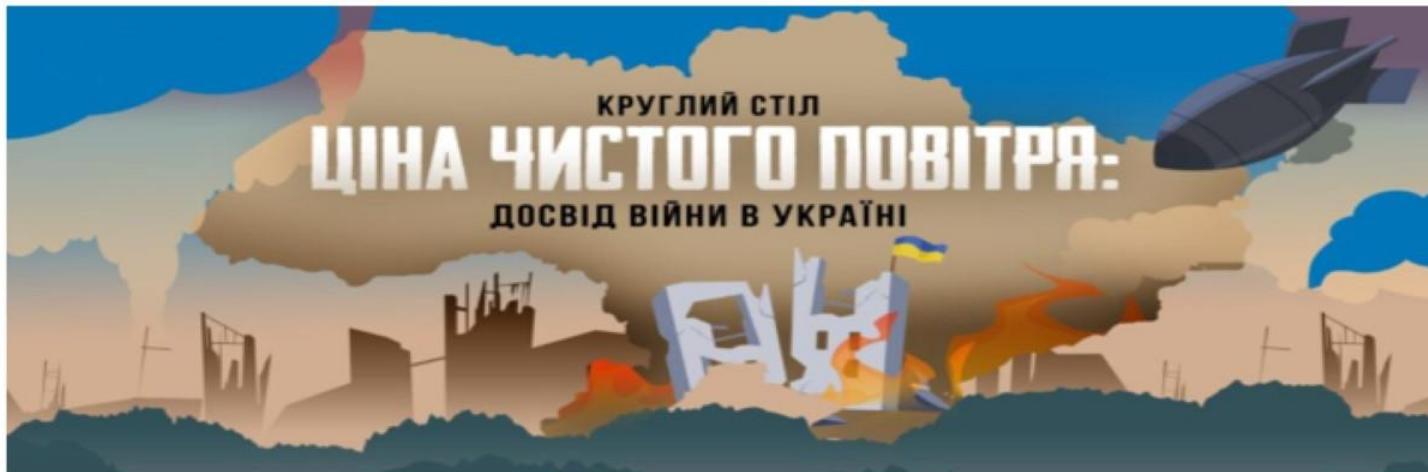




# МОНІТОРИНГ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В ОКОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ НА БАЗІ LOW-COST СЕНСОРІВ

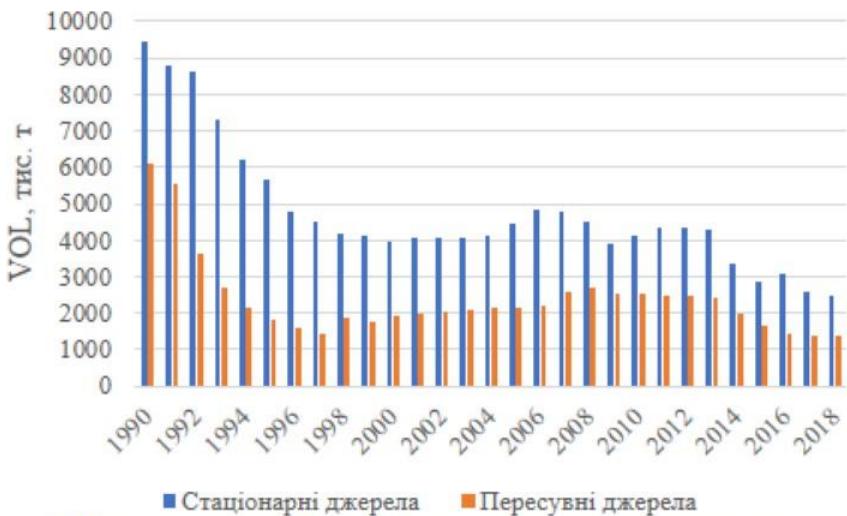


---

**Доповідач – Запорожець Артур Олександрович**, к.т.н., ст. дослідник, старший науковий співробітник відділу моніторингу та діагностики об'єктів енергетики Інституту загальної енергетики НАН України, радник EcoCity

Забруднення атмосфери стало складовою частиною сучасного життя. Основним **джерелом забруднення атмосфери** на теперішній час можна вважати **процеси горіння**, що пов'язані з діяльністю енергоємних підприємств. Домішки, що містяться в паливі, відхилення від стехіометричного складу суміші «паливо - повітря» при горінні, а також занадто висока або занадто низька температура горіння призводять до збільшення утворення таких побічних продуктів, як монооксид вуглецю, оксиди сірки і азоту, сажі і незгорілі вуглеводні. Всі ці речовини вносять вклад в забруднення атмосфери. **Енергетичні підприємства**, споживаючи близько третини видобутого палива, є істотним джерелом забруднення атмосфери.

Підвищення рівня інформативності про забруднення навколошнього повітря дозволить **попередити позаштатні ситуації на підприємствах, знизити рівень екологічного навантаження урбанізованих територій, виявити джерела надлишкового забруднення повітря, та в цілому покращити рівень життя населення.**

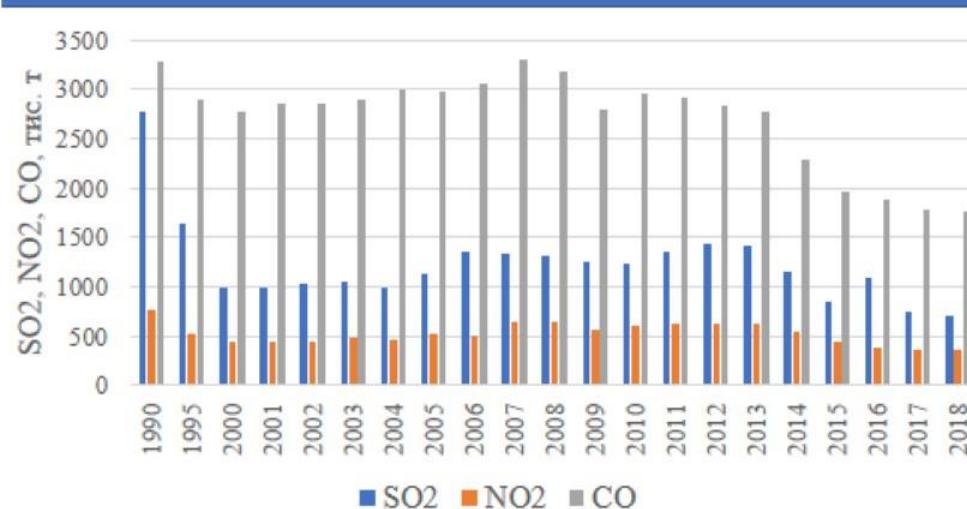


Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в період 1990-2018 рр.

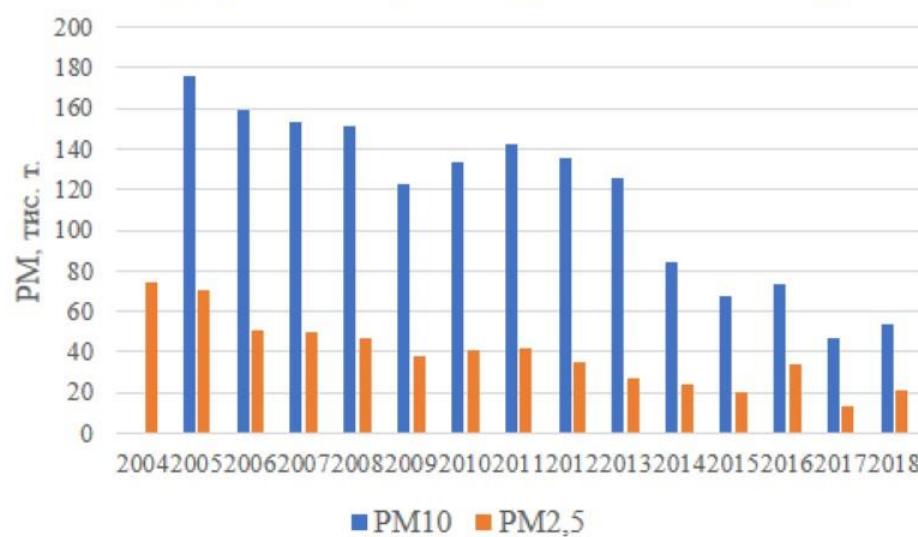


Обсяги викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря в період 2004-2018 рр.

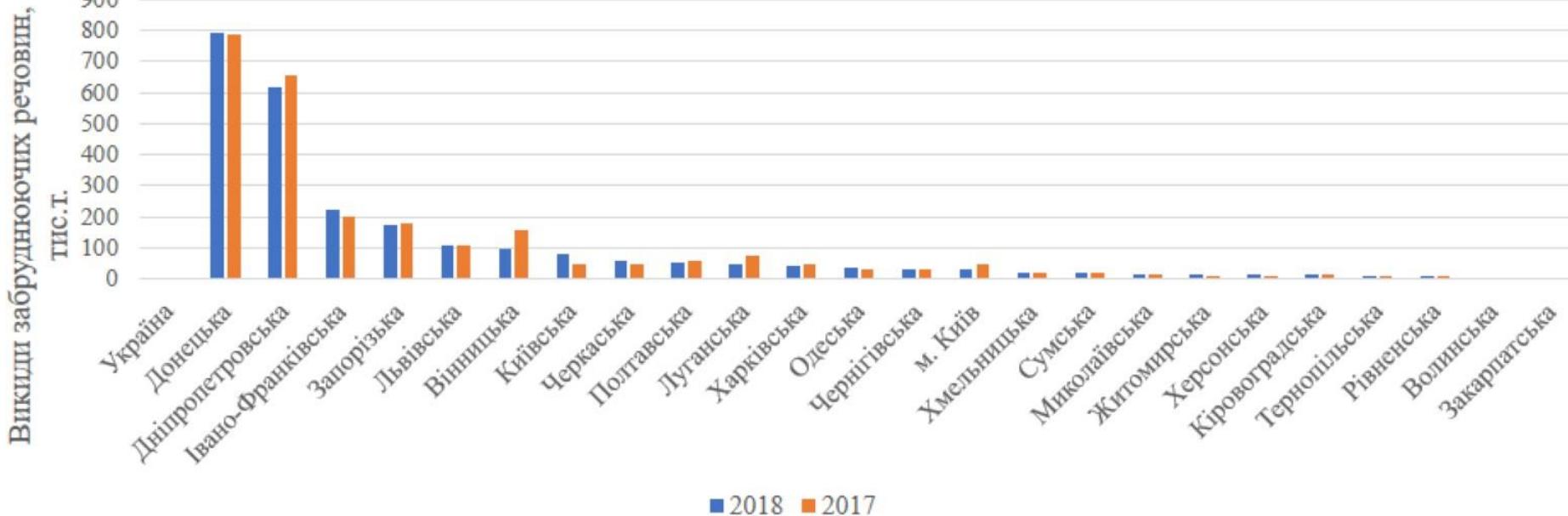
Отримані дані свідчать, що рівень забруднення повітря від стаціонарних джерел в Україні залишається значним, незважаючи на спад промислового виробництва.



Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в період 1990-2018 рр.



Викиди твердих частинок PM10 та PM2.5 протягом 2004-2018 рр.

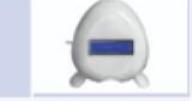


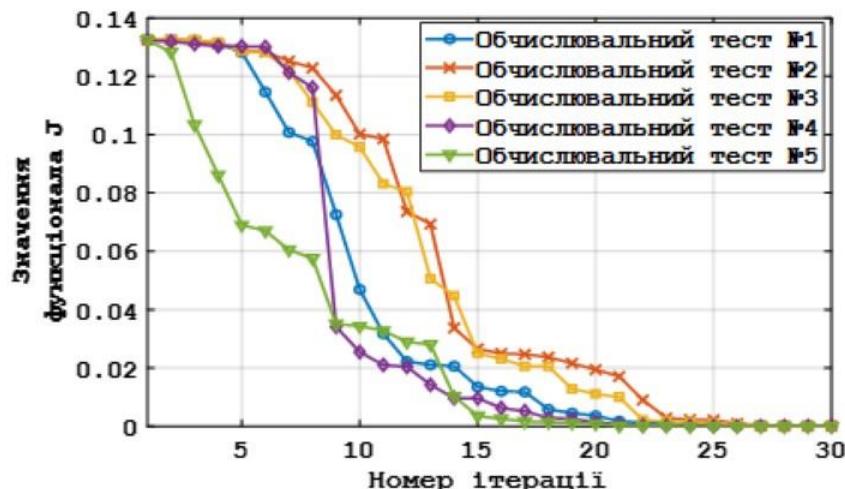
### Викиди забруднюючих речовин від стаціонарних джерел по регіонам у 2017-2018 рр.

#### Динаміка викидів забруднюючих речовин в повітря в містах України, тис. т

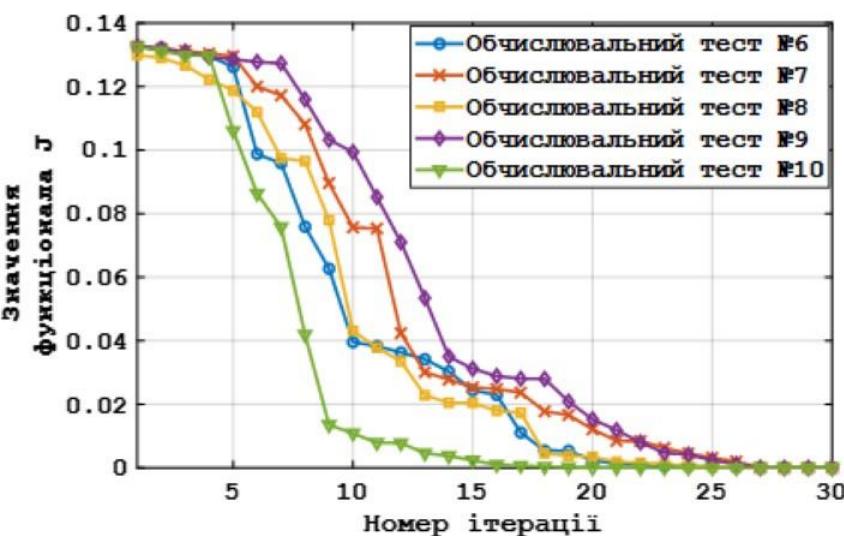
| Населений пункт | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018* | % від загалу в 2018р. |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Маріуполь       | 364,3 | 382,4 | 330,4 | 333,8 | 289,4 | 249,6 | 257,3 | 288,2 | 316,6 | 12,60                 |
| Кривий Ріг      | 395,0 | 358,6 | 354,6 | 351,8 | 327,4 | 327,0 | 342,9 | 323,9 | 267,4 | 10,7                  |
| Бурштин         | 146,8 | 198,7 | 174,7 | 182,7 | 199,8 | 198,0 | 168,5 | 160,1 | 182,9 | 7,3                   |
| Курахове        | 123,9 | 166,2 | 148,4 | 166,0 | 125,0 | 112,7 | 126,4 | 154,7 | 139,2 | 5,5                   |
| Кам'янське      | 108,5 | 124,7 | 116,4 | 115,5 | 105,0 | 101,0 | 90,5  | 57,8  | 103,3 | 4,1                   |

\*крайній період, за який доступна статистична інформація

|            | Назва               | Контролюючі забруднювачі   | Метео-параметри | Бездротовий зв'язок | Мобільність | Інтервал вим. | Ціна, тис. \$ | Фото  |
|------------|---------------------|--|-----------------|---------------------|-------------|---------------|---------------|---|
| Вітчизняні | 604EX20-С           | CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub>                         | -               | +                   | -           | 20 хв         | ~10           |    |
|            | 604EX20-П           | CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub>                         | -               | -                   | +           | 20 хв         | ~7            |    |
|            | ACEMA               | CO, C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>   | -               | +                   | -           | 20 хв         | дог.          |    |
|            | ПЕЛКЗА              | CO, C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>   | -               | +                   | +           | 20 хв         | дог.          |    |
|            | ПОСТ-2              | NO, NO <sub>2</sub> , C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , CO, O <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, пил                       | +               | +                   | -           | 1 хв          | дог.          |    |
| Закордонні | Perkin Elmer (ELM)  | PM <sub>10</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , ЛОР  | ±               | +                   | -           | 1 хв          | ~6            |    |
|            | Air Quality Egg     | PM, CO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>   | -               | -                   | +           | 1 хв          | 0,2           |    |
|            | RTI (MicroPEM)      | PM <sub>2.5</sub>  | -               | -                   | +           | 1 хв          | ~2            |   |
|            | UNI- TEC (SENS- IT) | CO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>   | -               | +                   | +           | 1 хв          | ~2,2          |  |
|            | AQMesh (v. 4.0)     | CO, NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>   | +               | +                   | -           | 1 хв          | ~10           |  |
|            | Eco-city            | PM <sub>1</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , | +               | +                   | +           | 1 хв          | ~від 0,05     |  |



Збіжність результатів в межах задачі (1) при її розв'язанні алгоритмом рою частинок (PSO) (тести 1-5)



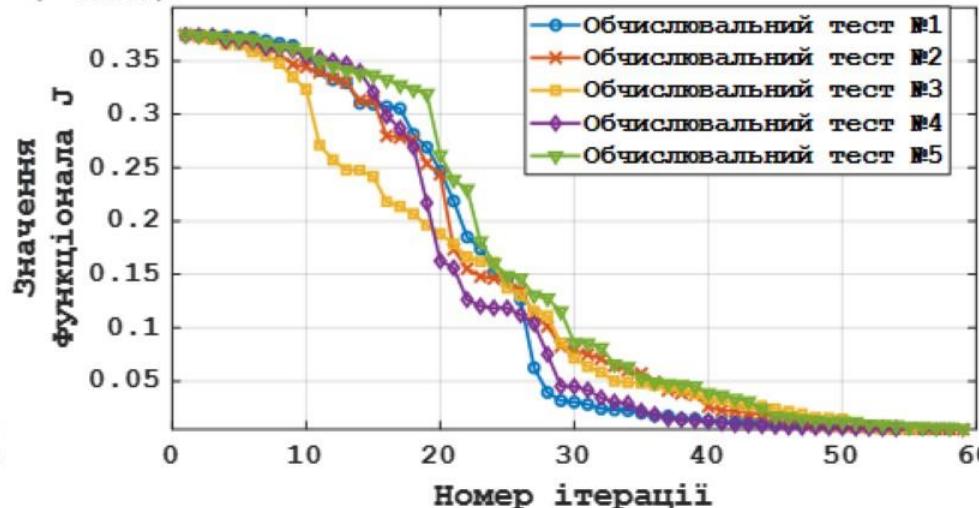
Збіжність результатів в межах задачі (1) при її розв'язанні алгоритмом рою частинок (PSO) (тести 6-10)

Перша математична модель оберненої задачі (1) (визначення висоти труби джерела забруднення та максимальної концентрації викидів):

$$J \begin{pmatrix} z_{Source}, \\ C_{Source} \end{pmatrix} = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left( C_{DataSensor}(C_{Source}(x_{Source}, z_{Source}), t) - C_{DataSensor}(t) \right)^2 dt.$$

Друга математична модель оберненої задачі (2) (визначення місця розташування труби джерела забруднення та максимальної концентрації викидів на ньому)

$$J \begin{pmatrix} x_{Source}, \\ z_{Source}, \\ C_{Source} \end{pmatrix} = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left( C_{DataSensor}(C_{Source}(x_{Source}, z_{Source}), t) - C_{DataSensor}(t) \right)^2 dt.$$



Збіжність результатів в межах задачі (2) при її розв'язанні алгоритмом рою частинок (PSO)

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КНП

Парціальна густина кисню

$$\begin{cases} PV = \text{const} \\ V / T = \text{const} \\ P / T = \text{const} \rightarrow E_{O_2} = M_{O_2} \cdot \frac{P - e}{R \cdot T} \\ PV = \nu RT \end{cases}$$

Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation :

$$e = \phi \cdot p_{\text{нac}},$$

$$p_{\text{нac}}(P, T') = f(P) \cdot r(T');$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} P - 0,074 \cdot P^{-1};$$

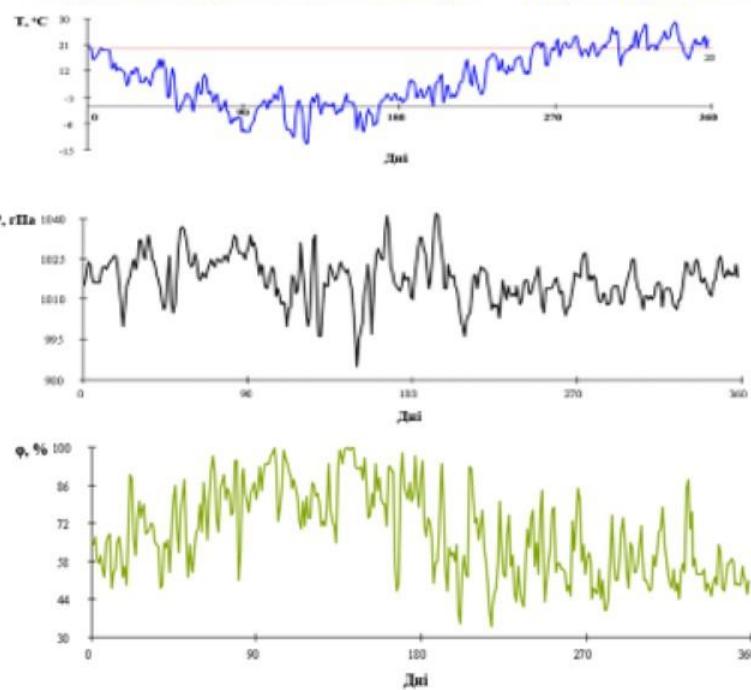
$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62T'}{243,12+T'}},$$

$$[\text{O}_2] = \frac{6,236 \cdot E_{O_2} \cdot T}{P' \cdot M_{O_2}} \pm \Delta[\text{O}_2]$$

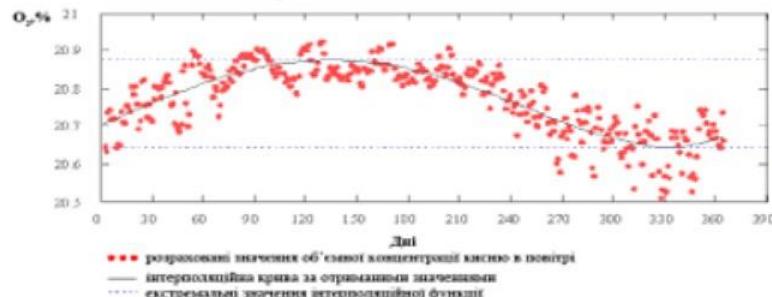
→

Об'ємна концентрація кисню в повітрі

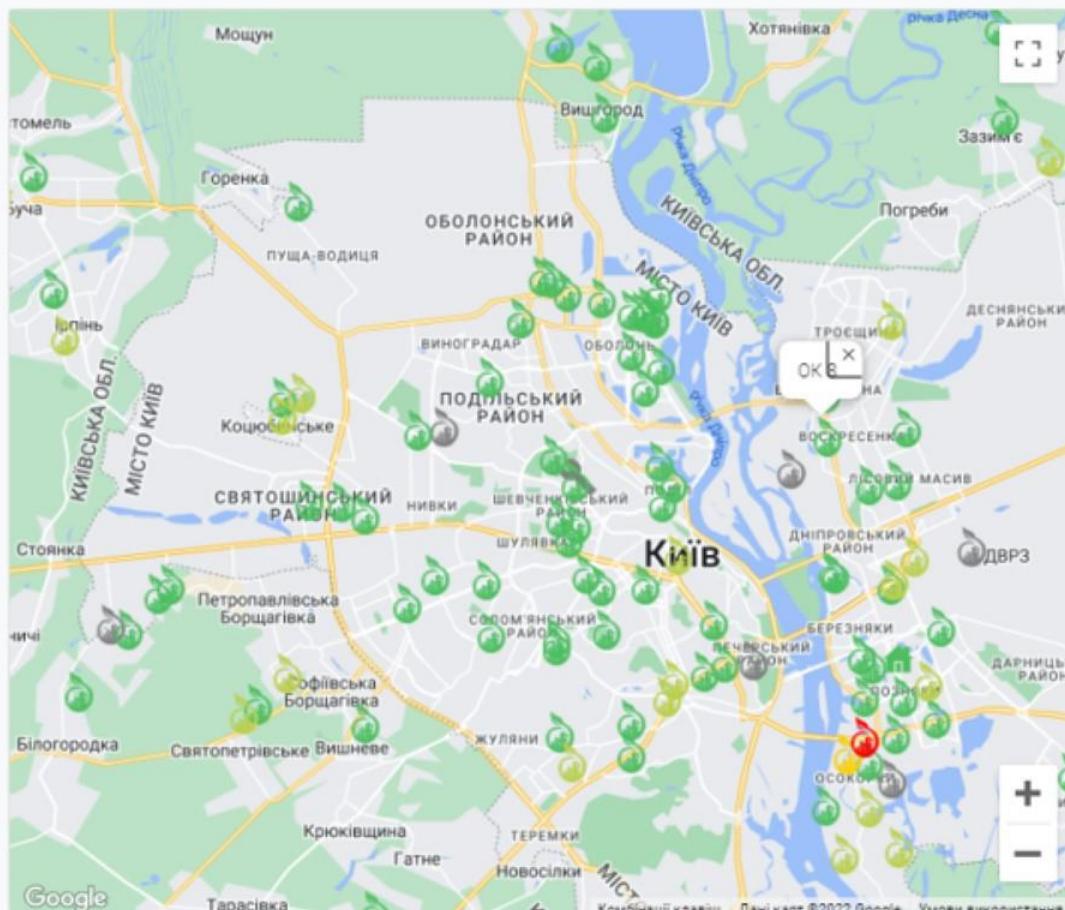
Сезонна зміна основних метеорологічних параметрів в м. Києві станом на період вересень 2014р. – серпень 2015р.



Розрахункова зміна концентрації кисню в повітрі на території м. Києва в період з вересня 2014р. по серпень 2015р.



## Карта станцій



Машини часу поточні показники станцій

Встанови карту забруднення повітря на смартфон. Відстежуй повітря у своєму регіоні.

Відстежувати

OK 8

## Станні зовнішнього встановлення

Актуальність на: 26/09 19:00:39

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Пил 2.5 мкм<br>PM2.5         | 10.59 мкг/м <sup>3</sup> |
| Пил 10 мкм<br>PM10           | 16.46 мкг/м <sup>3</sup> |
| Температура<br>Temperature   | 16.31 °C                 |
| Вологість<br>Humidity        | 62.52 %                  |
| Атмосферний тиск<br>Pressure | 747.16 мм.рт.ст.         |

AQI Індекс якості повітря 44 балів

Погода Київ  
14.46°C 83% 747мм.рт.ст.

Дані надано:  
**Осокорки Клуб**

Основорки.клюб

Парціальна густина кисню: 272г./м<sup>3</sup>

Поділитися результатом в соцмережах:



Система контролю проводить вимірювання та накопичує деяке поле даних  $K$ . Із даного поля  $K$  можна виділити певний об'єм даних, що характеризується прямокутною матрицею  $A$  розмірністю  $m \times n$ :

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}.$$

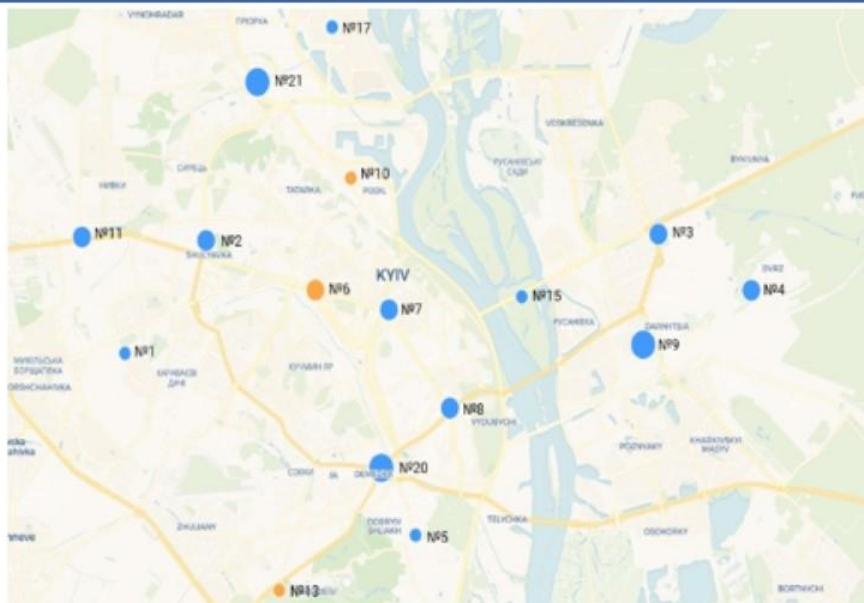
Нехай  $m$  величин  $y_1, y_2, \dots, y_m$  виражаються лінійно та однорідно через  $n$  інших величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n, \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n, \\ \dots \\ y_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n, \end{cases}$$

Ця система рівнянь може бути скорочена до наступного виразу:

$$y_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}x_k, i = 1, 2, \dots, m.$$

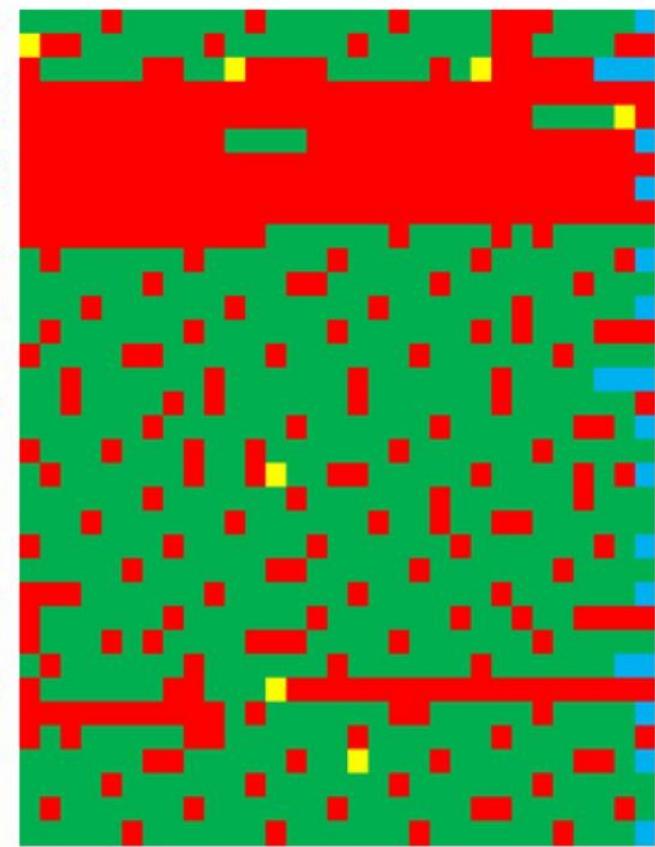
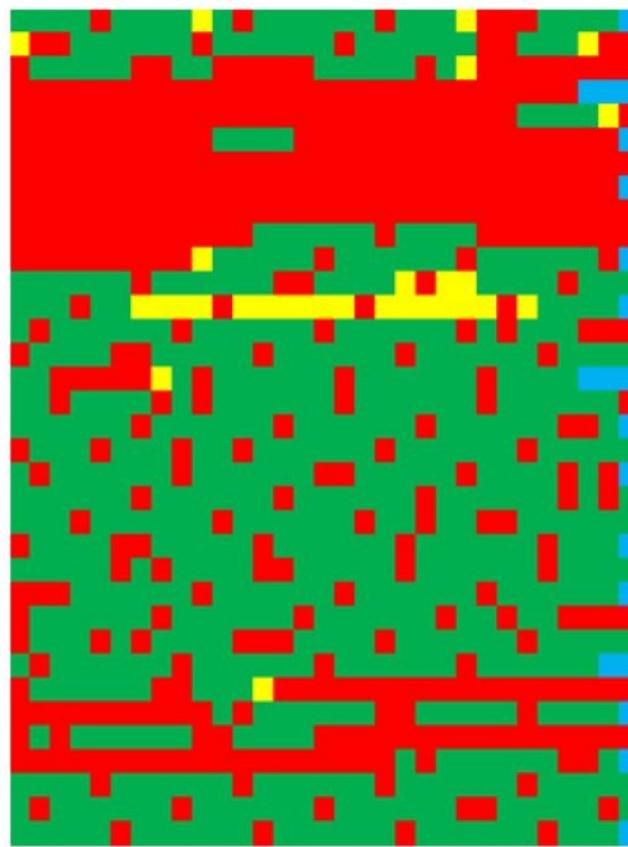
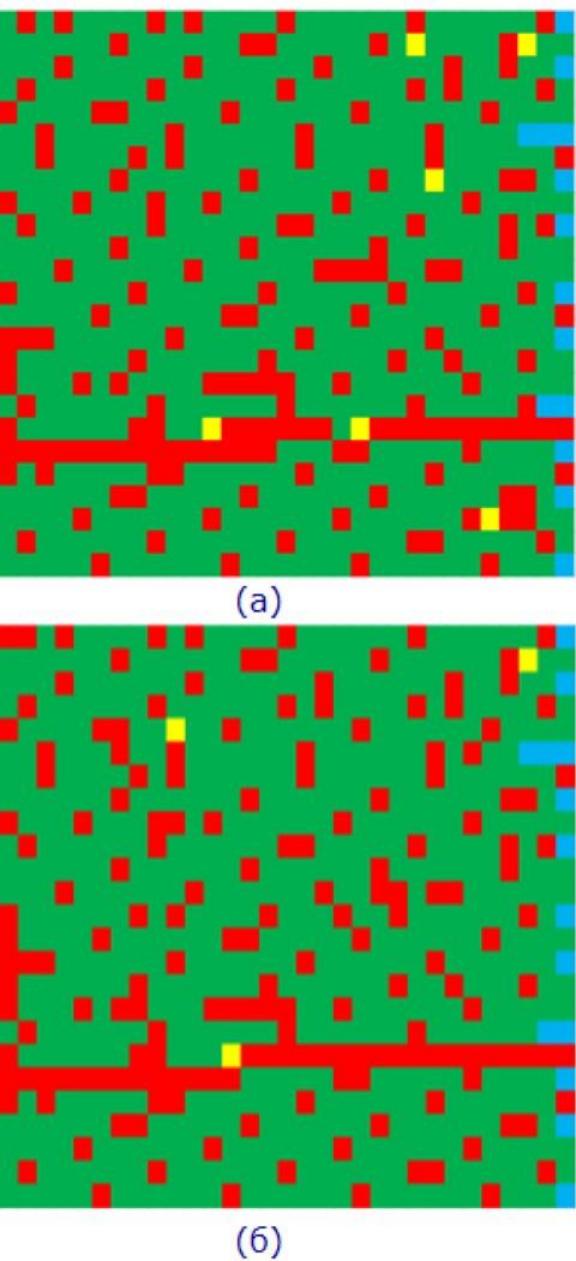
Елементи лінійного перетворення величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  до величин  $y_1, y_2, \dots, y_m$  однозначно визначають матрицю  $A$  та навпаки. Таким чином, елементи матриці  $A$  можуть формувати однозначну властивість (характеристику) заданого об'єкта (наприклад, рівень інформативності окремої вимірювальної станції чи системи моніторингу в цілому). Це дає змогу аналізувати об'єкти однакової розмірності та порівнювати їх властивості між собою. Також за допомогою такої матриці можна сформувати профіль забруднення атмосферного повітря визначеної локації.



**Розташування постів спостереження системи моніторингу забруднення повітря**

### Параметри постів

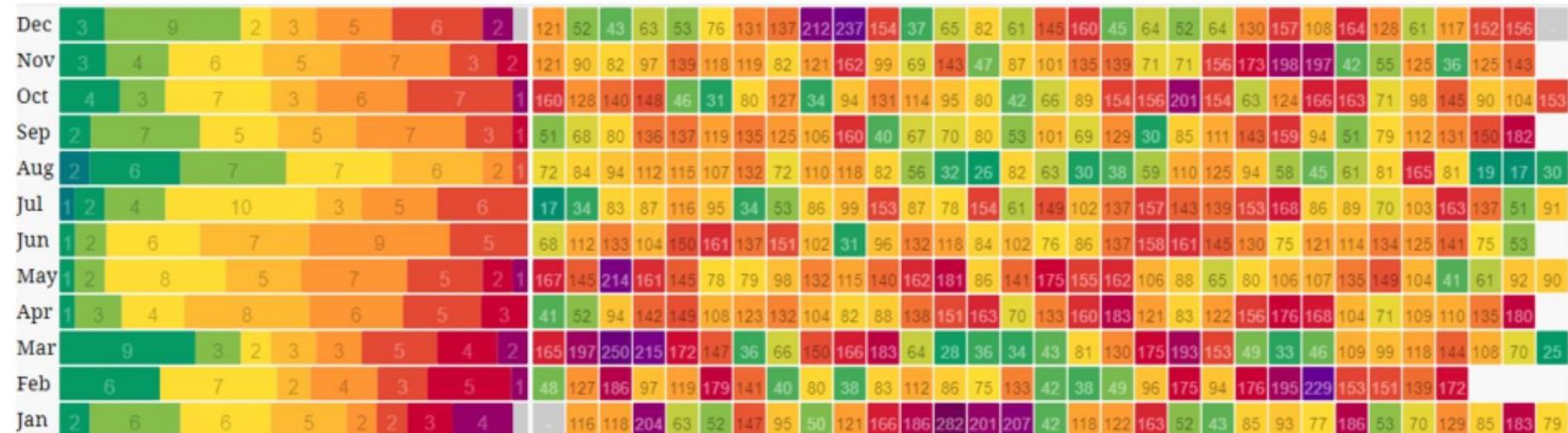
| №  | Параметри   | Час початку спостережень |
|----|---|--------------------------|
| 3  | PM, SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> O                           | Серпень 2018             |
| 5  | PM, SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> O                           | Серпень 2018             |
| 7  | PM, SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , HF, HCl, CH <sub>2</sub> O                  | Жовтень 2017             |
| 20 | PM, SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , NO, HF, NH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> O | Жовтень 2017             |



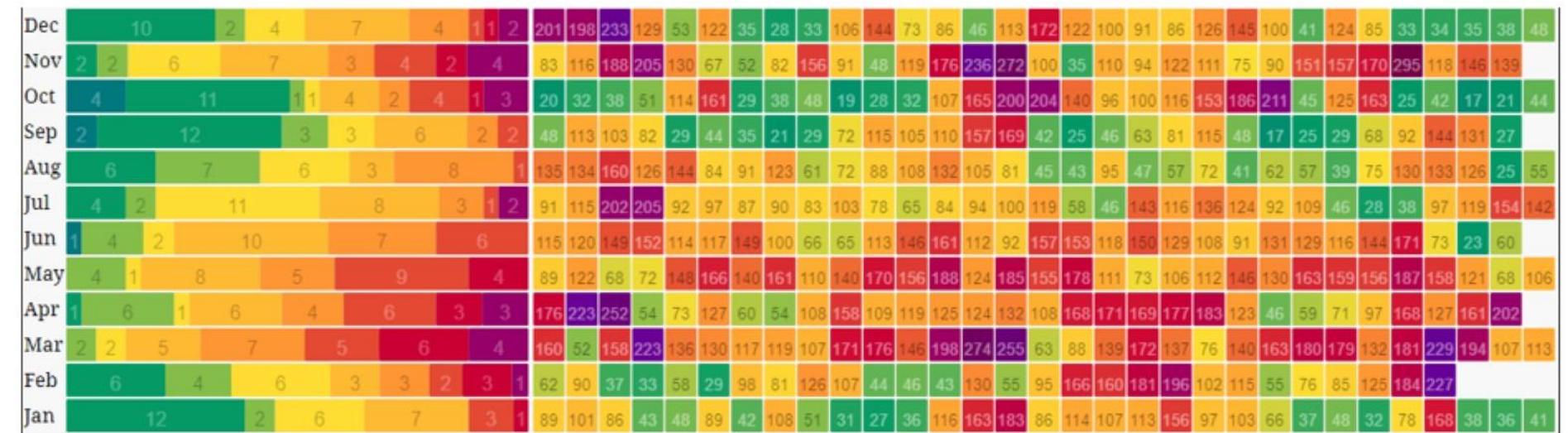
← ↑  
Матриці рівня  
інформативності  
досліджуваних постів:  
а) 3; б) 5; в) 7; г) 20

#### Характеристики груп даних

| № | Параметр | Значення параметру                       | Колір    |
|---|----------|--|----------|
| 1 | 3        | Отримано 100% запланованих даних         | Зелений  |
| 2 | 2        | Отримано даних в межах $0 < x < 100$ (%) | Жовтий   |
| 3 | 1        | Дані не отримано                         | Червоний |
| 4 | 0        | Дати не існує                            | Синій    |

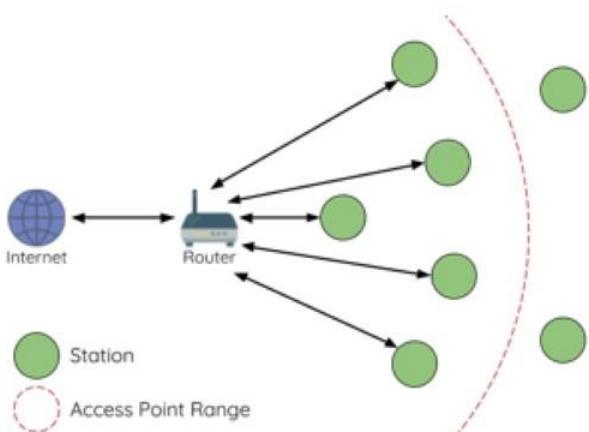


(a)

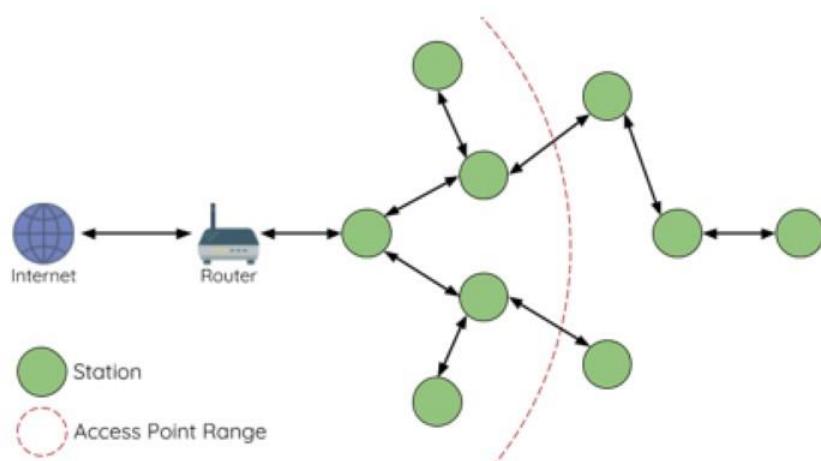


(6)

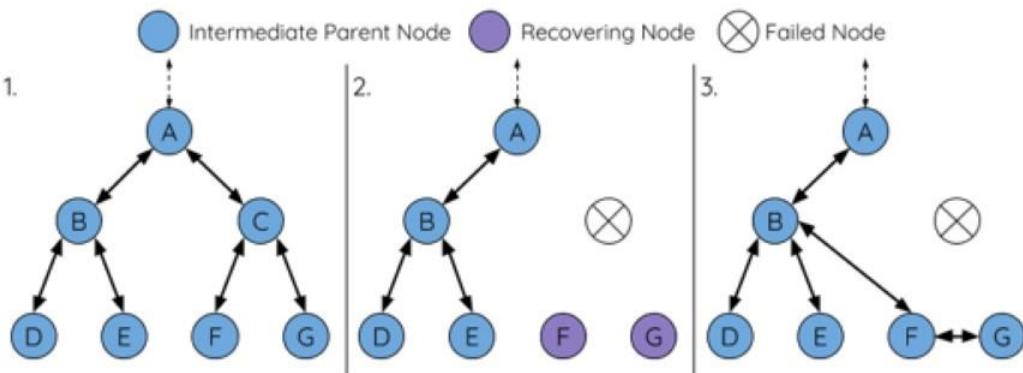
Порівняння матриць (профілів) забруднення за параметром AQI:  
а) 2020; б) 2021



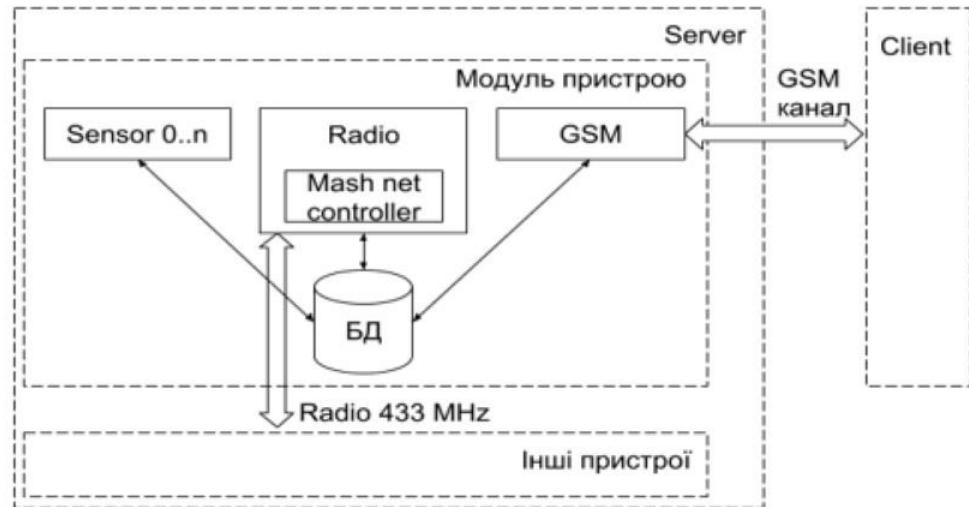
**Типи архітектур мережі – WiFi (зверху) та Mesh (знизу)**



### Зміна напряму потоку інформації при відмові master-модулю



**Функціональна схема вимірювального модулю системи як елемента Mesh-мережі**





## Технічні характеристики

| Параметр                 | Значення   |
|--------------------------|--|
| РМ сенсор                | PMS 5003 та/або SDS011   |
| Метео-сенсори            | BME 280, DHT-22, 3x DS18b20  |
| Підтримка інших сенсорів | <ul style="list-style-type: none"> <li>• формальдегіди (<math>\text{CH}_2\text{O}</math>)</li> <li>• монооксид карбону (CO)</li> <li>• діоксид карбону(<math>\text{CO}_2</math>)</li> <li>• діоксид нітрогену (<math>\text{NO}_2</math>)</li> <li>• озон (<math>\text{O}_3</math>) та ін.</li> </ul> |

**Призначення:** моніторинг забруднення повітря об'єктами енергетики

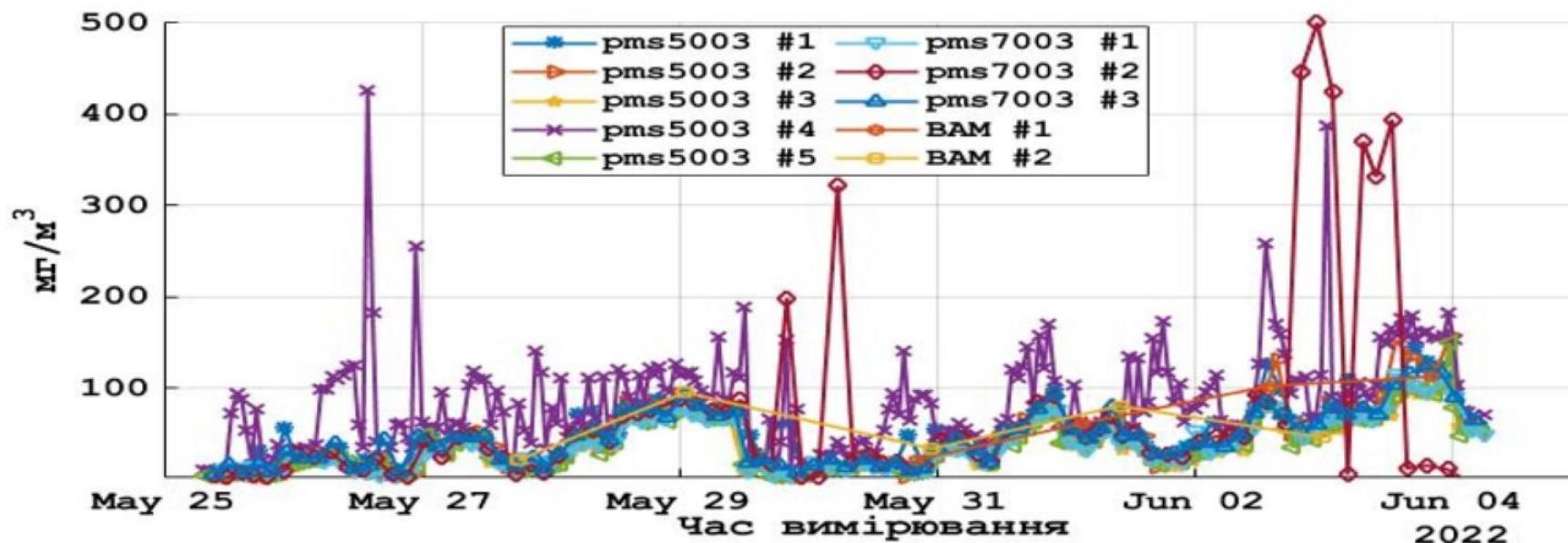
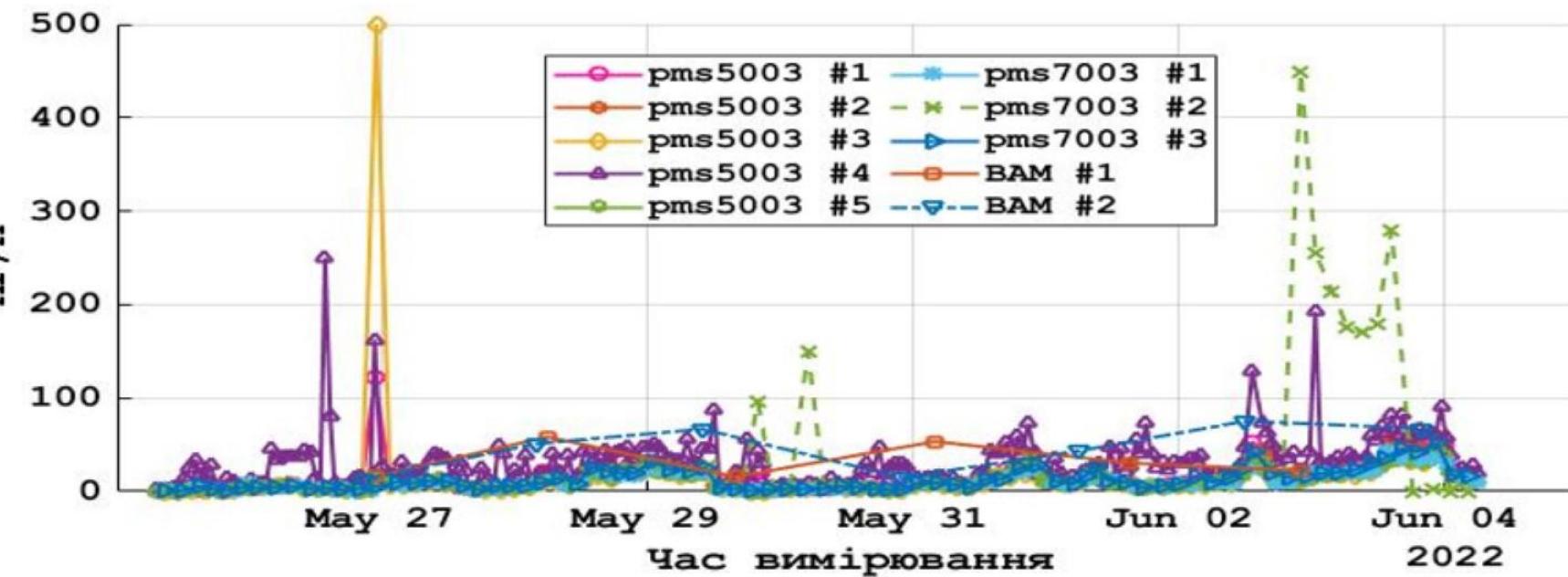
**Сфера застосування:** результати контролю можуть бути застосовані на підприємствах комунальної та промислової енергетики, а також в проектних організаціях при розробленні практичних рекомендацій щодо зниження викидів забруднюючих речовин в навколишній простір енергетичними установками

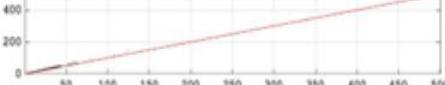
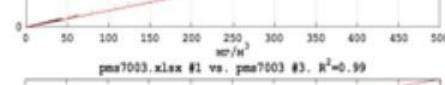
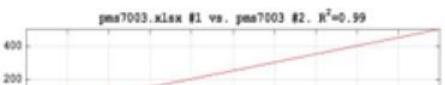
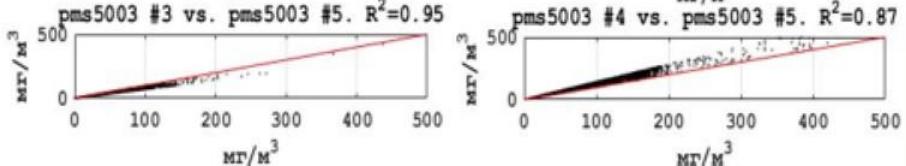
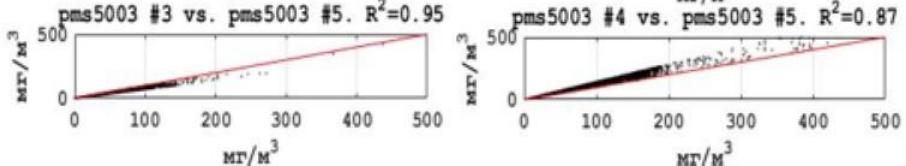
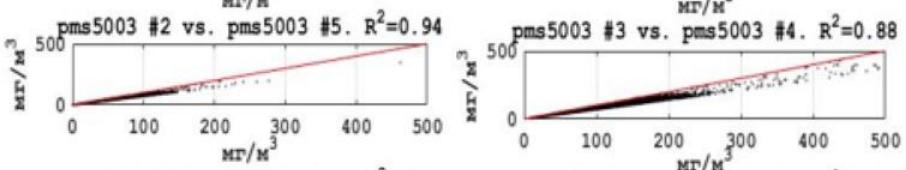
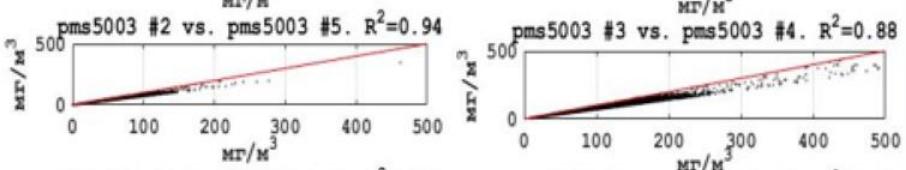
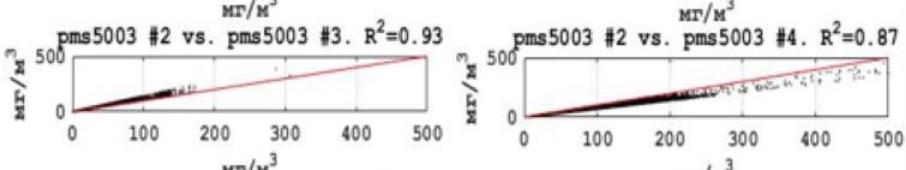
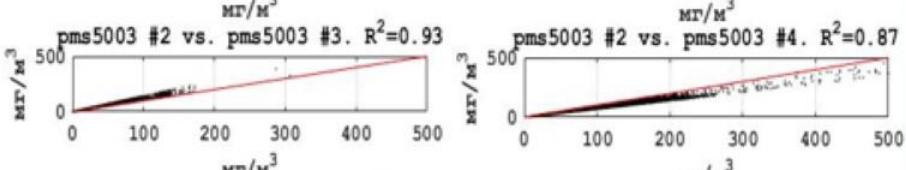
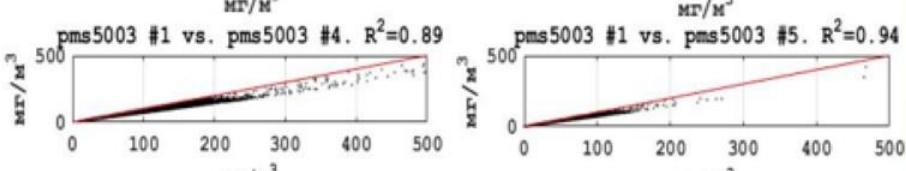
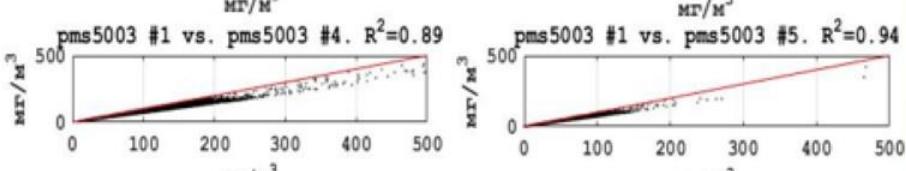
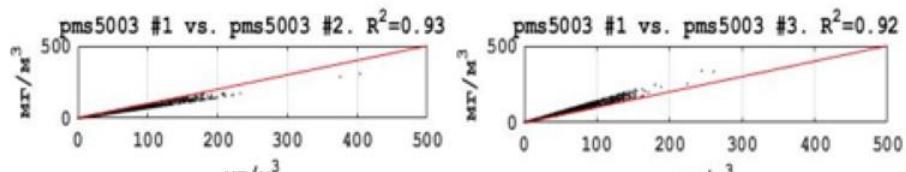
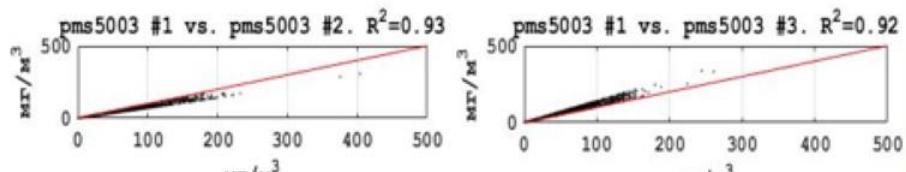
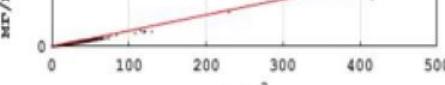
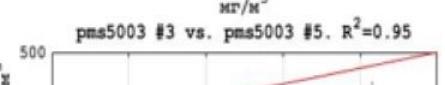
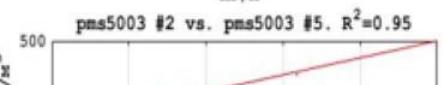
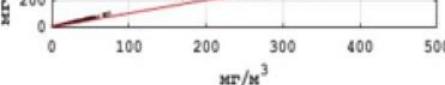
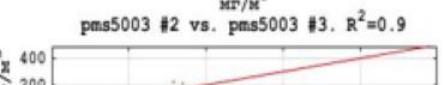
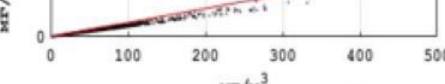
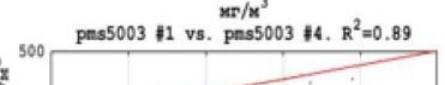
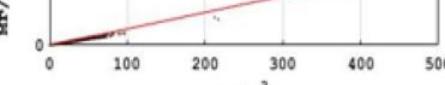
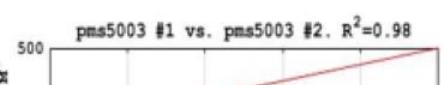
## Переваги:

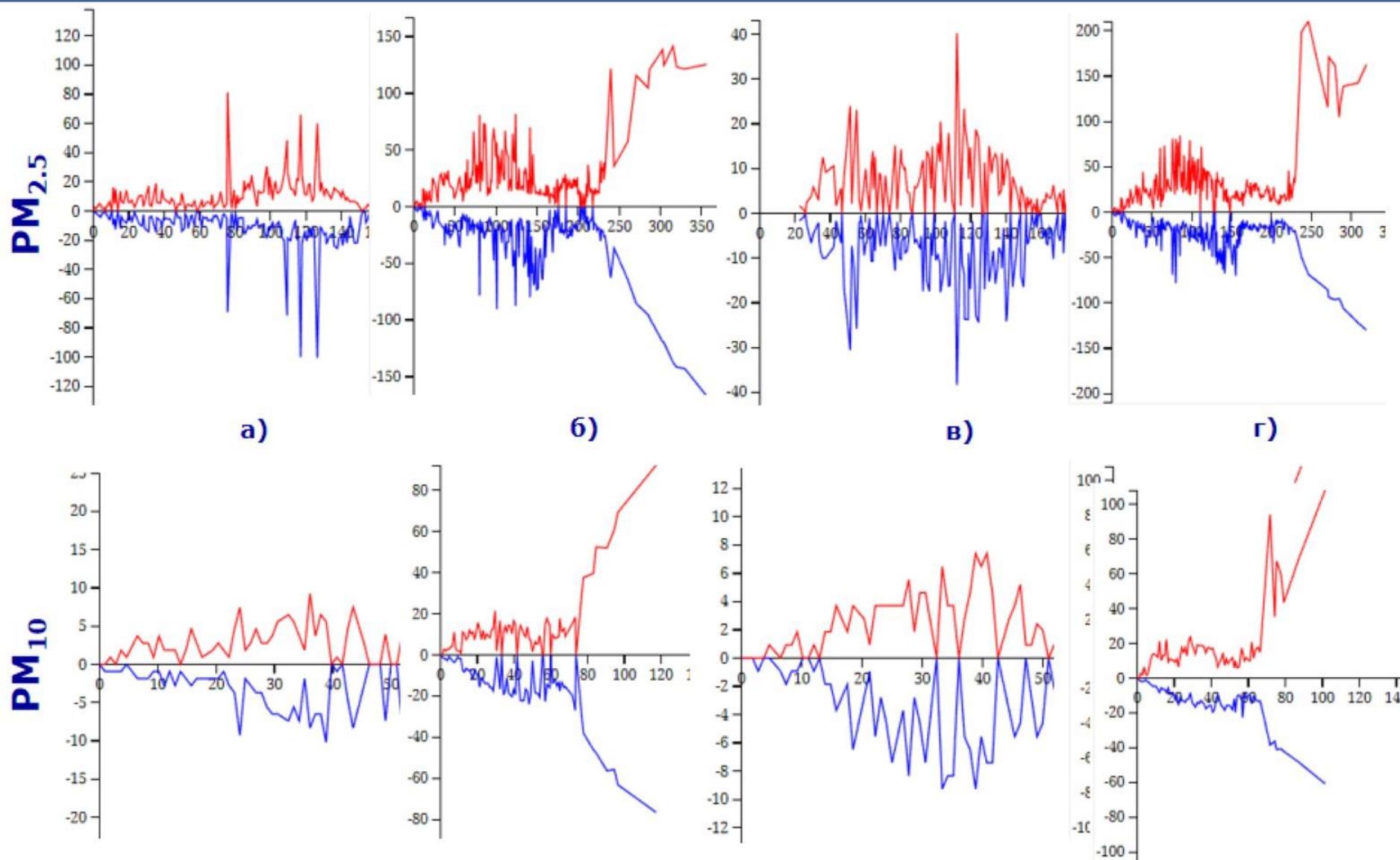
- відповідає міжнародним стандартам високого рівня

## Впроваджено:

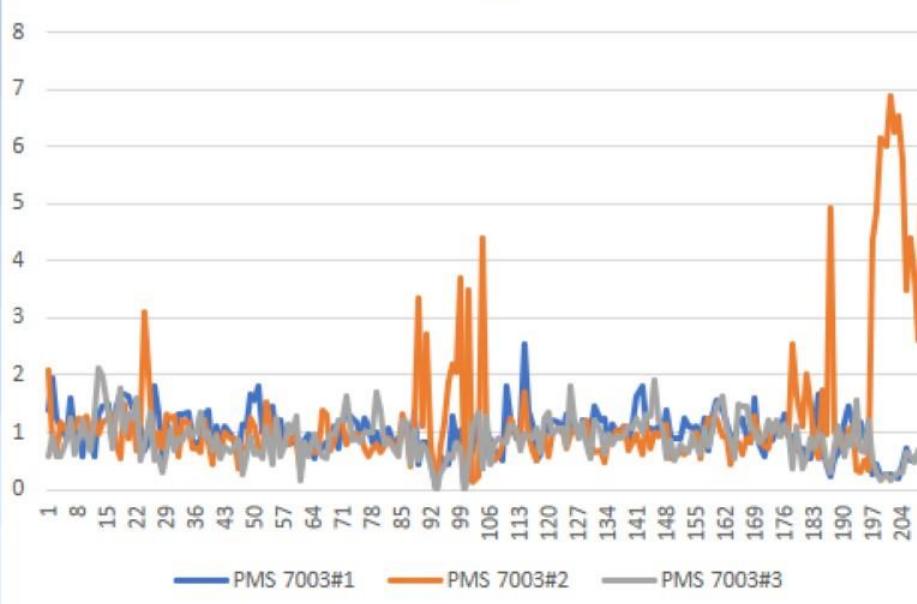
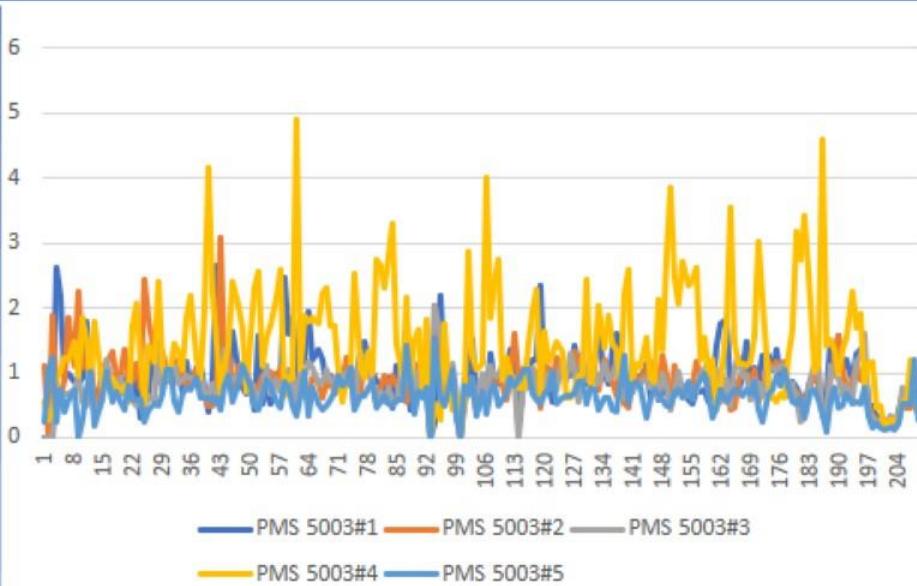
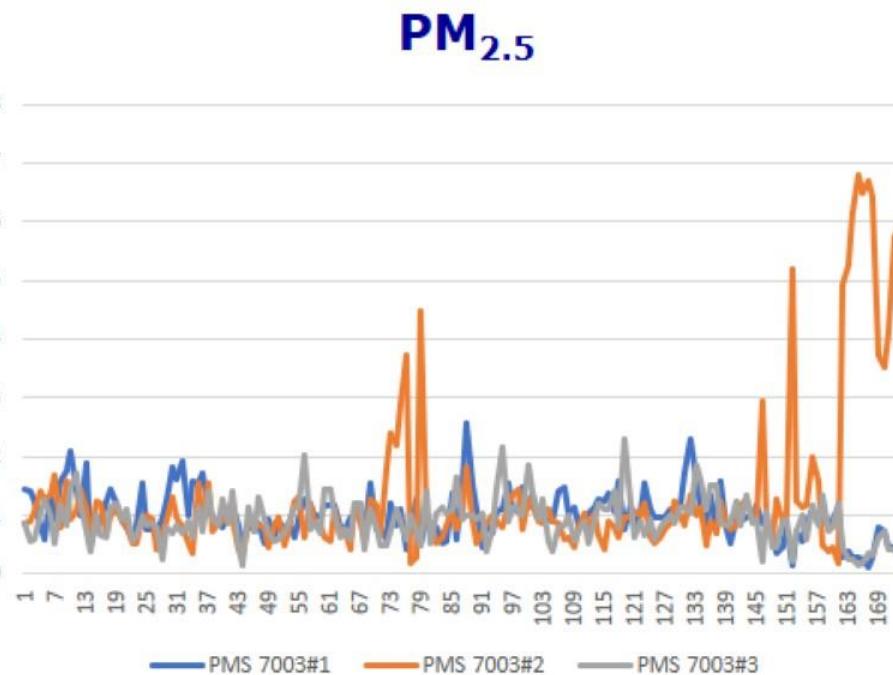
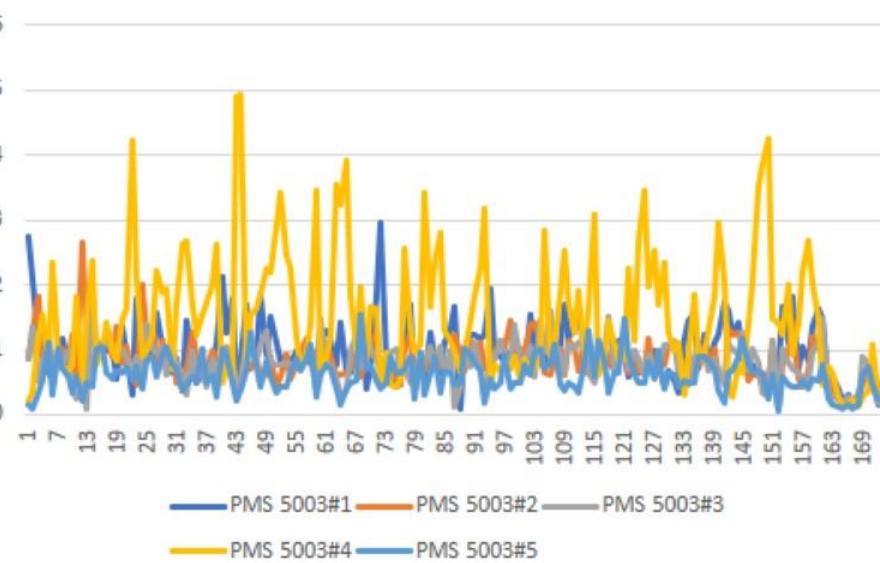
Результати роботи впроваджені в Національному авіаційному університеті (м. Київ )

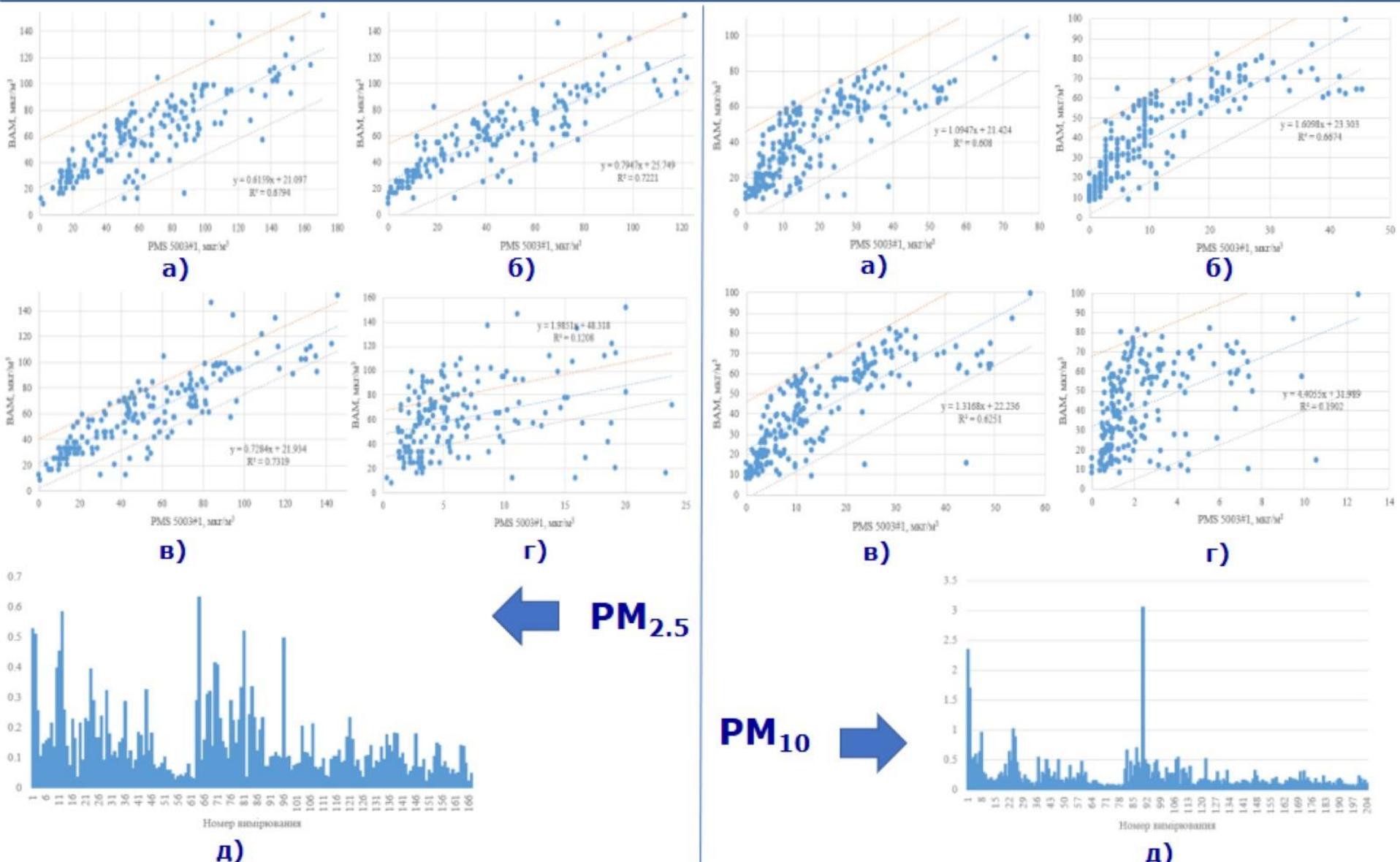
**PM<sub>2.5</sub>****PM<sub>10</sub>**

**PM<sub>2.5</sub>****PMS 7003** →↓ **PMS 5003****PM<sub>10</sub>**← **PMS 7003**↓ **PMS 5003**



Значення розмаху (R) для різних груп сенсорів: а) PMS 5003 (#1,2,3); б) PMS 5003 (#1,2,3,4), в) PMS 7003 (#1,2,3); г) PMS 5003 (#1,2,3,4) та PMS 7003 (#1,2,3)





Залежності деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ) від еталонних вимірювань та значення коефіцієнта варіації (д)

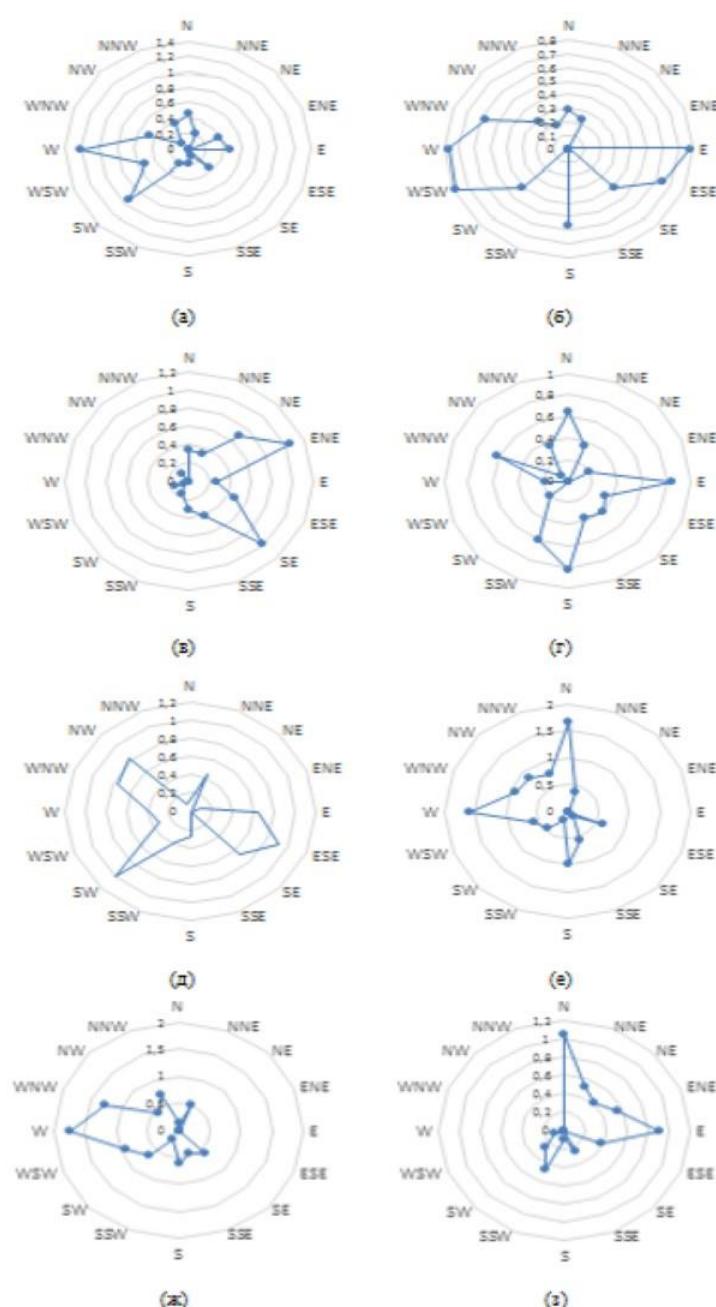


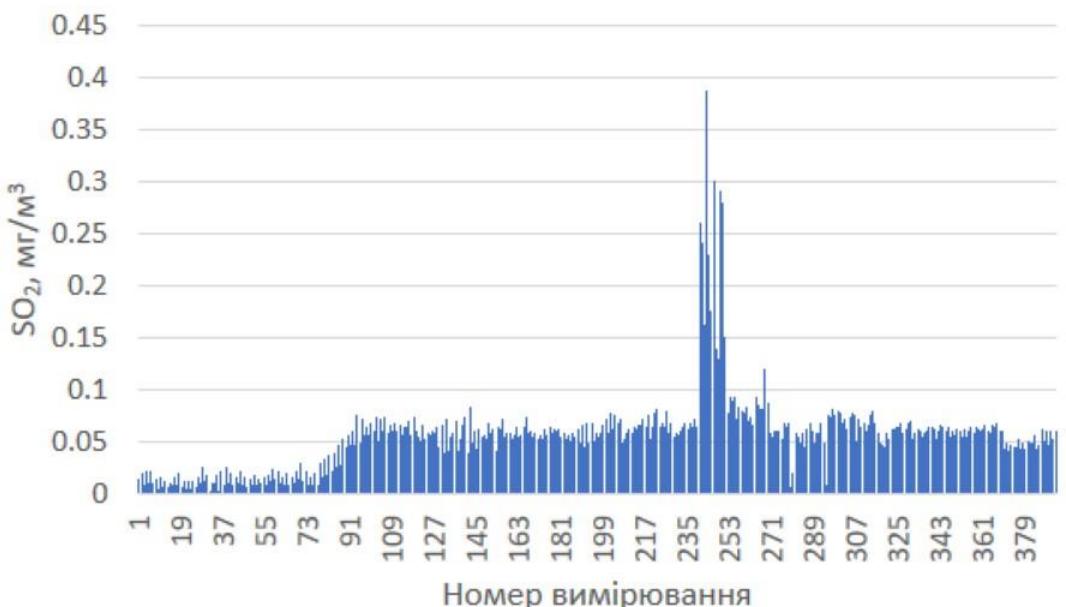
**Значення прямих вимірювань концентрації діоксиду нітрогену в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно**



**Розподіл концентрацій діоксиду нітрогену згідно 16-променевої рози вітрів в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р.:**

- а) вересень 2018 р.; б) жовтень – 2018 р.; в) листопад 2018 р., г) грудень 2018 р.; д) січень 2019 р.; е) лютий 2019 р.; ж) березень 2019 р.; з) квітень 2019 р.



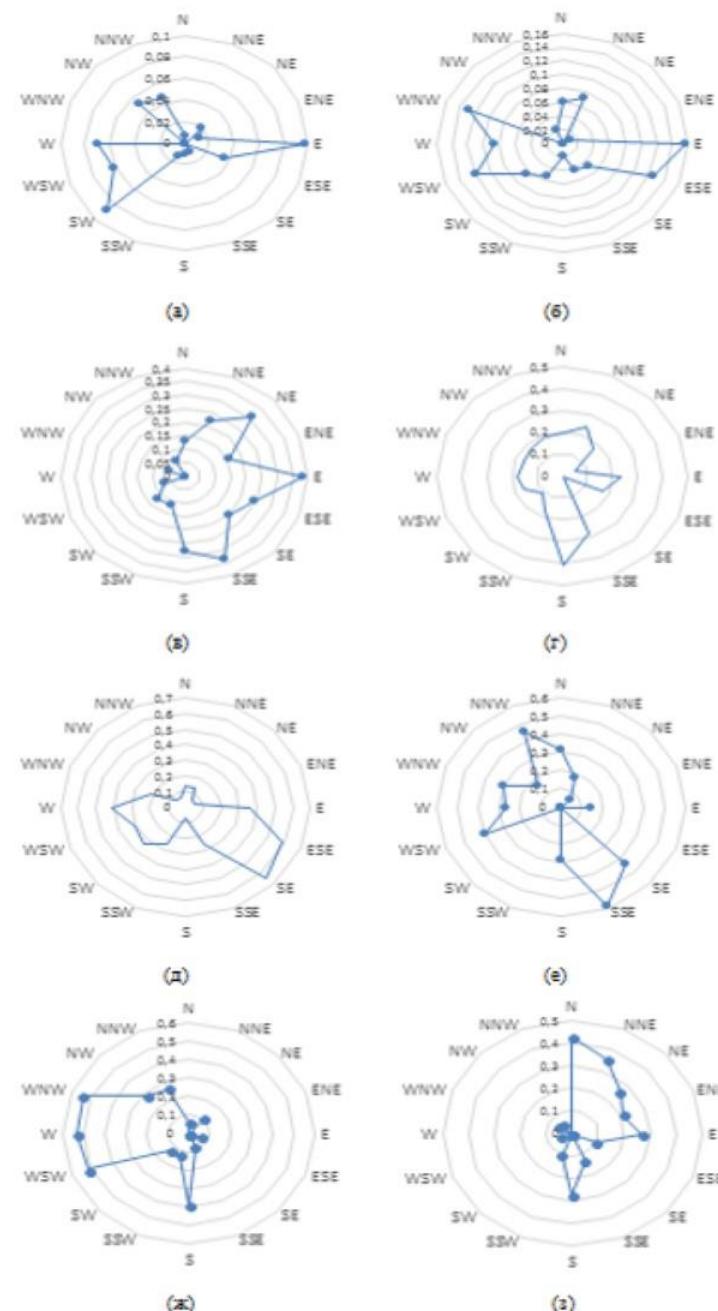


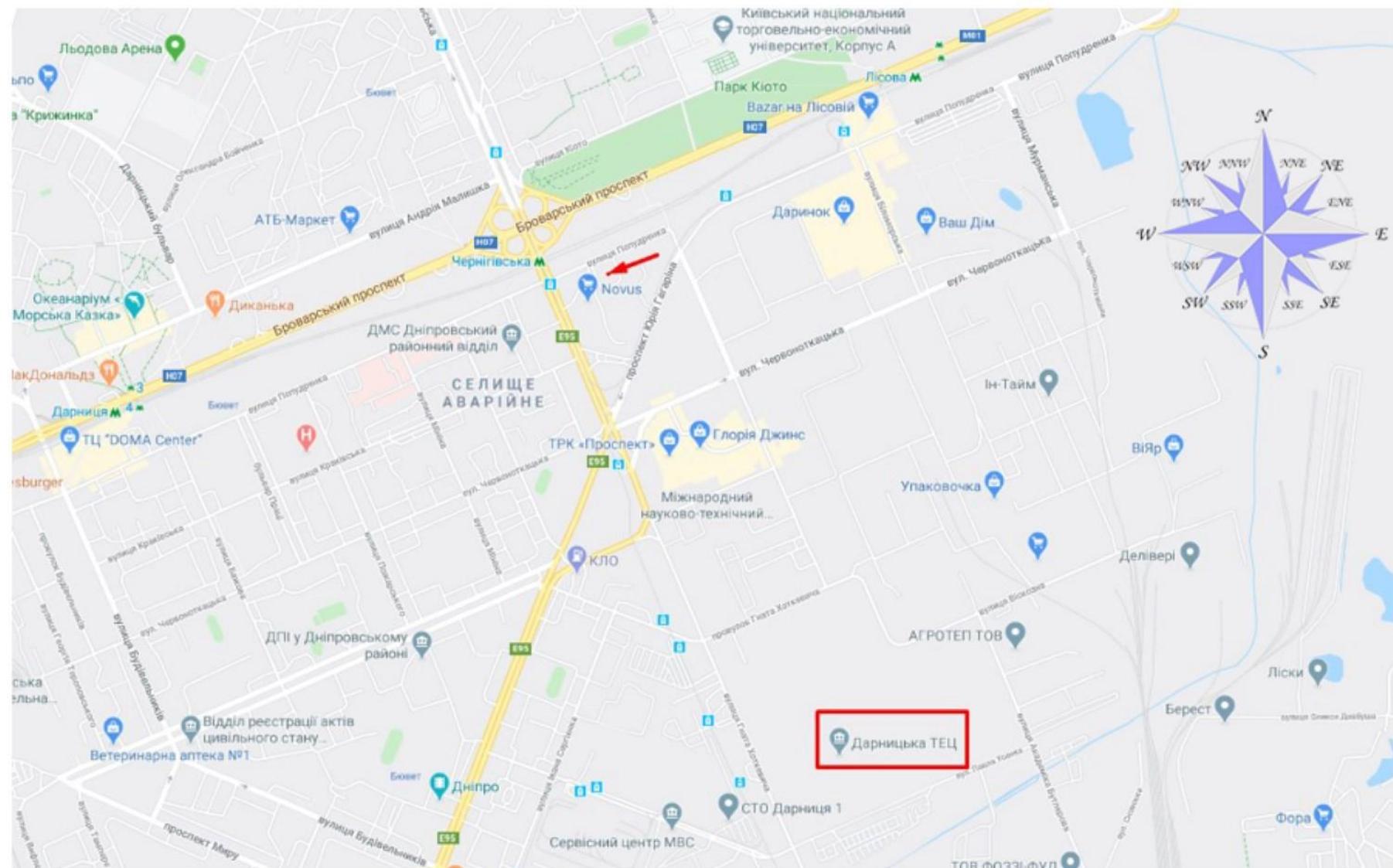
**Значення прямих вимірювань концентрації діоксиду сірки в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно**



**Розподіл концентрацій діоксиду сірку згідно 16-променевої рози вітрів в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р.:**

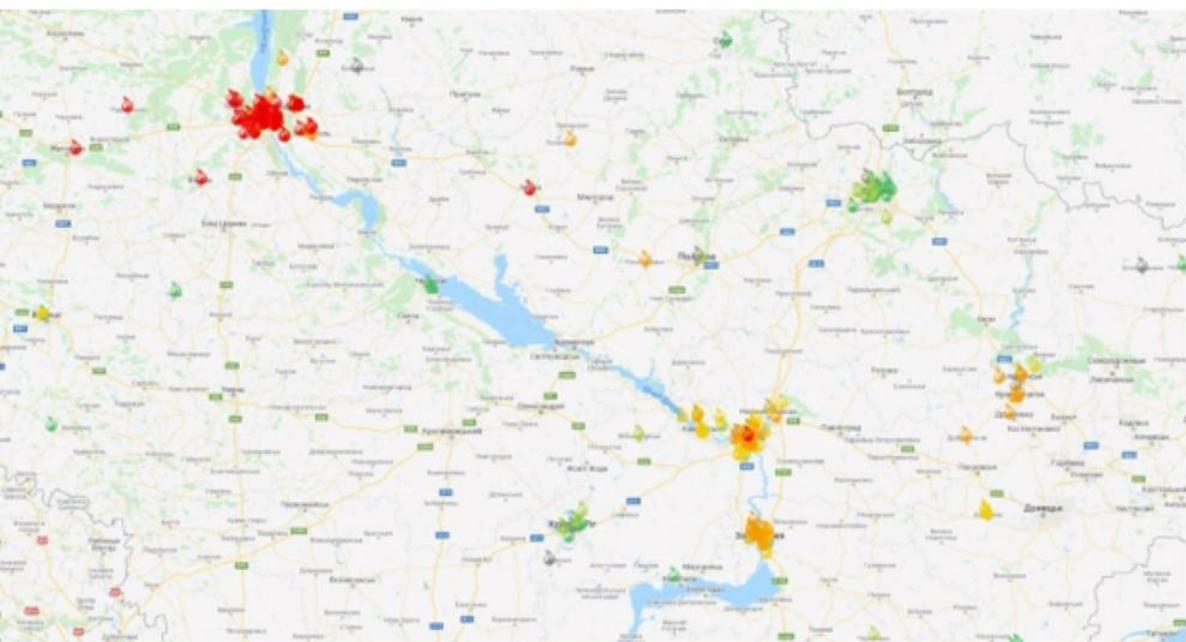
- а) вересень 2018 р.; б) жовтень – 2018 р.; в) листопад 2018 р., г) грудень 2018 р.; д) січень 2019 р.; е) лютий 2019 р.; ж) березень 2019 р.; з) квітень 2019 р.



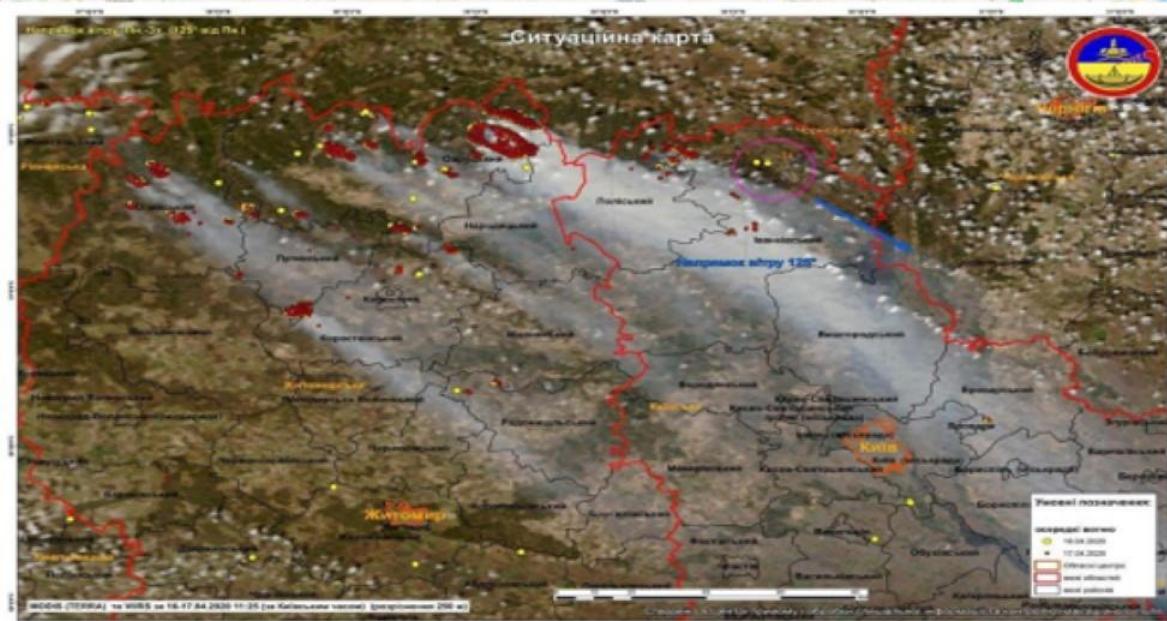
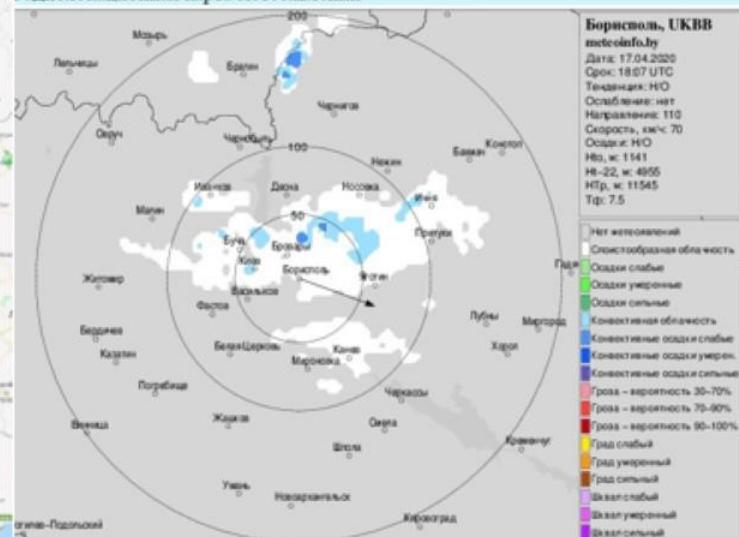


\*аналіз показав наявність різних джерел забруднення у різні місяці розглянутого періоду часу. Потрібно відмітити про значне зростання концентрації діоксиду сірки в період з листопада 2018 р. по лютий 2019 р. згідно діапазону напрямів S-SE, що свідчить про функціонування об'єкту енергетики (Дарницької ТЕЦ) в зазначений період

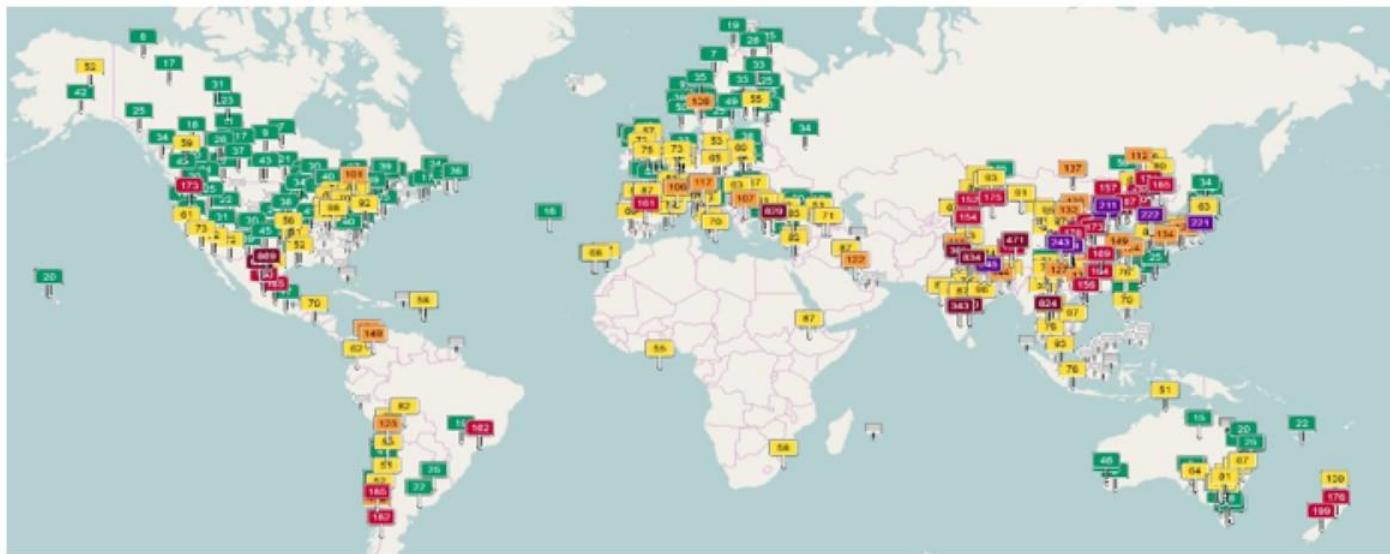
## Концентрація РМ в повітрі 17.04.2020

Дані метеорадару аеоропорту  
Бориспіль

Радар UKBB — ДМРЛ Бориспіль. Київ, Україна  
Радіолокаціонна карта метеоявленій



**Фото локалізації джерел забруднення, отримане за допомогою космічних систем дистанційного зондування Землі  
(фото Національного космічного агентства)**

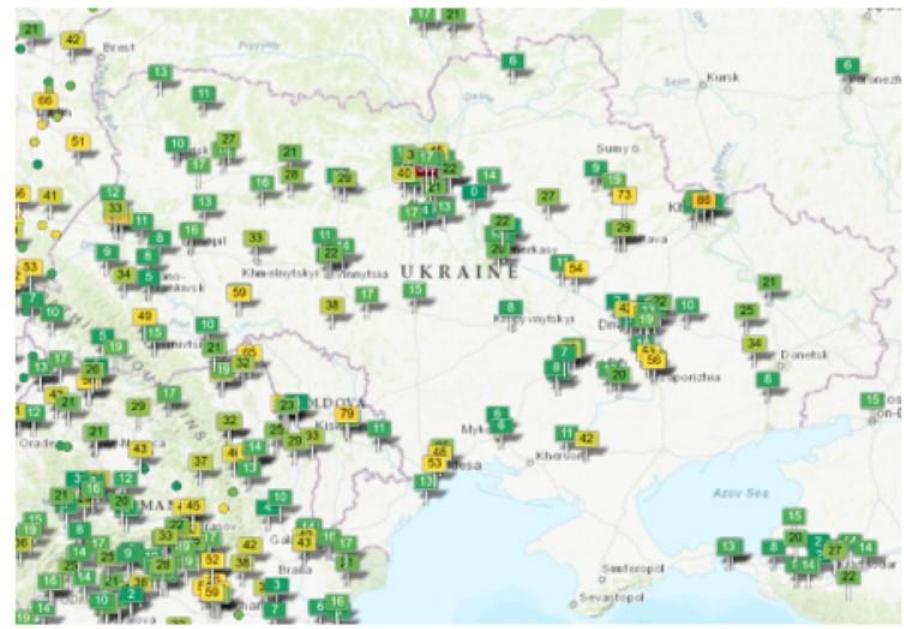


2017 - 0



AQICN

2022 - >200



WAQI



Відділ моніторингу і діагностики об'єктів енергетики  
м. Київ, вул. Антоновича, 172

тел. (044)-294-67-28  
e-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

---

27 вересня 2022 р.  
м. Київ