглянуто статистичні характеристики концентрацій основних забруднюючих речовин на постах наземного моніторингу. Показано та обґрунтовано узгодженість даних із даними супутника Sentinel-5 Precursor. Продемонстровано можливості онлайн-інтегрованого чисельного моделювання на прикладі використання моделі Enviro-HIRLAM.

Ключові слова: забруднення атмосферного повітря, пост моніторингу, Sentinel-5P, моделювання атмосферних процесів, Enviro-HIRLAM.

Подолання негативних наслідків забруднення атмосферного повітря вже багато десятиліть є актуальною проблемою в більшості країн світу. Значні обсяги викидів від промислових об'єктів в Україні разом зі зростанням кількості автотранспорту зумовлюють необхідність імплементації заходів з поліпшення якості атмосферного повітря. Повномасштабне російське вторгнення настільки вплинуло на перерозподіл джерел забруднення, що необхідне повне переосмислення плану прийняття рішень щодо підвищення якості атмосферного повітря та подолання наслідків воєнних дій. На жаль, мережа спостережень за забрудненням атмосферного повітря в Україні перебуває не в найкращому стані і потребує негайного переоснащення та вдосконалення, особливо зважаючи на те, що інформація від інших джерел є абсолютно не інтегрованою.

Згідно з концепцією розвитку гідрометеорологічних спостережень Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО), найповнішу інформацію про стан атмосферного повітря та гідрометеорологічні процеси забезпечує поєднання даних назем-

них спостережень, супутникового зондування, чисельного моделювання та додаткових спеціалізованих спостережень (літакове зондування, морські вимірювання тощо). Саме таке поєднання дозволяє детальніше оцінити всю різноманітність фізичних та хімічних процесів в атмосферному повітрі. Якщо йдеться про моніторинг забруднення атмосфери, поєднання різних джерел даних є єдиним можливим способом оперативного реагування на ризики небезпечного погіршення якості атмосферного повітря та дослідження надходження, трансформації та впливу хімічних складових в атмосфері. Це особливо актуально для території України, де наземна мережа спостережень за забрудненням атмосферного повітря є дуже малою та розосередженою.

Роль наземних спостережень. Яким би не був розвиток сучасних технологій супутникового зондування та методів моделювання, вони не можуть повноцінно замінити наземні спостереження, які виконують чотири основні функції. Перша функція полягає в тому, що наземні спостереження є єдиним джерелом фактичної інформації про те, чи було перевищено небезпечні рівні забруднення атмосферного повітря і чи загрожує це населенню та екосистемам. Друга функція — оцінка довготривалих тенденцій якості атмосферного повітря, що відображають успішність тих чи інших заходів зі зменшення забруднення атмосфери. Третя функція — валідація та верифікація даних супутникового зондування і результатів моделювання. І четверта функція — дослідження фізико-хімічних трансформацій забруднення атмосферного повітря безпосередньо в середовищі їх перебігу.

Так, наземні вимірювання концентрацій забруднюючих речовин на державній мережі спостережень (на основі даних Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського) дають змогу проводити оцінку якості атмосферного повітря впродовж тривалого проміжку часу (кілька десятиліть). Останніми роками, перед повномасштабним російським вторгненням, у більшості міст на території України вміст забруднюючих речовин не пе-

ревищував небезпечних показників. Проте у найбільших промислових містах (Київ, Одеса, Кривий Ріг, Маріуполь, Дніпро) повторюваність небезпечних перевищень вмісту окремих забруднюючих речовин спостерігалася у 10–40 % випадків. Найнебезпечнішим атмосферне повітря було в Маріуполі, де вміст формальдегіду (CH_2O) перевищував граничні показники у більш як 60 % часу.

Тенденції останнього десятиліття вказують на зростання концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Водночас результати національної інвентаризації викидів свідчать про їх переважаюче зменшення. Тобто маємо неузгодженість розрахункових викидів забруднюючих речовин з їх фактичним вмістом у містах. Це може свідчити про недооцінку ролі автотранспорту у формуванні забруднення атмосфери в містах України.

У межах території міст забруднення атмосферного повітря розподілено вкрай неоднорідно. На основі даних 129 постів моніторингу з урахуванням метеорологічних умов досліджено взаємозв'язок між формуванням різних рівнів забруднення на постах та переважаючим атмосферним перенесенням (рис. 1). Результати, отримані на основі даних наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря до повномасштабного російського вторгнення, дозволяють побудувати так звану базову лінію (baseline) якості атмосферного повітря, що необхідно для аналізу наслідків війни та визначення завданої шкоди.

Роль супутникового зондування. Незважаючи на всі переваги наземних спостережень, дані постів лише зрідка можуть дати достатньо інформації про процеси, що вплинули на формування рівнів забруднення. Точковість вимірювання разом зі значною просторовою неоднорідністю часто не дозволяють встановити причини погіршення якості атмосферного повітря. Цю функцію частково здатні забезпечити сучасні супутники, зондуючи загальний вміст хімічних складових атмосфери. Супутникові дані є інтегрованими за вертикальним стовпом атмосферного повітря і дають змогу виявити поширення шлейфів забрудненого

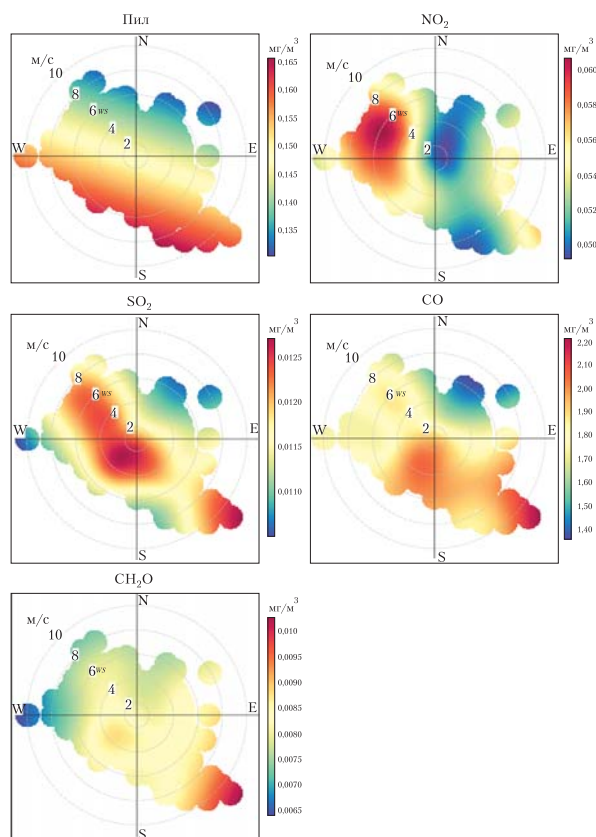


Рис. 1. Залежність концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі атмосферного повітря від напрямку та швидкості вітру (на прикладі поста № 4, м. Львів)

повітря від джерел викидів, які можуть розташовуватися за десятки кілометрів від наземних постів моніторингу.

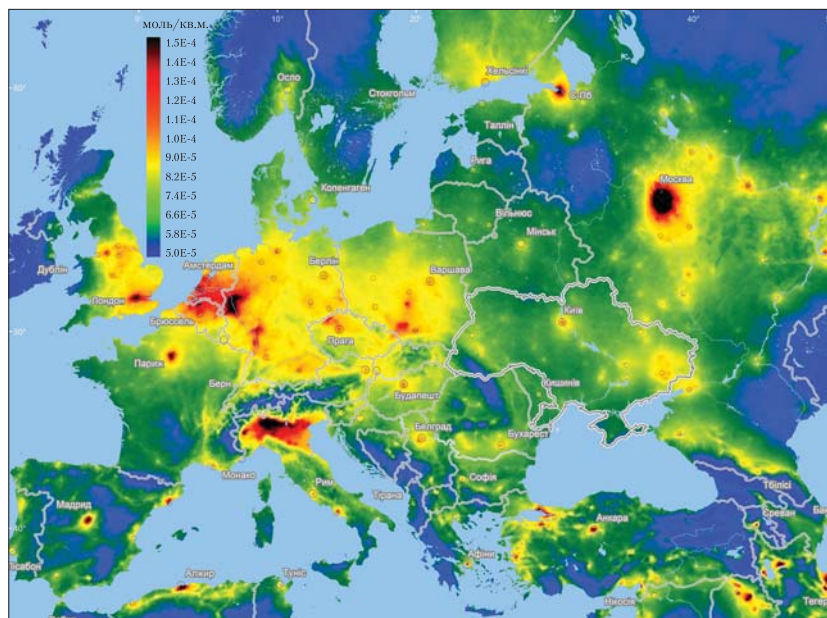
Звичайно, супутникове зондування забруднення атмосфери також має свої недоліки: 1) неможливість встановити висоту перебування найвищих концентрацій забруднюючих речовин без залучення додаткових інструментів аналізу; 2) залежність від хмарності та деяких типів підстильної поверхні з низькою відбивною здатністю (альbedo); 3) похибки, що виникають через так зване перекриття спектрів поглинання газових складових; 4) поки ще груба просторова роздільна здатність (для газових компонент — лише кілька кілометрів) та інші технічні недоліки. Проте інтегроване використання супутникових та наземних спо-

стережень дозволяє реалізувати більшість завдань оперативного моніторингу якості атмосферного повітря.

У 2017 р. розпочав свою роботу супутник Sentinel-5 Precursor, оснащений приладом TROPospheric Monitoring Instrument. Він став першим супутником, який дозволив подолати просторову роздільну здатність у 10 км для газових компонент і «зазирнути» у межі урбанізованих районів. Мережа спостережень розвинених країн, що ґрунтується на вимірюванні фонового вмісту забруднення (як міського, так і загального), одразу дозволила встановити статистично надійні зв'язки між супутниковими даними щодо загального вмісту хімічних складових та концентраціями забруднюючих речовин поблизу земної поверхні. Водночас недостатньо вивченими залишалися можливості супутникового зондування місць із локальними максимумами забруднення в межах міст. Ці можливості вдалося реалізувати на основі даних наземних спостережень в Україні [1], де пости моніторингу розміщено за радянськими підходами до фіксації забруднення для виявлення негативної дії промислових підприємств.

На основі спостережень супутника Sentinel-5 Precursor за трирічний період виявлено відсутність значущої кореляції з даними української наземної мережі. Фільтрування за різних умов хмарності, просторове осереднення загалом над містом, врахування сприятливості умов накопичення та виведення домішок із атмосферного повітря (через залежність від висоти граничного шару атмосфери) не привели до підвищення надійності зв'язку між даними. Більш детальні дослідження показали, що ні супутникові, ні наземні спостереження не є хибними. Неузгодженість між даними виникає на двох часових масштабах. У масштабі «години — день» відмінність між показниками формується завдяки часовій різниці між моментом викиду та часом супутникового зондування. Через деякий час після викиду забруднення піднімається в атмосфері й розсіюється. У цей момент наземні спостереження вже не фіксують високі концентрації, тоді як супутник продовжує зондувати забруднене повітря,

Рис. 2. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту діоксиду азоту (NO_2) над територією Європи за даними супутникових спостережень [2]



що вже перебуває на певній висоті. У масштабі «сезон — рік» неузгодженість виникає внаслідок різної сезонної мінливості забруднюючих речовин поблизу земної поверхні і на висотах через різну тривалість існування їх молекул протягом року. Отримані результати засвідчили, що супутникові та наземні дані взаємодоповнюють одні одних, але не можуть бути взаємозамінними.

Осереднені дані супутникового зондування за довші проміжки часу дозволили виявити найзабрудненіші та найбільш чисті райони на території України (зокрема й окремі великі міста). Водночас щоденні дані дали відповідь на питання про особливості часової мінливості забруднюючих речовин, у тому числі уможливили моніторинг забруднення від лісових пожеж, автомобільних заторів, промислових викидів, транскордонного перенесення, пилових бур, а на сьогодні — і від бойових дій [2].

Реалізація таких досліджень в Україні стала можливою завдяки розробленій в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України повністю автоматизованій системі оцінки якості атмосферного повітря за даними супутникових спостережень Sentinel-5 Precursor [2, 3]. Цю систему було

представлено у 2021 р. на симпозиумі Quadrennial Global Atmosphere Watch Symposium, який щотири роки проводиться під егідою Всесвітньої метеорологічної організації.

Сучасні супутникові дані дозволяють проводити аналіз забруднення атмосферного повітря у глобальному масштабі. Так, дослідження якості атмосферного повітря в Україні порівняно з європейськими країнами (рис. 2) дало змогу розвінчати міф про нас як «одну з найзабрудненіших країн», про що часто і помилково стверджують у ЗМІ, спираючись на дані мереж громадських спостережень без фахового аналізу об'єктивної ситуації.

Роль чисельного моделювання. Використання моделювання атмосферних процесів та перенесення забруднюючих речовин дозволяє нівелювати недоліки моніторингу. На сьогодні моделювання є основним інструментом, який дає можливість аналізувати тривимірний розподіл забруднюючих речовин в атмосфері та їх перенесення і осадження в часі. Фактично чисельне моделювання виходить за межі аналізу режимної інформації та оперативного моніторингу і уможливлює прогнозування забруднення атмосфери. Моделі хімічного транспорту за підтримки супутникового та наземного

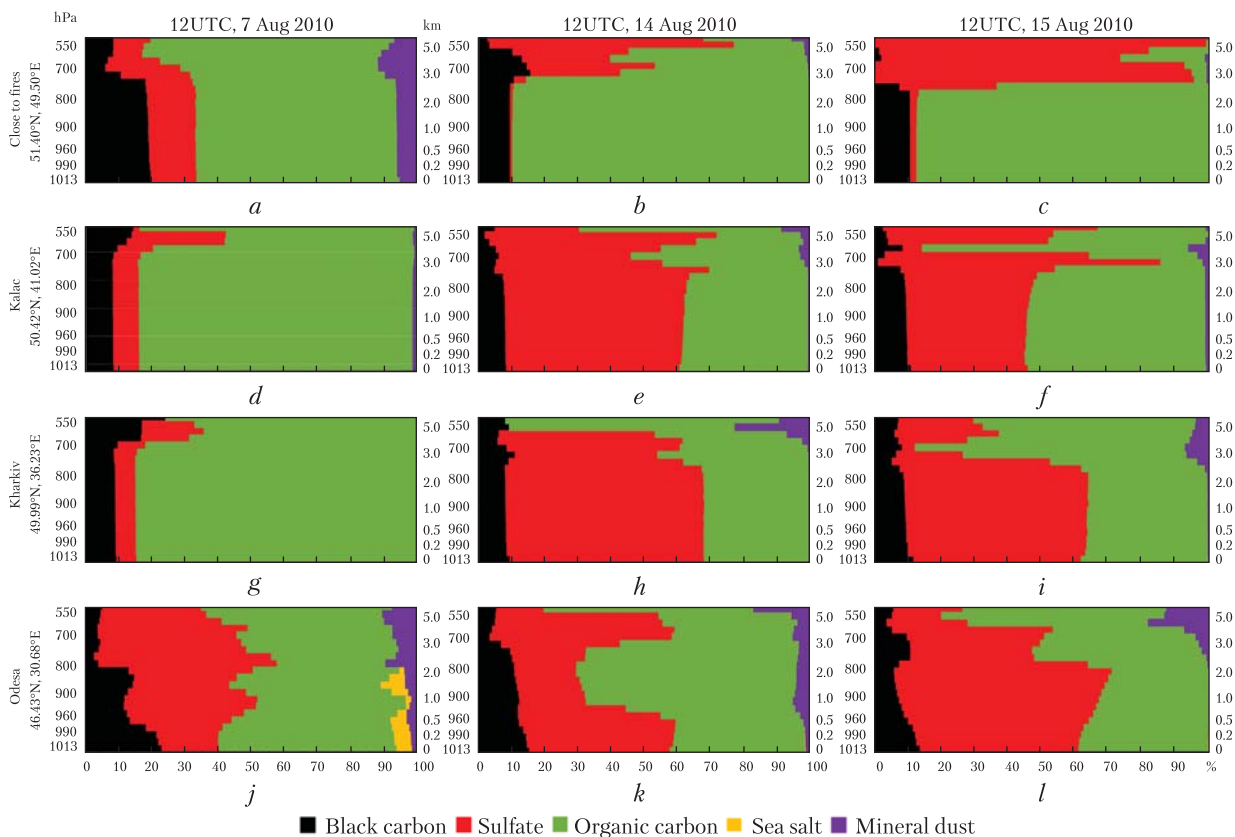


Рис. 3. Вертикальний розподіл частки аерозольних компонент різного складу (сажа, сульфати, органічний вуглець, морська сіль, мінеральний пил) під час лісових пожеж у серпні 2010 р. [4]

моніторингу спроможні повністю забезпечити виконання всіх завдань, необхідних для прийняття рішень.

Стрімкий розвиток чисельних моделей та комп'ютерних потужностей удоступнив використання високовартісного інтегрованого моделювання, яке дозволяє не лише отримати поле забруднення, що видозмінюється під дією метеорологічних умов, а й включити ефекти хімічних та аерозольних складових атмосферного повітря, що самі по собі здатні видозмінювати радіаційні, термічні, вологісні та динамічні властивості атмосферного повітря. Особливу роль при цьому відіграють аерозолі — тверді частинки в атмосфері. Прямі аерозольні ефекти змінюють радіаційне перенесення, тоді як непрямі ефекти — умови формування хмарності і навіть випадіння опадів. Внесок цих ефектів

може бути настільки значним, що неврахування їх у чисельних моделях прогнозу погоди за окремих умов призводить до великих похибок.

З 2018 р. ми почали використовувати інтегровану модель The Environment — High Resolution Limited Area Model (Enviro-HIRLAM) для дослідження ролі аерозолів у формуванні регіональних погодних умов в Україні [4]. Моделювання здійснюється на суперкомп'ютерах Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) та фінського центру CSC. Вже реалізовано моделювання ролі у видозмінненні атмосферних процесів сажі та органічного вуглецю, які потрапляють в атмосферне повітря від лісових пожеж, а також загальної ролі пилу, сульфатів, морської солі й вуглецевмісних аерозолів (рис. 3).

Так, на прикладі екстремально високого вмісту вуглецевих аерозолів в атмосферному повітрі встановлено зміни притоку короткохвильового випромінювання до земної поверхні до 300 Вт/м^2 та довгохвильового випромінювання до 30 Вт/м^2 . Ці зміни в радіаційних потоках здатні спричинити зміну приземної температури повітря до $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ завдяки прямим аерозольним ефектам.

Висновки. Інтегроване використання різних джерел даних про забруднення атмосферного повітря на сьогодні є єдиним можливим шляхом розвитку наукових досліджень, забезпечення оперативного моніторингу, прогнозування та прийняття рішень. Особливо гостро проблема відсутності інтегрованого використання даних постала з початком по-

вномасштабного російського вторгнення у 2022 р. Наразі сформовано загальний підхід до використання даних мережі наземних спостережень, супутникового зондування хімічних складових атмосферного повітря та чисельного моделювання атмосферних процесів з урахуванням впливу аерозольних ефектів. Подальший розвиток потребує створення наукової станції та інфраструктури з сучасними наземними приладами, інтегрування супутникових спостережень із залученням методів машинного навчання та поглиблення діагностичного й оперативного використання чисельних моделей із можливістю моделювання аерозольних ефектів з постійним оновленням параметризацій, які активно розробляють у світі.

REFERENCES

1. Savenets M., Dvoretzka I., Nadtochii L., Zhemera N. Comparison of TROPOMI NO_2 , CO, HCHO, and SO_2 data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*. 2022. **29**(6): e2108. <https://doi.org/10.1002/met.2108>
2. Osadchyi V., Oreshchenko A., Savenets M. *Satellite monitoring of fires and air pollution*. (Kyiv, UHMI, 2023). [Осадчий В., Орещенко А., Савенець М. *Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря*. Київ: УкрГІМІ, 2023]. https://doi.org/10.15407/uhmi.2023_1
3. Savenets M., Oreshchenko A., Nadtochii L. The system for near-real time air pollution monitoring over cities based on the Sentinel-5P satellite data. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology, Geography, Ecology"*. 2022. **57**: 195–205. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-15>
4. Savenets M., Pysarenko L., Krakovska S., Mahura A., Petäjä T. Enviro-HIRLAM model estimates of elevated black carbon pollution over Ukraine resulted from forest fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. **22**(24): 15777–15791. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15777-2022>

Mykhailo V. Savenets

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

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

INTEGRATED VIEW ON THE MODERN ATMOSPHERIC AIR POLLUTION CONDITIONS IN UKRAINE

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, July 12, 2023

The article is devoted to the analysis of modern atmospheric air pollution conditions over Ukraine based on the integrated use of ground-based observations, remote sensing, and numerical atmospheric modeling including aerosol effects. Ground-based monitoring data were used for detecting average air pollution in cities, the frequency of threshold level exceedance, and comparing tendencies with national inventories. By applying meteorological data, the dependencies of air pollution on atmospheric transport were estimated for every monitoring site (129 in total) in urban areas. In comparison to point measurements, remote sensing data provides a detailed view covering the entire Ukrainian territory.

Using the automatic near-real-time system for the Sentinel-5P satellite, which was developed at the Ukrainian Hydro-meteorological Institute, we are able to analyze spatial and temporal features in remote regions and detect the consequences of emissions including those from wildfires, dust storms, industrial objects, transboundary pollution, and war-originated sources. Numerical modeling makes it possible not only to simulate past air pollution distribution but also to create air quality forecasts. Nowadays, we are using high-performance computing by running the online-integrated Enviro-HIRLAM model to study pollution effects (mainly direct and indirect aerosol effects) on meteorological processes. All these data sources together provide the only possible way to implement an integrated view of air pollution.

Keywords: atmospheric air pollution, monitoring site, Sentinel-5P, atmospheric air modeling, Enviro-HIRLAM.

Cite this article: Savenets M.V. Integrated view on the modern atmospheric air pollution conditions in Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (9): 80–86. <https://doi.org/10.15407/visn2023.09.080>