

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕННЯ МАГІСТРА**

на тему:

Дослідження стану навколишнього середовища  
з використанням Google Earth Engine

Лініченко Тетяна Миколаївна

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних технологій та управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ проф., д.т.н Карпінський Ю. О.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 року

**ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕННЯ МАГІСТРА**

Дослідження стану навколишнього середовища

з використанням Google Earth Engine

Виконала студентка групи зГІСТм-23

193 «Геодезія та землеустрій»

Геоінформаційні системи і технології

Лініченко Тетяна Миколаївна

Керівник Плющ Т.М.

*Ідентичність підтверджую*

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПШ»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Декан факультету

\_\_\_\_\_ доцент., к. т. н. Нестеренко О. В.

“ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я  
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Лініченко Тетяна Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Дослідження стану навколишнього середовища з використанням Google Earth Engine  
затверджена наказом ректора КНУБА № \_\_\_\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 року

**2. Керівник роботи** \_\_\_\_\_ Плющ Тетяна Миколаївна, старший викладач \_\_\_\_\_

( прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**3. Строк подання студентом роботи до захисту:** 19 грудня 2024 р.

**4. Зміст пояснювальної записки за розділами:**

РОЗДІЛ 1. Аналіз законодавчої бази моніторингу стану навколишнього природного середовища.

1.1. Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу стану довкілля в Україні

1.2. Аналіз участі України в Європейських програмах охорони навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 2. Аналіз світового досвіду застосування дистанційного зондування землі в сфері охорони довкілля.

2.1. Ознайомлення зі світовою програмою моніторингу навколишнього середовища Copernicus

2.2. Аналіз досвіду використання платформи Google Earth Engine в екологічних дослідженнях.

2.3. Розроблення методики дослідження забруднення повітря за допомогою ДЗЗ.

РОЗДІЛ 3. Дослідження динаміки зміни концентрацій основних забруднювачів атмосферного повітря України з використанням Google Earth Engine

3.1. Дослідження забруднення повітря метаном (CH<sub>4</sub>).

3.2. Дослідження забруднення повітря діоксидом азоту (NO<sub>2</sub>).

3.3. Дослідження забруднення повітря монооксидом вуглецю (CO).

3.4. Дослідження забруднення повітря сірчистим ангідридом (SO<sub>2</sub>)

РОЗДІЛ 4. Аналіз та можливості практичного застосування методики дослідження забруднення повітря за допомогою ДЗЗ.

4.1 Аналіз отриманих результатів. Порівняння концентрацій з нормами ГДК України.

4.2. Оцінка можливості використання методики дистанційного моніторингу забруднення атмосферного повітря в державних програмах охорони довкілля.

## **5. Графічний матеріал за розділами**

Р.1. Гранично допустимі концентрації та інформаційні пороги забруднювачів атмосферного повітря. Законодавча база моніторингу стану навколишнього природного середовища

Р.2. Основні характеристики приладу TROPOMI. Характеристики наборів даних дослідження. Редактор коду GEE. Блок-схема впливу основних джерел забруднення на біосферу. Схема дослідження динаміки рівня концентрацій основних забруднювачів атмосфери

Р.3. Характеристики наборів даних для досліджуваних речовин. Графіки середньомісячних концентрацій газів. Діаграми аномалій досліджуваних газів. Карти середніх концентрацій забруднювачів. Карти трендів Кендалла.

Р.4. Перераховані норми ГДК. Графіки середньомісячних концентрацій газів

## 6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)
Аналіз законодавчої бази моніторингу стану навколишнього природного середовища.	08.10.2024
Аналіз світового досвіду застосування дистанційного зондування землі в сфері охорони довкілля.	10.10.2024
Дослідження динаміки зміни концентрацій основних забруднювачів атмосферного повітря України з використанням Google Earth Engine	24.10.2024
Аналіз та можливості практичного застосування методики дослідження забруднення повітря за допомогою ДЗЗ	18.11.2024
Остаточне оформлення роботи	26.11.2024
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	27.11.2024
Попередній захист роботи на кафедрі	06.12.2024

## 7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.	Кінь Д.О., доц.	26.11.2024	
Розділ 3.	Кінь Д.О., доц.	26.11.2024	
Розділ 4.			

## 8. Дата видачі завдання 08 жовтня 2024 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Юрій КАРПІНСЬКИЙ  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ Тетяна ПЛЮЦ  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студентка \_\_\_\_\_ Тетяна ЛІНІЧЕНКО  
(підпис) (прізвище та ініціали)

<b>РЕЗЮМЕ (summary)</b> <i>до атестаційної випускної роботи студента:</i>		<b>Лініченко Тетяна Миколаївна</b>	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Дослідження стану навколишнього середовища з використанням Google Earth Engine		
<i>Освітній ступень</i>	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики і фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія і землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи та технології		
<i>Керівник</i>	Плющ Тетяна Миколаївна, старший викладач		
<i>Обсяг роботи:</i>	<i>пояснювальна записка, стор.</i>	<i>розділів</i>	<i>графічних матеріалів</i>
		4	
<i>Розділ 1</i>	Розглянуто нормативно-методичне забезпечення моніторингу навколишнього середовища України. Визначено зв'язок нормативно правових актів щодо моніторингу довкілля України із нормами Європейського законодавства. Розглянуто основні затверджені норми допустимих концентрацій основних забрудників атмосферного повітря та проаналізовані основні показники, що їх треба досягти в реалізації Європейських програм охорони довкілля.		
<i>Розділ 2</i>	Проаналізовано світовий досвід моніторингу довкілля за допомогою засобів дистанційного зондування Землі. Особлива увага приділена світовій програмі супутникового моніторингу Copernicus та використанню Google Earth Engine (GEE). Розроблено загальну схему моніторингу основних забруднювачів повітря та створено скрипт для їх аналізу на платформі Google Earth Engine.		
<i>Розділ 3</i>	Досліджено динаміку зміни концентрацій основних забруднювачів атмосфери за допомогою платформи GEE. Створено скрипти для досліджень газів CH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> в редакторі GEE. Створено графіки, діаграми та тематичні карти. Додатково використано програми QGIS та EXCEL. Проаналізовано вплив забруднювачів на довкілля та здоров'я людей визначено основні джерела забруднень. Проаналізовано динаміку змін концентрацій в залежності від сезону, кліматичних факторів, рельєфу,		

	близькості підприємств та транспорту, впливу пандемії та військових дій.
<i>Розділ 4</i>	Було порівняно отримані результати з гранично допустимими концентраціями України. Зроблено висновок про недоцільність такого порівняння для середньомісячних значень для великої території. Проаналізовано важливість використання методики дистанційного аналізу концентрацій газів за допомогою GEE в програмі «Чисте повітря для Європи» та перераховано пункти, в яких є можливість такого застосування.
<i>Висновок по роботі</i>	Даний проєкт розроблений з метою покращення моніторингу якості атмосферного повітря, чистота якого є важливою для життя і здоров'я громадян, адже його забрудненість є причиною парникового ефекту, що загрожує всьому живому на планеті. Використання результатів дослідження на платформі GEE забезпечує аналіз змін доступними для широкого загалу. Його можна застосовувати на уроках географії, для підтвердження негативного антропогенного впливу, контролювати процеси покращення показників при виконанні екологічних програм. Виявлено певні недоліки дистанційного зондування, а саме великий розмір пікселя не дозволяє моніторити невеликі локальні території, також має вплив хмарність, відсутність зйомки на потрібний момент, несправність обладнання та відсутність норм гранично допустимих концентрацій (ГДК) в одиницях колонкових концентрацій. В той же час поєднання наземного та супутникового моніторингу буде дуже ефективним під час здійснення моніторингу за динамікою стану повітря і переваги різних методів будуть доповнювати один одного.
<p><b><u>Ключові слова:</u></b> Google Earth Engine, дистанційне зондування; моніторинг; колекція знімків; забруднення повітря; ГДК; забруднення повітря</p> <p><b><u>Keywords:</u></b> remote sensing; monitoring; collection of pictures; air pollution; GDC, maximum permissible concentrations; air pollution</p>	

Укладач: \_\_\_\_\_ / Тетяна ЛІНІЧЕНКО /

Керівник: \_\_\_\_\_ / Тетяна ПЛЮЩ /

«26» листопада 2024 р.

# ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАКОНОДАВЧОЇ БАЗИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА .....	13
1.1. Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу стану довкілля в Україні. ....	14
1.2. Аналіз участі України в Європейських програмах охорони навколишнього середовища.....	15
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ У СФЕРІ ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ .....	21
2.1. Ознайомлення зі світовою програмою моніторингу навколишнього середовища Copernicus .....	22
2.2. Досвід використання платформи Google Earthe Engine в екологічних дослідженнях. ....	24
2.3. Розроблення методики дослідження забруднення повітря за допомогою ДЗЗ. ....	30
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ОСНОВНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ GOOGLE EARTH ENGINE.....	40
3.1 Дослідження забруднення повітря метаном (CH <sub>4</sub> ). ....	41
3.2. Дослідження забруднення повітря діоксидом азоту (NO <sub>2</sub> ). ....	50
3.3 Дослідження забруднення повітря монооксидом вуглецю (CO). ....	58
3.4 Дослідження забруднень сірчистим ангідридом SO <sub>2</sub> .....	64
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЗЗ .....	74
4.1 Аналіз отриманих результатів. Порівняння концентрацій з нормами ГДК України. ....	75
4.2. Оцінка можливості використання дистанційного моніторингу в державних програмах охорони довкілля. ....	78
ВИСНОВОК.....	81



ДОДАТКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	100

## ВСТУП

На сьогодні для всієї нашої планети як ніколи гостро стоїть проблема кліматичних змін: від підвищення температури тануть льодовики, піднімається рівень світового океану, затоплюються острівні та прибережні території; збільшується частота екстремальних погодних умов таких як урагани, повені, посухи, горять лісові масиви; змістилися кліматичні зони, що призводить до зникнення або скорочення видового складу або цілих екосистем, які існували на даній території впродовж багатьох років, знижується врожайність та з'являється необхідність штучного поливу, що веде до розтрат прісної води, осолонення полів, збільшується захворюваність серед населення, тварин, рослинного світу та ін. У зв'язку з цим дуже важливим є моніторинг та охорона стану навколишнього середовища на державному рівні.

Актуальність згаданої теми полягає у розробленні методики аналізу стану повітря на території України за допомогою програмного забезпечення Google Earthe Engine, яке дозволяє швидко проаналізувати динаміку змін концентрацій забруднюючих речовин за аналізом супутникових даних, з метою виконання пунктів програми «Європейський зелений курс» щодо динаміки зниження концентрацій забруднюючих речовин в певний період, що є особливо актуальним сьогодні, під час війни, коли моніторинг стану атмосферного повітря наземними станціями на деяких територіях взагалі може бути неможливим із-за безпекової ситуації.

Метою даної роботи є розробка алгоритму дистанційного аналізу стану навколишнього середовища, а саме моніторинг якості атмосферного повітря, з використанням платформи Google Earth Engine, даних супутників Sentinel-5 P і MODIS та географічної інформаційної системи з відкритим кодом QGIS.

Об'єкт дослідження – атмосферне повітря над територією України.

Предмет дослідження – моніторинг газів CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> методами ДЗЗ.

Завдання даної дипломної роботи:

1. Аналіз законодавчої бази моніторингу навколишнього середовища в Україні.
2. Огляд і аналіз можливостей програми Copernicus: світової програми з моніторингу навколишнього середовища.
3. Аналіз досвіду використання платформи GEE (Google Earth Engine) для моніторингу стану навколишнього середовища та його складової – атмосферного повітря.
4. Аналіз досвіду вчених для виконання аналізу динаміки зміни якості повітря на території України, а саме основних забруднювачів атмосфери: NO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>.
5. Розроблення алгоритму виконання аналізу змін концентрацій основних забруднювачів.
6. Створення картографічного матеріалу для візуалізації змін повітря.
7. Виконання оцінки можливості впровадження аналізу стану атмосферного повітря за допомогою GEE в методичні рекомендації до регіональних програм з охорони довкілля.

Вихідні дані роботи: дані супутника Sentinel-5 в період з 2019 до 2023 року включно, для SO<sub>2</sub> дані за листопад-грудень відсутні.

- COPERNICUS/S5P/NRTI/L3\_NO2, а саме набір даних: тропосферний вертикальний стовп NO<sub>2</sub> (tropospheric\_NO2\_column\_number\_density), вихідні дані фільтровані, видалені пікселі зі значеннями якості, менші за 75%;

- COPERNICUS/S5P/NRTI/L3\_CO, набір даних: вертикально інтегрована щільність колонки CO (CO\_column\_number\_density), вихідні дані фільтровані, видалені пікселі зі значеннями якості, менші за 50%;

- COPERNICUS/S5P/NRTI/L3\_SO2, набір даних: щільність SO<sub>2</sub> у вертикальному стовпчику на рівні землі, розрахована за методом DOAS (SO<sub>2</sub> vertical column density at ground level, calculated using the DOAS technique.) дані за листопад-грудень відсутні.

- COPERNICUS/S5P/OFFL/L3\_CH4, набір даних: усереднене по колонці співвідношення метану в суміші сухого повітря, частки на мільярд (CH4\_column\_volume\_mixing\_ratio\_dry\_air);
- FAO/GAUL/2015/level0 - інформація про адміністративні одиниці для всіх країн світу набір Global Administrative Unit Layers (GAUL), рівень 0-кордони держав;
- WRI/GPPD/power\_plants – база даних з тепловими електростанціями станом на червень 2018 року.



## **1.1. Аналіз нормативно-правового забезпечення моніторингу стану довкілля в Україні.**

Процес моніторингу (або дослідження) стану навколишнього середовища багатофункціональний та дуже інформаційний і включає такі напрями:

1) спостереження за станом навколишнього середовища, визначення основних джерел та факторів, які на нього впливають;

2) фактична оцінка стану довкілля, порівняння отриманих результатів з визначеними законодавством нормами;

3) прогноз майбутнього стану навколишнього середовища та оцінка прогнозованого стану;

4) створення та наукове обґрунтування пропозицій, які допоможуть державній та місцевій владі прийняти правильні управлінські рішення, які повинні запобігати негативним тенденціям зміни стану навколишнього середовища та бути направлені на додержання умов екологічної безпеки.

Отже, моніторинг навколишнього середовища – це комплекс спостережень, оцінки та прогнозу стану довкілля, що включає в себе науково-інформаційну підтримку державних чи місцевих органів влади щодо прийняття управлінських рішень [10].

В Україні основними документами, які регулюють відносини у таких галузях природних ресурсів як їх використання, відтворення та охорона, збереження та зменшення чи запобігання негативному впливу на них господарської діяльності, моніторингу є Конституція України [14], перелік Законів України: «Про охорону навколишнього природного середовища» [1], «Про охорону атмосферного повітря» [15], «Про гідрометеорологічну діяльність» [16], «Про охорону земель» [17], «Про тваринний світ», «Про рослинний світ», «Про управління відходами» [18], «Про оцінку впливу на довкілля» [19] та ін., Земельний [20], Водний [21], Лісовий [22] та інші кодекси України. Моніторинг навколишнього природного середовища України провадиться відповідно Постанові Кабміну від 30 березня 1998 р., № 3911 [11] на основі багаторічних

даних Українського Гідрометцентру, може керуватися міжнародними підходами до проведення моніторингу, проводиться на результатах даних отриманих під час аналізу стану довкілля. «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» [4], а також низкою Постанов [12, 13, 22] якими визначається як ведеться державний облік та реєстрація викидів, відбувається переміщення забруднювачів, відходів та яким чином проводиться моніторинг, надається звітність та підтверджуються викиди парникових газів. Наказ Міністерства охорони здоров'я № 813 від 10.05.2024 [2] визначає нормативи і граничні концентрації біологічних та хімічних речовин в атмосферному повітрі в місцях, де мешкає населення.

## **1.2. Аналіз участі України в Європейських програмах охорони навколишнього середовища.**

У березні 2014 року між Україною та Європейським Союзом було підписано Угоду про асоціацію [5], одним із пунктів якої є співробітництво у захисті навколишнього природного середовища та поступове впровадження стандартів Європейського Союзу у цій сфері, а саме регламентується Директивами та Регламентами Європейського Союзу з його правилами і стандартами, яких необхідно дотримуватися і в нашому внутрішньодержавному законотворенні. Так, згідно вимог Директиви [6], територію держави-учасника програми слід поділити на зони та агломерації по контролю за якістю повітря. Постановою КМУ № 827 [27] від 14 серпня 2019 року на території України було встановлено зони та агломерації відповідно до її адміністративного поділу, АР Крим та області – це зони, а обласні центри та міста з кількістю населення від 250 тис – це агломерації. Прийнято ряд документів [11, 13, 25, 26, 27] якими визначено кількісні та якісні показники, що їх необхідно досягти впродовж певного періоду та сформовано завдання, виконання яких призведе до реалізації поставлених задач. На виконання вимог Угоди [5] в 2022 році створено Закон «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» [26]. В нашій Державі було створено кадастри та реєстри природних ресурсів для

обліку різних ресурсів, їх обсягу, характеру та режиму використання, дана інформація регулюється Законом України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [3], а реєстр викидів та забруднювачів керується Законом «Про Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів» [2]. Постанова № КМУ 827 [27] визначає забруднювачі та вказує гранично допустимі концентрації (ГДК). ГДК - це кількість речовин на одиницю об'єму чи маси певного середовища, яка при постійному або тимчасовому контакті не шкідлива для здоров'я людей та не викликає поганих наслідків у його потомства [49]. В таблиці 1.1 наведені ГДК досліджуваних забруднювачів повітря [12], а в таблиці 1.2 - орієнтовно безпечний рівень впливу метану, витяги із нормативів затверджених наказом МОЗ № 813 [25].

*Таблиця 1.1*

Гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць (витяг) [27]

№ з/п	Назва речовини	CAS №	Гранично допустима концентрація, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпеки
			максимально разова	середньодобова	
1	2	3	4	5	6
1.	Азоту діоксид	10102-44-0	0,2	0,04	3
42.	Ангідрид сірчистий	7446-09-5	0,5	0,05	3
97.	Вуглецю оксид	630-08-0	5	3	4

*Таблиця 1.2*

Державні медико-санітарні нормативи. Орієнтовно безпечні рівні впливу хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць (витяг) [25]

№ з/п	Назва речовини	Торгова назва	CAS	Орієнтовно безпечні рівні впливу, мг/м <sup>3</sup> *
600.	Метан		74-82-8	50,0



Наказом Міндовкілля № 486 [55] заходи з напряму охорони атмосферного повітря, визначені Директивою 2008/50/ЄС [6]. Додаток XI цього документу визначає вимоги для оцінки концентрацій основних забруднювачів.

Таблиця 1.3

Витяг з додатку XI Директиви 2008/50/ЄС [6]

Період усереднення	Граничний показник	Межа похибки	Дата, до якої гранична величина має бути досягнута
1	2	3	4
<b>Сірчистий газ</b>			
Одна година	350 мг/м <sup>3</sup> не повинен бути перевищений більше, ніж в 24 рази на календарний рік	150 мг/м <sup>3</sup> (43 %)	-
Один день	125 мг/м <sup>3</sup> не повинен бути перевищений більше, ніж в 3 рази на календарний рік	Відсутня	-
<b>Двоокис азоту</b>			
Одна година	200 мг/м <sup>3</sup> не повинен бути перевищений більше, ніж в 18 разів на календарний рік	50 % станом на 19 липня 1999 року, зменшення на 1 січня 2001 року та в подальшому кожні 12 місяців у рівному щорічному процентному співвідношенні для того, щоб досягнути 0 % до 1 січня 2010 року	1 січня 2010 року
Календарний рік	40 мг/м <sup>3</sup>	50 % станом на 19 липня 1999 року, зменшення на 1 січня 2001 року та в подальшому кожні 12 місяців у рівному щорічному процентному співвідношенні для того, щоб досягнути 0 % до 1 січня 2010 року	1 січня 2010 року

Період усереднення	Граничний показник	Межа похибки	Дата, до якої гранична величина має бути досягнута
Окис вуглецю			
Максимальне денне 8-годинне середнє значення(2)	10 мг/м-3	60 %	-(1)

Також Директива визначає інформаційні пороги та пороги небезпеки для небезпечних забруднювачів (табл. 1.4).

*Таблиця 1.4*

Додаток 12 Директиви 2008/50/ЄС (витяг)[6]

Інформаційний поріг та поріг небезпеки	
Забрудник	Поріг небезпеки
Сірчистий газ	500 мг/м <sup>3</sup>
Двоокис азоту	400 мг/м <sup>3</sup>

Згідно Директиви [6] дані об'єми визначаються при температурі 293К (19,85 градусів Цельсія) і атмосферному тиску 101,3 кПа (тобто 759,8145842397 мм.рт. ст.) і становлять:

- для окису вуглецю (CO) добовим граничним 8-годинним значенням є 10 мг/м<sup>3</sup>,
- для сірчистого ангідриду (SO<sub>2</sub>) середньогодинне порогове значення повинно бути на рівні 350 мкг/м<sup>3</sup>, та не перевищуватися частіше, ніж 24 рази за календарний рік,
- для діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>) - на рівні 40 мкг/м<sup>3</sup>, а її середньогодинне значення - 200 мкг/м<sup>3</sup>, та не повинні перевищуватися 18 разів за один рік.

Висновок до розділу 1.

Незважаючи на військові дії, Україна вже зараз планує відновлення та бере участь в міжнародних програмах охорони довкілля. В державі удосконалюється законодавство щодо здійснення моніторингу довкілля, створюються державні бази даних у галузі охорони навколишнього середовища, відбувається адаптація

нашого законодавства до законодавства Європейського Союзу; створюються технічні, лабораторні, методичні бази для здійснення моніторингу та нагляду за довкіллям.

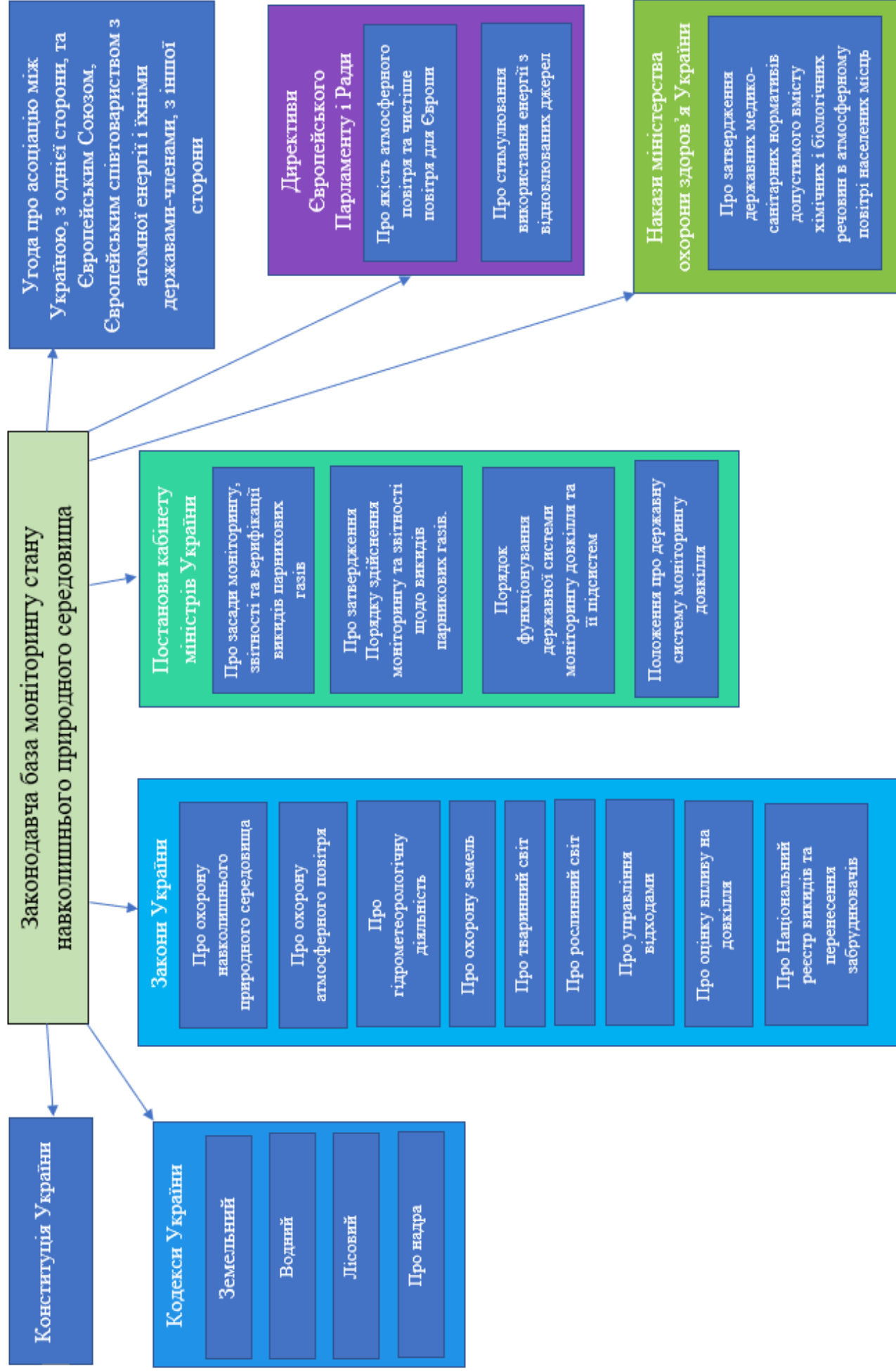


Рисунок 1.1 Законотворча база моніторингу стану навколишнього природного середовища



## **2.1. Ознайомлення зі світовою програмою моніторингу навколишнього середовища Copernicus**

Однією із найамбітніших та наймасштабніших світових програм з моніторингу навколишнього середовища є програма Copernicus. Вона реалізується державами-партнерами даної програми, Європейською організацією з експлуатації метеорологічних супутників (EUMETSAT), Європейським космічним агентством (ESA), Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) та агентствами ЕС і Mercator. Ocean International. Глобальні дані величезного обсягу збираються із супутників та інших вимірювальних систем та безкоштовно надаються користувачам. Дані використовуються у багатьох сферах, наприклад: для аналізу змін клімату, забруднення повітря, аналізу температурного режиму, моніторингу землі, виникнення пожеж, в сільському господарстві, моніторингу землетрусів та вулканів та ін.[33].

В даній роботі здійснювався моніторинг стану атмосфери за допомогою дистанційних методів з використанням даних зі штучних супутників Землі. Адже саме забруднення атмосферного повітря є основним фактором кліматичних змін на нашій планеті.

Місія Sentinel-5P створена для потреб програми Copernicus, основною метою якої є виконання глобальних вимірювань слідів газів, аерозолів в атмосфері з високою роздільною просторово-часовою здатністю, що стосуються якості повітря, впливу клімату, озону та УФ-випромінювання. Місією забезпечується щоденне покриття. Дана програма покращує спостереження країн Європи з полярної орбіти та надає можливість довгострокового аналізу клімату.

Супутник Sentinel-5 Precursor (S5P) був запущений 13 жовтня 2017 року, він запланований на використання протягом щонайменше семи років та збирає дані щодо озону (O<sub>3</sub>), діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>), діоксиду сірки (або сірчистий ангідрид, сірчистий газ, SO<sub>2</sub>), формальдегіду (HCHO), монооксиду вуглецю (або

чадний газ, CO), метану (CH<sub>4</sub>) [52] й оптичної глибини аерозолю. TROPOMI є супутниковим інструментом на борту супутника Copernicus Sentinel-5 Precursor [32]. Спостереження проводяться над освітленою щодо субсупутникової точки, сонцем ділянкою орбіти, в той же час калібрування приладів відбувається в період темної сторони орбіти [31]. Після запуску на орбіту, протягом шести місяців важливі прилади вводилися в експлуатацію. Їхнє калібрування та випробування було успішно завершено в квітні 2018 року, а перші набори даних публікуються з середині липня 2018 року, зараз усі продукти даних є загальнодоступними.

Таблиця 2.1

Основні характеристики приладу TROPOMI Sentinel-5[32]

Тип	Спектрометр з пасивною решіткою
Конфігурація	«Push broom staring» (без сканування) в найнижчому режимі перегляду
Ширина смуги	2 670 км
Просторова дискретизація	50x50км <sup>2</sup> (UV1), 7,5x7,5км <sup>2</sup> (всі інші канали),
Спектральний	5 спектрометрів (1 в UV1, 1 в UV2VIS, 1 в NIR та 2 в SWIR)
Радіометрична точність (абсолютна)	3%, 6% (SWIR) виміряного спектрального коефіцієнта відбиття землі.
Загальна маса	290 кг
Розміри (хуз)	1,145x1,032x1,026 м <sup>3</sup>
Проектний термін служби	7,5 років
Споживана потужність	300 Вт
Обсяг згенерованих даних	139 Гбіт на повну орбіту.

Прилад S5P/TROPOMI знімає зразки земної поверхні з часом повторного огляду в один день із просторовою роздільною здатністю для наших наборів даних 3,5x7 км та 7x7 км [32] (табл. 2.2).

## Характеристики наборів даних для дослідження

Назва набору	Опис	Роздільна здатність
Nitrogen Dioxide (NO <sub>2</sub> )	Загальна концентрація діоксиду азоту в колонці	~3.5x7 km
Sulphur Dioxide (SO <sub>2</sub> )	Загальна концентрація діоксиду сірки в колонці	~3.5x7 km
Carbon Monoxide (CO)	Загальна концентрація монооксиду вуглецю в колонці	~3.5x7 km
Methane (CH <sub>4</sub> )	Загальна концентрація метану в колонці	~7x7 km

## 2.2. Досвід використання платформи Google Earthe Engine в екологічних дослідженнях.

Хмарна платформа Google Earth Engine (GEE) — це ресурс, який надає доступ до високопродуктивних обчислювальних засобів, щоб обробити набори геопросторових даних дуже великих об'ємів без необхідності бути досвідченим розробником додатків чи веб-програмістом, крім того Earth Engine допомагає дослідникам легко поширювати свої результати серед інших дослідників, широкої громадськості, головне створити на цій платформі певний необхідний алгоритм обчислення. [34, 35, 36]. Платформа Google Earth Engine – це можливість доступу до великих обсягів супутникових даних та їхньої подальшої обробки на цьому ресурсі. Ці дані можна використати для оцінки стану навколишнього середовища, в тому числі і аналізу якості повітря.

Спочатку налаштування ресурсу включало тільки дані дистанційного зондування, а зараз додано векторні дані, соціальні, демографічні дані, цифрові моделі рельєфу, погодні та кліматичні дані. Велика кількість зображень вже очищена попередніми користувачами від хмарного покриву, але оригінальні зображення теж доступні. Для певних наборів даних була проведена попередня обробка і необроблені цифри перераховані в коефіцієнти, такі як відбиття



верхнього рівня атмосфери, відбиття поверхні, ці дані можна використати для подальшого аналізу, в якому вже не треба використовувати розраховувати сонячні та атмосферні поправки, застосовуючи спеціальні програми. На платформі також є вже обчислені вдосконалений вегетаційний індекс EVI та нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI.

Платформа GEE складається з провідника (GEE Explorer), за його допомогою можливо переглянути дані та імпортувати власні; GEE Timelapse – каталоги даних, які дозволяють переглянути зміни на Землі за період майже 40 років; GEE Code Editor – редактор коду, за допомогою якого, використовуючи JavaScript або Python, є можливість в ресурсі завантажити необхідні дані, відфільтрувати їх, визначивши період, місце дослідження, виконати складні геопросторові розрахунки та створити візуалізацію: карти, графіки, шейп файли, та скачати інформацію на Google диск [38].

Розглянемо докладніше редактор коду Google Earth Engine (GEE, EE). В центрі панель GEE Code Editor містить редактор коду JavaScript. Над ним є кнопки для збереження сценарію (Save), його запуску (Run) та очищення карти (Reset). Є кнопка «Отримати посилання» (Get Link), вона створює унікальне URL-посилання для поточного сценарію. На нижній панелі знаходиться карта, з доданими скриптом шарами. Для пошуку наборів даних і місць є поле пошуку у верхній частині. Зліва розташовані збережені сценарії, приклади коду, посилання на API та адміністратор ресурсів для особистих даних. Справа є інспектор (Inspector) для запитів до карти, консоль (Console) виведення та менеджер завдань (Tasks) (рис.2.1)

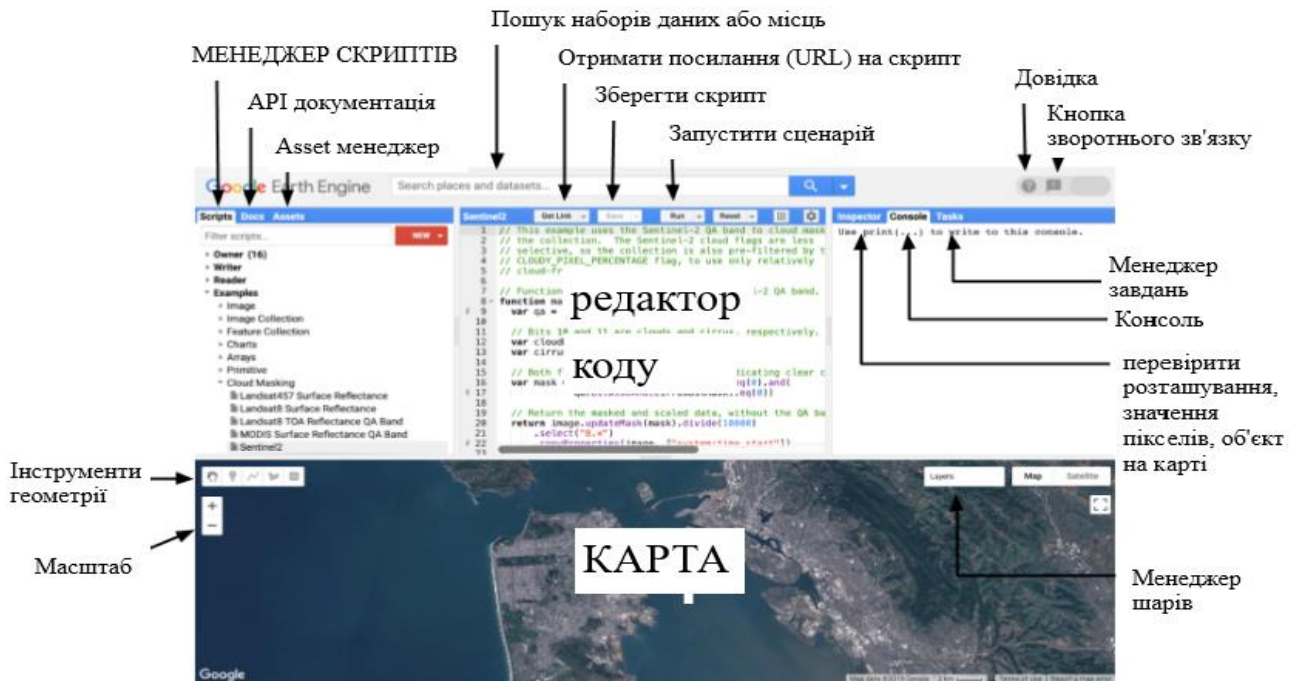


Рисунок 2.1. Редактор коду Google Earth Engine

Існує кілька способів виконання операцій в API:

- за викликом методів, які прикріплені до об'єктів;
- за алгоритмом виклику;
- викликаючи спеціальну функцій редактора коду;
- за визначеною новою функцією.

У своїх відеоуроках та навчальних матеріалах Google Earth Engine більш детально знайомить користувача із алгоритмами (<https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/videos>).

У цьому дослідженні було використано такі посилання лівої навігаційної панелі:

ImageCollection – це певна послідовність зображень, які ми можемо завантажити в EE, вставивши певний ідентифікатор в редактор. Ці ідентифікатори знаходяться в каталозі даних. Наприклад в роботі було завантажено набір даних концентрації SO<sub>2</sub> супутника Sentinel 5P і скрипт матиме такий вигляд:

```
var sen5 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2");
```

Feature – на даній платформі – це функція GeoJSON. Feature — має geometry (просторові) характеристики, які зберігають геометрію об’єкта (або null), та properties (атрибутивні) – зберігають інші характеристики. Як приклад використання в нашому проєкті – спрощення кордонів досліджуваної території для пришвидшення обробки програмою знімків.

```
var roi=table.filterBounds(geometry).map(function(feature)
{return feature.simplify(500) });
```

FeatureCollection –це групи функцій пов’язаних між собою, щоб ввімкнути операції фільтрування, сортування та візуалізації над усім набором даних. Окрім координатних даних та тематичного змісту колекції об’єктів також можуть містити і інші атрибути. Прикладом створення FeatureCollection може бути, коли ми надаємо конструктору список функцій, причому ці об’єкти не обов’язково мають однакову геометрію або властивості. В нашому випадку було обрано з колекції глобального адміністративного поділу дані кордонів України:

```
var ukraine = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level0")
.filter(ee.Filter.eq('ADM0_NAME', 'Ukraine'));
```

Geometry – Google Earth Engine також обробляє і векторні дані з типом даних Geometry, зокрема: Point, LineString , LinearRing (замкнутий LineString) і Polygon, MultiPoint, MultiLineString та MultiPolygon. Колекція GeoJSON GeometryCollection також підтримується, тут вона має назву MultiGeometry. В роботі було використано її для створення полігону меж досліджуваної ділянки, або задавши координати точки:

```
var training_border = ee.Geometry.Polygon(training_cor);
var point = ee.Geometry.Point([1.5, 1.5]);
```

Програмним шляхом необхідно ввести правильні координати, створивши таким чином відповідну фігуру.

Дослідження стану навколишнього середовища за допомогою GEE знайшло поширене застосування серед дослідників у всьому світі [36, 39, 40, 41,

42, 46, 47, 48, 71], адже дана платформа швидко обробляє величезну кількість даних.

Платформу можна використати при неможливості фізичного доступу до необхідної території, як наприклад при пожежах, паводках чи інших стихійних лихах, для дистанційного спостереження та аналізу впливу [42]. В Earth Engine для аналізу змін можна використовувати певні алгоритми. Наприклад в аналізі наслідків змін землекористувань, пов'язаних з вирубкою лісів [40], у платформі GEE авторами було застосовати алгоритм Random Forest (RF), це класифікація, в якій використовуються топографічні дані та певні індекси, що дозволяє швидко проаналізувати зміни лісового покриву на території басейну річок [40]. За допомогою GEE автори [47] дослідили тенденції посухи в американському штаті Арканзас, та провели дослідження стану повітря територій прибережної смуги Бангладеш [48], застосували аналіз трендів Манна-Кендалла (МК) [12], яким часто користуються в дистанційному зондуванні, враховуючи характер часових рядів змін клімату, гідрології чи метеорологічних показників [47, 48]. Цей складний аналіз дуже просто відбувається з GEE, дозволяючи дослідникам швидко зробити певні висновки. Дана платформа дозволяє поєднати під час аналізу декілька наборів даних. Так турецькі вчені [44] дослідили зв'язок зростання мегаполісів з погіршенням якості навколишнього середовища, в тому числі і підвищення забруднення повітря, сформувавши на GEE зміни ґрунтового покриву для провінції Стамбул в період з 1996 по 2021 (було використано зображення супутників Landsat-5, Landsat- 8 та Sentinel -2) та аналізуючи дані з пристрою TROPOMI для вирахування концентрацій газів CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>. Аналізи повітря, отримані з супутника, було порівняно з результатами вимірювань показників забруднення повітря 39 наземних станцій, і отримані результати показали схожі тенденції зміни рівня забруднення. Низка вчених дослідила зміну концентрацій основних забруднювачів атмосфери та зв'язок якості повітря зі здоров'ям населення під час Covid-19 за допомогою GEE [45, 59, 71, 76], та встановлено, що під час карантину концентрація забруднюючих речовин в повітрі стала нижчою на декілька відсотків. Аналіз впливу

вирощування рису на концентрацію метану в атмосфері вибраних країн був зроблений польськими вченими [73], ресурс ЕЕ дозволив дослідити часові зміни  $\text{CH}_4$  у вибраних країнах або регіонах та загалом у світі (між широтами  $60^\circ$  пд. ш. і  $60^\circ$  пн. ш.) на основі даних супутника Sentinel-5P і створити рівняння регресії, що відображає зв'язки між вмістом  $\text{CH}_4$  та певним періодом. Забруднення атмосфери діоксидом сірки ( $\text{SO}_2$ ) навколо Ташкенту було проаналізовано групою узбецьких вчених. Ними було встановлено динамічність наявної речовини в атмосфері в залежності від сезону, температури навколишнього середовища, близькості промислових підприємств та кількості автотранспорту [62]. Вченими було встановлено залежність зміни концентрації діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ) від температури поверхні землі (LST) і динаміки рослинності протягом трьох років (2019–2021) на території Дакки та Делі, та наведені приклади алгоритмів, створених в редакторі GEE [75].

Відповідність та валідацію досліджень  $\text{SO}_2$  порівняно із наземними вимірюваннями було проведено сербськими вченими над територією Боснії та Герцоговини [74].

Незважаючи на переваги застосування супутникових даних для моніторингу якості повітря, існують деякі обмеження під час дослідження забруднень: частота з якою супутник робить знімок, наявність хмар, низька роздільна здатність та ін. Вони поки що не дозволяють оцінити забруднення повітря на невеликих територіях, всередині кварталів міст, хоча зараз розробляються методи інтерполяції зображень для зменшення розміру пікселя [91]. Декілька великих центрів, у тому числі NASA, створюють прогнози глобального забруднення, які можна використовувати разом із індексами якості повітря для передачі місцевої щоденної інформації про ризик для громадськості [90]. В Україні не прийняті норми ГДК у оптичних одиницях, Перерахунок гранично допустимих концентрацій (ГДК) для забруднюючих речовин ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) з одиниць масової концентрації ( $\text{мкг/м}^3$  або  $\text{мг/м}^3$ ) у моль/ $\text{м}^2$  потребує перетворення масової концентрації у молярну концентрацію, а потім перетворити молярну концентрацію у колонкову кількість. Або навпаки.

Необхідно знати висоту атмосфери, де відбуваються вимірювання, середня висота, де розподіляється основна частина забруднювачів, може бути взята приблизно рівною 8-10 км (8000-10000 м). Також необхідно враховувати, що точні значення висоти атмосфери може змінюватися залежно від шару атмосфери, де розподіляються забруднювачі. Ця тема ще обговорюється та досліджується в науковій спільноті, а ми хоча і використаємо перераховані ГДК в оптичні одиниці для порівняння, але результати не можна сприймати за істину, адже концентрації супутники вимірюють вздовж висоти стовпа атмосфери, а наземні – лише в приземному шарі (додаток б).

В нашій державі дана платформа тільки починає займати своє важливе місце серед інструментів досліджень [36]. Вченими було проаналізовано стан Карпатських регіону та вплив на нього нафтогазового комплексу [38, 39]. Науковці дослідили можливості платформи GEE для здійснено розрахунків індексів NDVI, MNDWI, NDBI, та зробили аналіз наявності рослинного покриву, водойм, забудованих територій та створили графіки динаміки змін цих індексів [39] в даному регіоні. Так як в країні тривають військові дії, Давибідою Л.І. за допомогою платформи було проаналізовано вплив воєнних дій на якість повітря над Україною [28] за період 2021 та 2022 року та зроблені висновки щодо зміни його якості. Леся Єлістратова, Олександр Апостолов, Артур Ходоровський та Максим Тимчишин використовуючи дані про концентрацію діоксиду сірки за 5 років: з 2019 по 2023 рік на ЕЕ зробили комплексний геоінформаційний моніторинг цієї сполуки в атмосфері України [63].

### **2.3. Розроблення методики дослідження забруднення повітря за допомогою ДЗЗ.**

На життя і здоров'я людини впливає безліч антропогенних факторів (рис. 2.2), серед них особливе місце займає забруднення повітряного середовища, на яке мають вплив усі забруднювачі, в той же час забруднення атмосфери впливає на все живе на нашій планеті, а через опади ще і має вплив на ґрунти та підземні води.

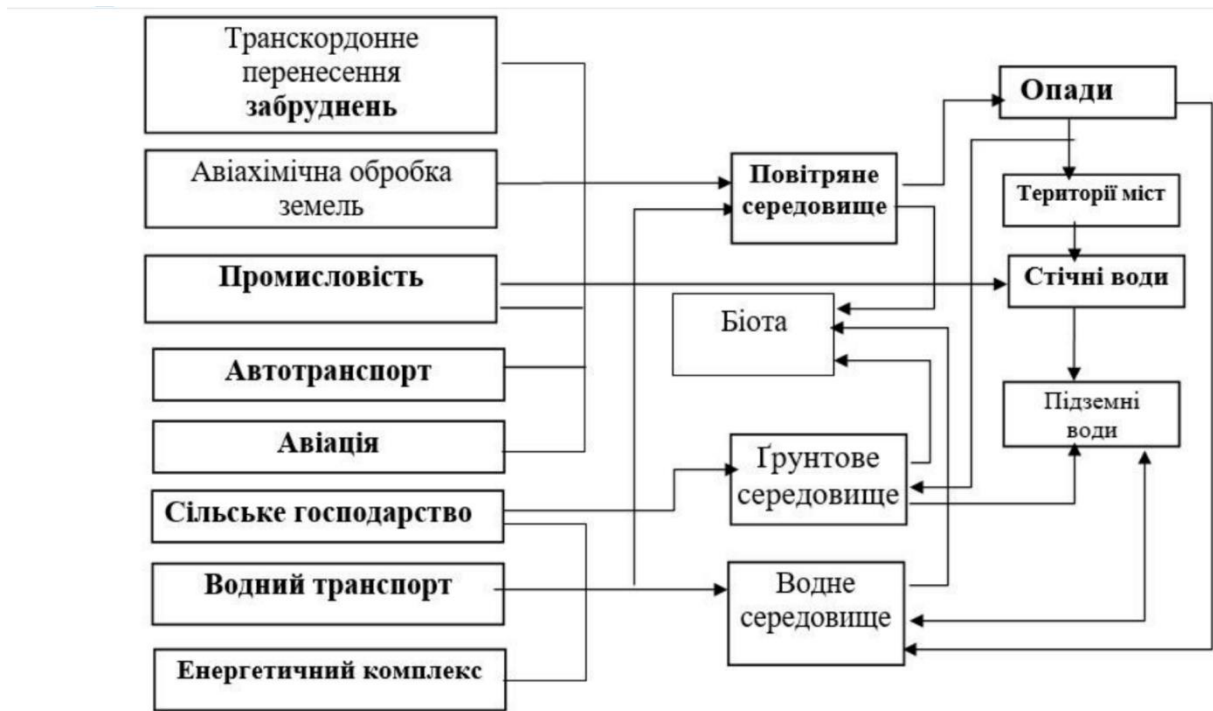


Рис. 2.2. Блок-схема впливу основних джерел забруднення на біосферу.[10]

В результаті цих забруднень змінюється склад атмосфери, її прозорість, температура, що веде до глобального потепління на планеті. Саме забруднення атмосфери вважається однією з найбільш небезпечних форм забруднення біосфери. Тому, як приклад дослідження навколишнього середовища, було обрано дослідити зміни в атмосфері, адже саме забруднення повітря має постійний вплив на населення планети, так як організм людини постійно використовує повітря для підтримки життєдіяльності. В той же час людська діяльність забруднює атмосферу найбільше, особливо небезпечним є забруднення промислових міст токсичними газами, такими як CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, що негативно і безповоротно впливає на погіршення здоров'я людини [65]. Забрудненість повітря впливає на якість життя та здоров'я населення. Спостереження за станом здоров'я під час локдаунів, спричинених COVID-19, коли спостерігалось значне падіння викидів сірчаного ангідриду, діоксиду азоту, та зменшилася кількість дрібних часточок пилу та озону, доказало, що в Європі щорічно приблизно чотириста тисяч передчасних смертей спричиняє забруднення дрібними твердими частинками (PM), а у світі - понад 4 000 000. Тоді як в світі тривалий вплив повітря, забрудненого дрібними PM<sub>2,5</sub>

часточками та O<sub>3</sub>(озон) призводить щорічно до 8 800 000 смертей, а NO<sub>2</sub> (діоксид азоту) є причиною виникнення 4 000 000 нових випадків дитячої астми на рік [45]. Сільськогосподарська діяльність та розливи нафти та газу є причиною постійного збільшення рівня CH<sub>4</sub>, який являється одним із основних чинників глобального потепління.

Моніторинг довкілля може проводитися на рівнях таких як:

- імпактний (локальний рівень спостережень, якщо відчутне велике антропогенне навантаження);
- регіональний (якщо територія обстежень обмежена певною територіальною одиницею: населений пункт, країна);
- фоновий (локальний рівень спостережень, проводиться на заповідних територіях) [10].

Керуючись такими результатами, було обрано як приклад моніторингу навколишнього середовища дослідження стану атмосферного повітря, а саме забруднення його газами CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub> на регіональному рівні, обравши територію України. Досліджено зміни концентрацій цих газів за п'ять років, період з 2019 до 2023 року. Цей період охоплено, щоб включити аналіз впливу пандемії COVID-19 та період воєнного стану. На момент написання роботи ми не включили в аналіз 2024 рік із-за відсутності даних по CH<sub>4</sub>.

Було досліджено якість повітря, а саме концентрації NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та проаналізовано зміни в часі над територією України за період з 2019 року до грудня 2023 року за допомогою Google Earth Engine. Для написання скриптів дослідження було використано JavaScript та навчальні матеріали платформи Google Earth Engine.

Нижче подана розроблена схема методики використання GEE при дослідженні динаміки рівня концентрацій основних забруднювачів атмосфери за допомогою JavaScript, з детальним описом основних етапів аналізу.



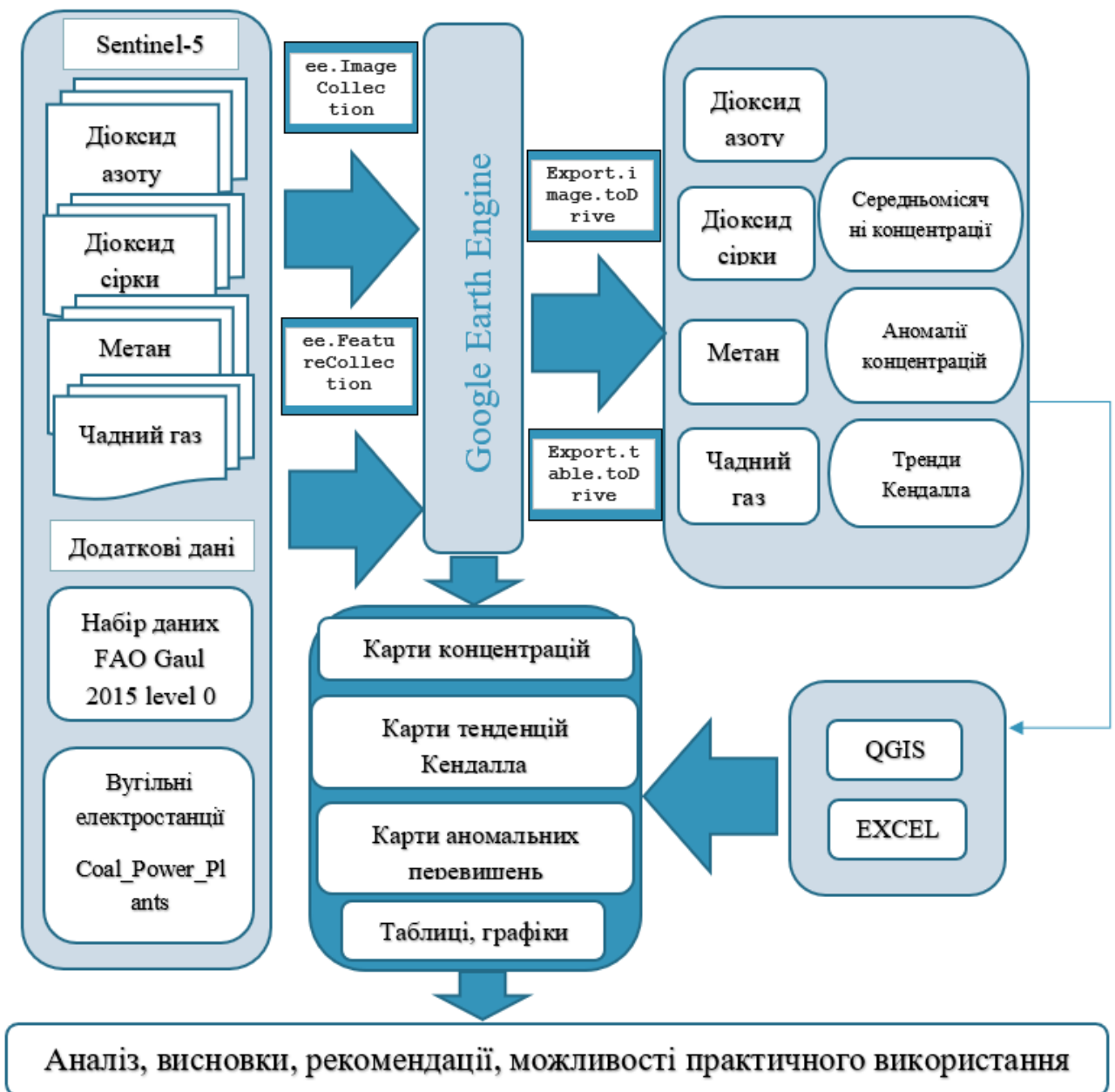


Рис. 2.3 Схема дослідження динаміки рівня концентрацій основних забруднювачів атмосфери

Етапи реалізації роботи описано нижче. Для виконання створених команд використано кнопку «RUN», що знаходиться на верхній центральній панелі редактора.

1. Обрано необхідну колекцію з колекції даних Sentinel-5:

<pre>var imageCollection = ee.ImageCollection ("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4")</pre>	collection за допомогою ee.ImageCollection звертається до бази даних Sentinel-5P OFFL_CH4: Offline Methane
--	--

## 2. Визначено область дослідження:

<pre>table = ee.FeatureCollection ("FAO/GAUL/2015/level0"), geometry = /* color: #d63000 */ /* shown: false */ ee.Geometry.Point([30.908036239915752, 50.495450633481596]); var roi=table.filterBounds(geometry); Map.centerObject(roi) Map.addLayer(roi)</pre>	обрано колекцію адміністративних одиниць кордонів країн за допомогою ee.FeatureCollection. ee.Geometry.Point - поставлено точку в межах країни, що досліджується. filterBounds відфільтровано лінію кордону країни в межах якої стоїть точка. Map.centerObject – визначено розташування картографічного вікна. Map.addLayer – додано шар країни на карту.
---	--

## 3. Задано період дослідження:

<pre>var time_start="2019", time_end="2024"</pre>	задано початок time_start "2019" рік та кінець time_end до "2024" року
---	---

## 4. Обрано дані Sentinel 5 з необхідної нам колонки:

<pre>var sen5=imageCollection.select (["CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air" ], ["methane"])</pre>	За допомогою select обрано необхідний набір даних щільності з колекції CH4
---	---

5. Здійснено фільтрування даних. Так як колекція має дуже велику кількість знімків, створено список за регіоном дослідження, роками, місяцями

<pre>.filterDate(time_start, time_end) .filterBounds(roi) var year_list= ee.List.sequence(ee.Number.parse(time_start), ee.Number.parse(time_end).subtract(1)) var month_list=ee.List.sequence(1,12)</pre>	.filterDate фільтрує дату, .filterBounds – визначає регіон інтересу, ee.List.sequence створює список від заданих початку та кінця; subtract(1) відняти 1 (2024 рік не входить в список), задаємо список місяців (з 1 до 12)
---	---

6. Створено колекцію середньомісячних значень за 5 років. Сформовано список із 60 елементів (період 5 років), через інструмент geometry є можливість міняти місце та обирати необхідний регіон дослідження, а через редуктор отримати максимуми, мінімуми, середні (як в нашому випадку) значення:

<pre>var methane_monthly=year_list.map(function(year){ return month_list.map(function(month){ var monthly=sen5 .filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,"year")) .filter(ee.Filter.calendarRange( month,month,"month")).mean() var date=ee.Date.fromYMD(year,month,1) return monthly .set("system:time_start", date.millis()) .set("system:index", date.format("YYYY-MM- dd")) }) }).flatten()</pre>	<p>задано, що середньомісячне значення метану var methane_monthly буде фільтроване по рокам, середнє за місяць, значення з 1 числа кожного місяця</p> <p>"system:time_start", для групування даних за часовими проміжками "system:index", для ідентифікації об'єкта у колекції за форматом "YYYY-MM-dd"(рік -місяць-день)</p> <p>flatten – для об'єднання цих середніх даних в послідовність</p>
---	--

### 7. Надруковано графік середніх концентрацій:

<pre>print (ui.Chart.image.series( methane_monthly, roi, ee.Reducer.mean(), 7000, "system:time_start")</pre>	<p>ui.Chart.image.series вказано знімки, які будуть використані для побудови графіка</p> <p>ee.Reducer.mean() вказано редуктор-середні(mean) (є можливість вибрати max або min) , масштаб - 7000, система відліку"system:time_start")</p>
--	---

### 8. Задано параметри візуалізації графіка:

<pre>.setOptions({ title:"Середньомісячні концентрації CH4", vAxis: {title: "Mol fraction"}, xAxis: {title: "date"}, series: {0:{color:"blue"}}, pointSize:4 }))</pre>	<p>title – назва графіка</p> <p>vAxis – вказуємо підпис по осі y</p> <p>xAxis - вказуємо підпис по осі x</p> <p>series параметри графіка: лінія, колір, розмір точок</p>
--	--

9 Після виконання даної команди отримано графік зміни концентрацій.

10. На наступному етапі в GEE створено шар заданої карти, використано кольори та діапазон для візуалізації, рекомендовані для використання в прикладі коду.

<pre>var ave=methane_monthly.mean(); var band_viz = { min: 1750,</pre>	<p>var band_viz – приклад з редактора GEE (рекомендований діапазон кількості та використання кольорів палітри)</p>
--	--

<pre>max: 1900, palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'] }; Map.addLayer(ave.clip(roi), band_viz, "methane_ave", false)</pre>	<p>Map.addLayer – додано шар карти на екран, в дужках параметри відображення: clip-регіон дослідження, значення band_viz, підпис шару, та false - для уникнення автоматичної візуалізації</p>
---	---

## 10. Створено діаграму аномальних значень.

<pre>var anomaly=methane_monthly.map(function(img ){ var index=img.subtract(ave).rename("anomaly") return index .copyProperties(img, img.propertyNames()) }); print( ui.Chart.image.series(anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 7000, "system:time_start") .setChartType("ColumnChart"))</pre>	<p>function(img) створення циклу в якому кожне вхідне зображення розглядатиметься як IMG, а наступне як індекс: index=img.subtract(ave).rename("anomaly") return index – індекс аномалії, він дорівнює різниці між зображеннями кожної дати, середнє створене зображення перейменовується як аномалія та додається код, що повертає індекс (агрегування на основі середнього скорочення [69]) ee.Reducer.mean() – редуктор для фільтрації середніх значень, setChartType("ColumnChart")- для побудови графіка у вигляді колонок</p>
--	---

11. Аналіз позитивних аномалій. Щоб проаналізувати лише позитивні перевищення за певний період, створено нову змінну, pos\_anomaly (позитивні аномалії). яка показує лише додатні значення (та додатні змонтовані зображення), і виключає негативні значення у змінній anomaly.

<pre>var pos_anomaly=anomaly.map(function(img){ var ave_anom=ee.Number(img.reduceRegion({ reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 7000 }).values().get(0)) return img .copyProperties(img, img.propertyNames()) .set("metane_value", ave_anom) }); print(pos_anomaly)</pre>	<p>ee.Number(img.reduceRegion({ reducer: ee.Reducer.mean() - спершу було обчислено середнє значення аномалії в регіоні: кожне вхідне зображення отримує вхід зображення як IMG, а потім через зменшення обчислено середнє значення для кожної дати; обрано фільтр «get», який обирає значення більші, в нашому випадку більші нуля. Get(0) показує лише додатні значення (та додатні змонтовані зображення), і виключає негативні значення у змінній anomaly; print(pos_anomaly) – створено для перевірки правильності створеного фільтра, надруковано отримані зображення, відкрито</p>
---	--

	папки, зображення відповідають заданим нами параметрам
--	--

12. Аналіз тенденцій зроблено у механізмі кореляції Кендала [61]. Kendall Earth, редуктор (ee.Reducer.kendallsCorrelation()) в GEE, надає змогу швидко зрозуміти в яких пікселях середнє значення збільшується і в яких пікселях середнє значення зменшується протягом якогось періоду часу. Для цього створено нову змінну trend, яка дорівнює отриманню щоденних аномальних середньомісячних зображень, або середнім щомісячним показникам метану, та обчислено тенденцію за допомогою механізму кореляції kendalls. Пишемо скрипт для перевірки, які доступні набори даних:

<pre>var trend=methane_monthly.reduce( ee.Reducer.kendallsCorrelation()); print(trend)</pre>	<p>ee.Reducer.kendallsCorrelation редуктор, який рахує кореляцію кендала в GEE. print(trend) для визначення, які доступні діапазони</p>
--	---

Отримано відповідь, які дані доступні для цього аналізу (відповідь: "....\_tau ", з діапазоном [-1, 1], та " ..... \_p-value", з діапазоном [0, 1]). Ми використаємо кореляцію, щоб побачити зміни як позитивні, так і негативні. Тому видозмінимо цей скрипт наступним чином:

<pre>var trend=methane_monthly.reduce( ee.Reducer.kendallsCorrelation()); Map.addLayer(trend.select( "methane_tau").clip(roi), {palette: ["green","black","red"]},"ch4_trend", false);</pre>	<p>trend.select("methane_tau") –обрано дані "methane_tau", clip (roi) певного регіону дослідження, вказано кольори palette: [{"green","black","red"}], назву - "ch4_trend", та false, щоб не було автоматичної візуалізації</p>
--	---

Маємо нове зображення позитивної аномалії, доступне до завантаження. Для кращої візуалізації краще використати всього три кольори: для від’ємних тенденцій, для тих концентрацій, які не змінилися протягом п’яти років та для позитивних.

13. Зображення було збережено на Google Drive за допомогою скрипта експорту зображення для подальшого завантаження в додаткові програми. Після запуску процес збереження займає декілька хвилин.

<pre> Export.image.toDrive({ image: pos_anomaly.toBands().clip(roi), description: "anomaly", region: roi, scale: 7000, maxPixels: 1e13, folder: "diplom", crs: "EPSG:4326" }) </pre>	<p>pos_anomaly,- назва карти  roi - область інтересу,  масштаб виходу: 7 кілометрів,  максимум пікселів у кожному кадрі: 1e13,  потім – папку на Google Drive,  crs – система координат: epsg 4326</p>
--	--

Аналогічно експортовано і інші необхідні зображення.

14. Для дослідження впливу теплових електростанцій на забруднення атмосфери, використано колекцію даних теплових електростанцій світу станом на 2018 рік "WRI/GPPD/power\_plants", обрано ті, що працюють на вугіллі. Завантажено на карти в разі необхідності.

<pre> var tpp = ee.FeatureCollection("WRI/GPPD /power_plants") .filter(ee.Filter.eq('fuel1','Coal')) Map.addLayer(tpp,[],'Coal');  Export.table.toDrive({ collection: tpp, description: "Coal_Power_Plants", fileFormat: "GeoJSON" }); </pre>	<p>ee.FeatureCollection звертається до бази Global Power Plant Database filter вибирає теплоелектростанції по типу палива 'fuel1','Coal' ("паливо", "вугілля")  Map.addLayer додає точковий шар на карту  Export.table.toDrive використано для завантаження даних ТЕС на свій диск в форматі GeoJSON</p>
---	--

15. На наступному етапі дослідження було використано програми QGIS та EXCEL для обробки та візуалізації інформації. З Google Drive завантажено сформовані в GEE карти в форматі GEO\_TIFF. Графіки завантажено безпосередньо із консолі в доступних форматах. В QGIS до завантажених карт було додано шейп-файли регіонів України, розташування теплових електростанцій, задано колірну гаму, легенду, необхідні графіки та ін. Створено тематичні карти: середніх концентрацій речовин, карти тенденцій Кендалла, карти аномальних перевищень. В програмі EXCEL для прикладу можливості використання даних платформи GEE, було створено список середніх концентрацій CO на протязі п'яти років з графіка середніх концентрацій CO завантаженого з GEE у форматі csv (додаток б).

16. Здійснено аналіз отриманих графіків, карт та таблиць, порівняння концентрацій з нормами ГДК України. На платформі GEE, додатково використовуючи Inspector, було отримано середні концентрації досліджуваних речовин, обираючи на карті найбільш забруднені пікселі в межах міських агломерацій.

Висновок до розділу 2.

Використання супутникового моніторингу Землі широко застосовується для аналізу та прогнозування кліматичних змін, досліджень забруднень атмосферного повітря, наявності рослинного покриву, водойм, забудованих територій, виявлення вулканічної діяльності, моніторингу наслідків стихійних лих та ін. Контроль та моніторинг якості повітря стає дуже важливим, а використання методів дистанційного зондування займає важливе місце у його проведенні [44]. Платформа GEE являється потужним інструментом для використання в дослідженнях супутникових даних, адже дозволяє обробити та проаналізувати величезну кількість інформації в порівняно короткий час, без застосування спеціальних програм та обладнання, потребує лише доступу до комп'ютера та до інтернету, і є безкоштовним ресурсом, що вирівнює доступ до інформації та аналізу зацікавлених осіб. Наявність на ресурсі навчальних відео та прикладів скриптів спрощує користування цим ресурсом.

**РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЙ  
ОСНОВНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ УКРАЇНИ  
З ВИКОРИСТАННЯМ GOOGLE EARTH ENGINE**

					<b>ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ</b>			
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>				
Виконав		Лініченко Т.М.			Дослідження стану навколишнього середовища з використанням Google Earth Engine	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Плющ Т.М.					40	34
Консультант		Кінь Д.О.				40		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				КНУБА, група зГСТм-23		



За описаною вище розробленою схемою зроблено дослідження основних забруднюючих речовин атмосферного повітря, проаналізовано їхній вплив на довкілля та здоров'я людей, основні джерела забруднень, визначено найбільш забруднені території України.

### 3.1 Дослідження забруднення повітря метаном (CH<sub>4</sub>).

Після вуглекислого газу найважливішим парниковим газом є метан. Природним джерелом CH<sub>4</sub> є результат розкладання органічного вуглецю у водно-болотних угіддях, в океані, діяльність термітів, тварин в дикій природі, як наслідок лісових пожеж, викиди з геологічних джерел [37, 80], але майже 70 відсотків – це діяльність людини: звалища, худоба, включаючи гній тварин, відходи та стічні води, виробництво та використання енергії та ін. [67, 68].

За допомогою TROPOMI можна дослідити концентрації CH<sub>4</sub> у стовпці з високою чутливістю до земної поверхні, знімками охоплено великі просторово-часові об'єми, щоб зворотно змоделювати джерела викидів (табл. 3.1). Місія Sentinel-5 Precursor узгоджується із S-NPP, використовуючи інформацію VIIRS при виборі TROPOMI пікселів, які вільні від хмар. На базовому рівні алгоритм отримує середнє співвідношення сухого повітря в суміші метану XCH<sub>4</sub> у колонці вимірювань Sentinel-5 P. Інформація про наявність метану присутня лише offline тому дані надаються із затримкою в 1 або трохи більше місяців.

Таблиця 3.1

Характеристики набору даних з приладу TROPOMI для CH<sub>4</sub>

Назва	Опис	Мін*	Макс*	Одиниці виміру
CH <sub>4</sub> _column_volume_mixing_ratio_dry_air	Усереднене по колонці співвідношення метану в суміші сухого повітря, частки на мільярд	1285	2405	Моль частка

TROPOMI для аналізу вмісту CH<sub>4</sub> використовує інформацію щодо поглинання з діапазону 760 нм (Oxygen-A) та діапазону SWIR. Є певні проблеми з якістю даних, вони включають неповне видалення поганих пікселів та помилкові значення CH<sub>4</sub> на окремих ділянках, нефільтровані пікселі над внутрішніми водами. Невизначеності для XCH<sub>4</sub> базуються на точності одного зондування, для загальної оцінки пропонується коефіцієнт множення похибки 2. Дані до листопада 2021 року надаються лише для CH<sub>4</sub> над сушею, пізніше були додані спостереження над великими водними об'єктами. У період з 26.07.2022 по 31.08.2022 дані відсутні, бо відбувся збій приладу.

Роздільна здатність згідно інформації з набору даних, становить близько 1 км, а оскільки в описі (табл. 2.2) згадується 7 км роздільна здатність, доцільно при складанні скрипту взяти саме таку цифру, що підтверджується більшими розмірами пікселів при візуалізації на платформі GEE.

Створено графік середніх концентрацій метану (згідно додатку 1).

В результаті отримано такий графік (рис. 3.1), який було завантажено в форматах csv, та png натиснувши на іконку в верхньому правому кутку редактора.

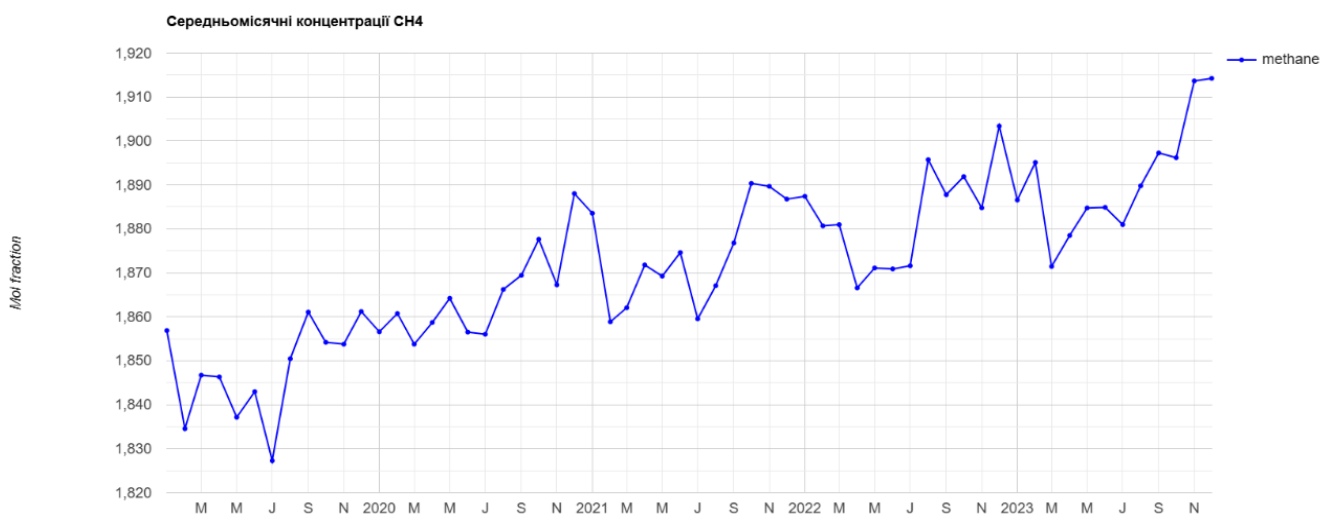


Рис. 3.1 Середньомісячні концентрації метану в період з 2019 до 2023 року

Аналізуючи отриманий графік можна помітити сезонні коливання рівня забруднень. З середини літа спостерігається різке підняття рівня цієї речовини

через викиди сільського господарства: виділення метану з відходів корівників, свинарників, гниття на звалищах, активізація у ґрунті та водоймах біологічних процесів. Взимку відбувається зниження рівня метану через знижені температури та уповільнені мікробіологічні процеси. В той же час помітні невеликі сплески концентрацій через споживання природного газу для опалення.

Динаміка. В період 2019–2022 років графік демонструє рівень викидів відносно стабільний, спричинений діяльністю аграрного сектора, газотранспортної системи, звалищ, шахт та ін. Вплив пандемії COVID-19 майже не відчутний. Викиди  $\text{CH}_4$  не зменшилася, бо більшість джерел не пов'язана із транспортними обмеженнями, а основні забрудники не припиняли своєї діяльності.

Період повномасштабного вторгнення 2022–2023 роки. Відбувалося руйнування промислових об'єктів, газової інфраструктури в зоні бойових дій і це призвело до підняття викидів метану. Зросли викиди в північній і центральній частині України. Можливими причинами можуть бути релокація сільськогосподарських підприємств, зниження контролю за звалищами. На сході нашої держави була призупинена чи взагалі припинено видобування нафти, газу та кам'яного вугілля, це могло призвести до тимчасового зниження локальних викидів.

Візуалізація в GEE: створено шар карти, використано кольори та діапазон для візуалізації, рекомендовані для використання в прикладі коду. Запущено код за допомогою Run. На екрані створено тематичну карту середніх концентрацій метану з зображенням концентрацій в кольорах (рис. 3.2). Для усунення проблем з контрастом на карті було використано інструмент «розтягування», обрано 90%, таким чином збільшено контраст, нижчі значення мають темніший колір, а вищі – яскравіші. Таким чином аналіз змін буде проводити зручніше.



*Рис. 3.2 Середні концентрації метану в період з 2019 -2023 року*

Також є можливість додати легенду до цієї карти за вказаними кольорами. Але зручності дослідження було створено тематичну карту у програмі QGIS.

Помітні відсутні пікселі на території Карпатських та Кримських гір. В горах нема джерел забруднень, отже концентрації дуже низькі або даний забруднювач там відсутній. Згідно нашого запиту необхідно показати карту з певним діапазоном значень забруднювача, тому нижчі або від'ємні значення, які часто обраховуються TROPOMI на територіях незабруднених або з дуже малою кількістю досліджуваної речовини, не були показані. На основі даної карти створено діаграму аномальних значень (рис. 3.3). Згідно отриманої діаграми значення викидів метану коливаються в межах 80 одиниць -40 до 40 від 2019 до 2023 року.

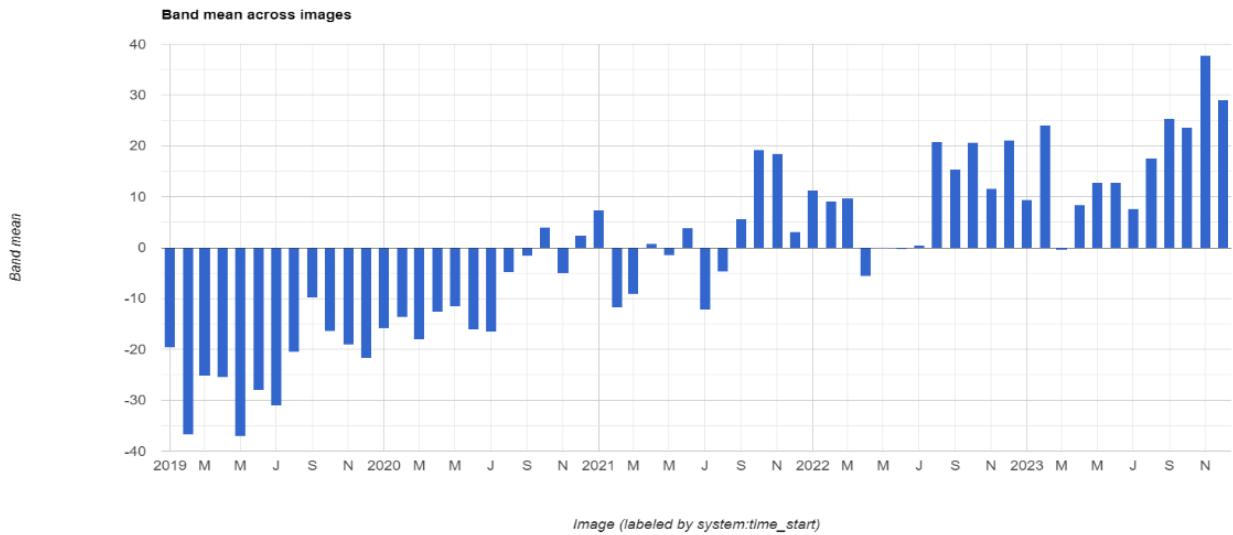


Рис. 3.3 Діаграма аномалій метану в період з 2019 -2024 року

Зроблено аналіз позитивних аномалій, для цього створено новий графік на основі простого копіювання скрипту, та внесено відповідні зміни в код для позитивних аномалій. Створено нову діаграму, в якій маємо лише ті місяці, у яких середнє значення аномалії є позитивним (рис. 3.4).

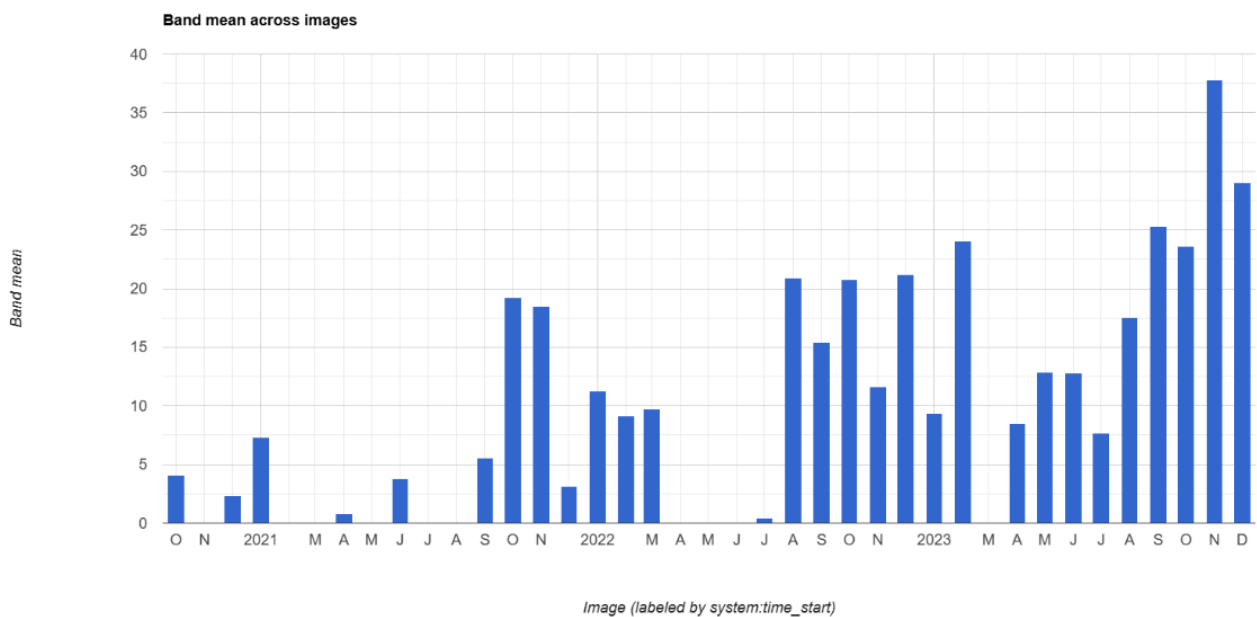
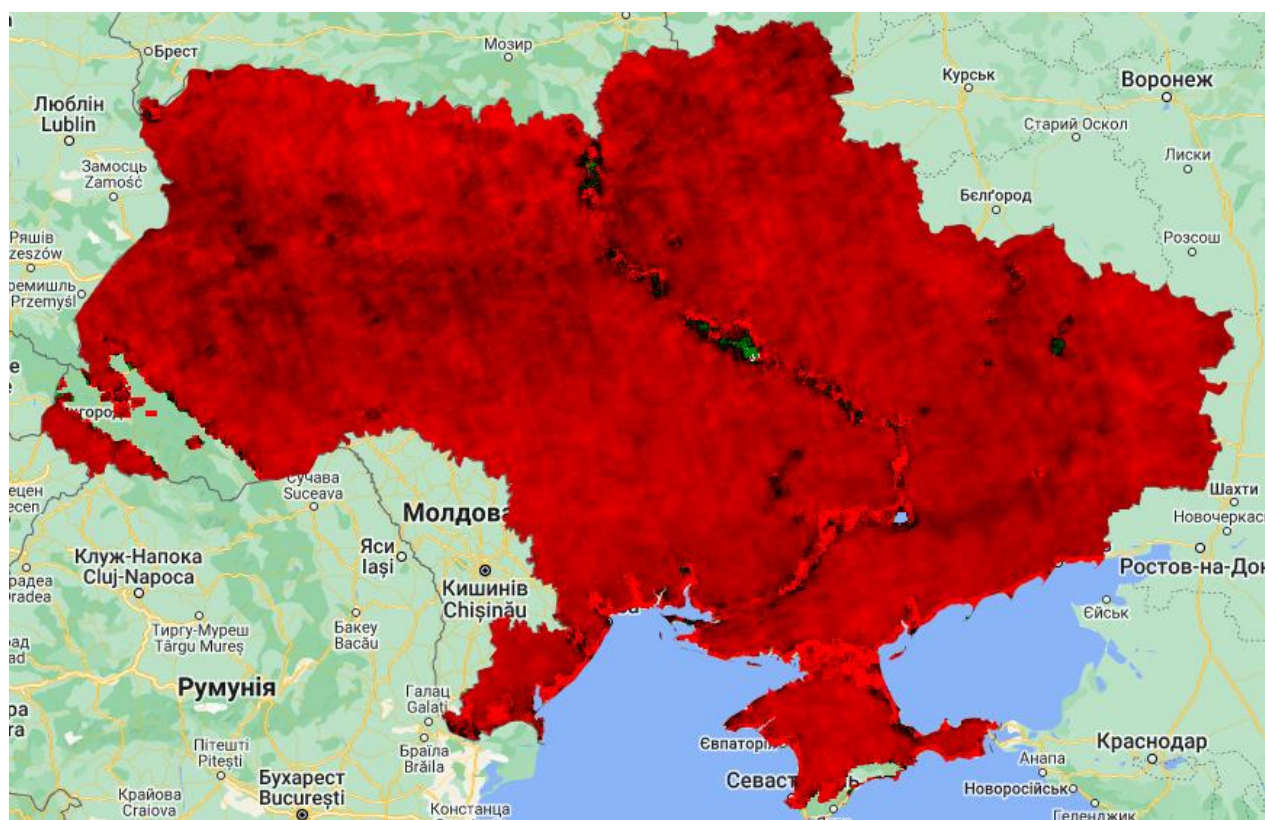


Рис. 3.4. Діаграма позитивних аномалій метану в період з 2019 -2024 року

Проаналізовано, що найбільше позитивних перевищень були зафіксовані в 2023 році, з найвищим в листопаді 2023 року.

Створено карту трендів Кендалла. Для контрасту обрано кольори червоний, чорний та зелений. Червоним кольором зображені тенденції до підвищення, чорним – нульові, зеленим – тенденції до зниження (рис. 3.5)



*Рис. 3.5 Зображення тенденцій Кендалла в GEE в період 2019-2023 років*

Створені карти збережено на Google Drive та завантажено на персональний комп'ютер.

На наступному етапі нашого дослідження використано програму QGIS для обробки та візуалізації інформації.

Карта концентрацій  $\text{CH}_4$  (рис. 3.6) показує, що дуже забрудненою метаном є атмосфера Херсонської, Запорізької, Одеської, тимчасово окупованої АР Крим, та вздовж берегів Дніпра, а саме лівий берег: південно-східна частина Київської, північ Черкаської, захід Полтавської областей, місця концентрації промислових підприємств, в тому числі нафтопереробні заводи як-от в м. Кременчук Полтавської області, виробництво пластмас в м. Черкасах, області та регіони з розвиненим сільським господарством, особливо тваринництвом. Також викиди метану спостерігаються в місцях видобутку нафти та газу, якими в Україні є

Південний нафтогазоносний регіон, Східний нафтогазоносний регіон та Західний нафтогазоносний регіони України.

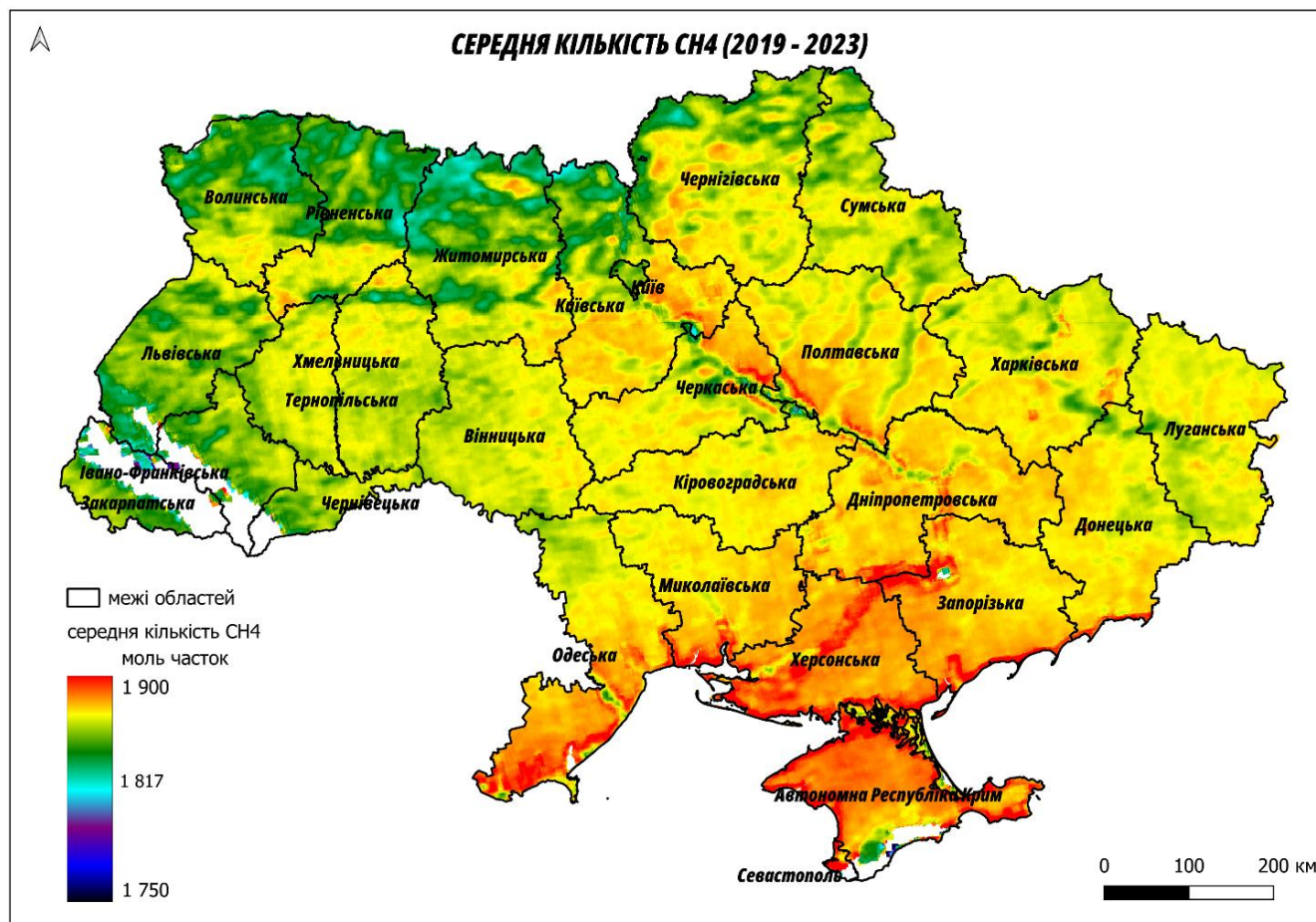
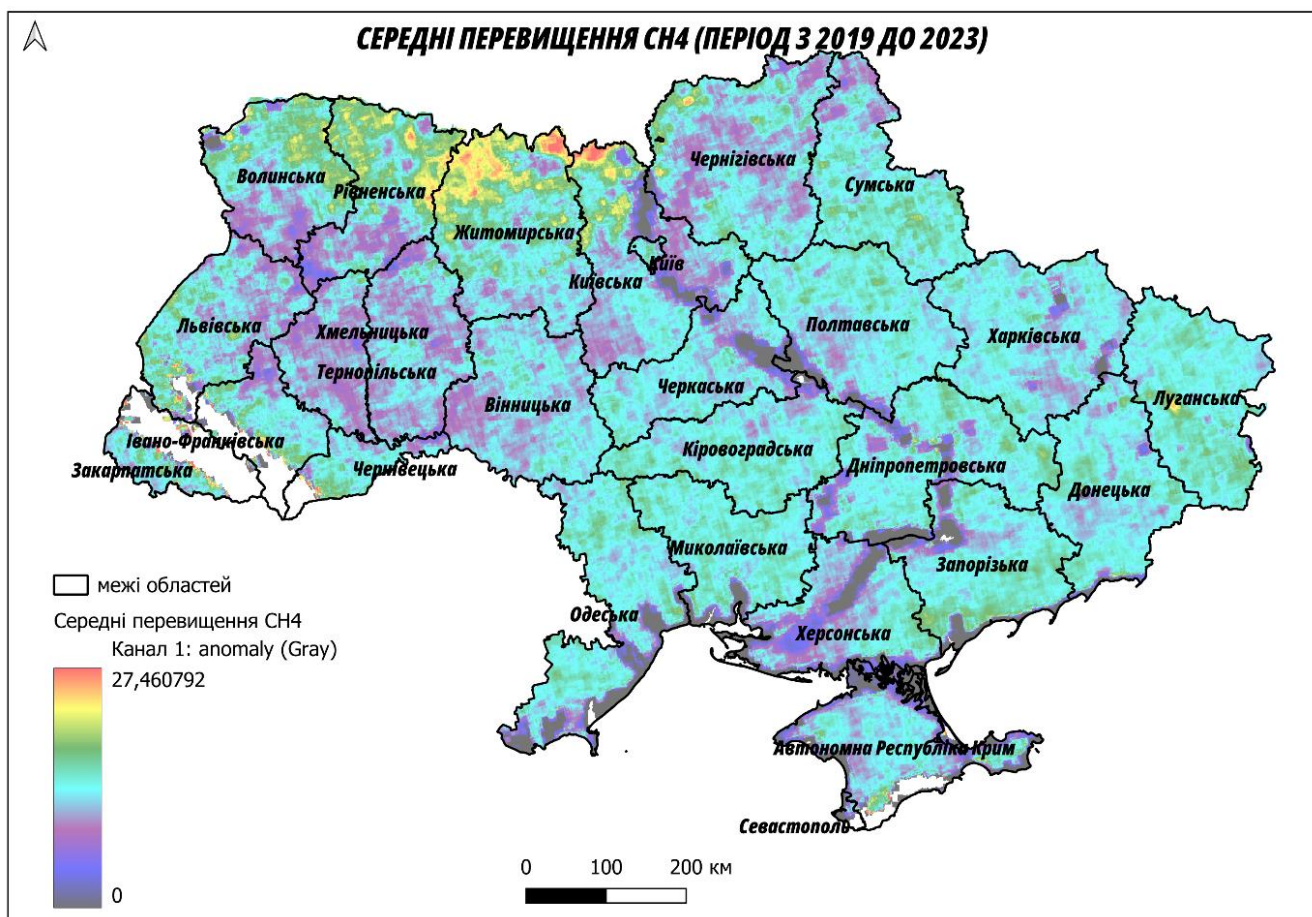


Рис. 3.6 Карта концентрацій СН4

Найбільш виражений коефіцієнт перевищень за період 2019 до 2023 включно спостерігається на півночі Житомирської та Київської області, є осередки в Чернігівській області (рис. 3.7). Можливі причини – природні підвищені концентрації на болотах та торф'яниках, розміщення сільськогосподарського виробництва.

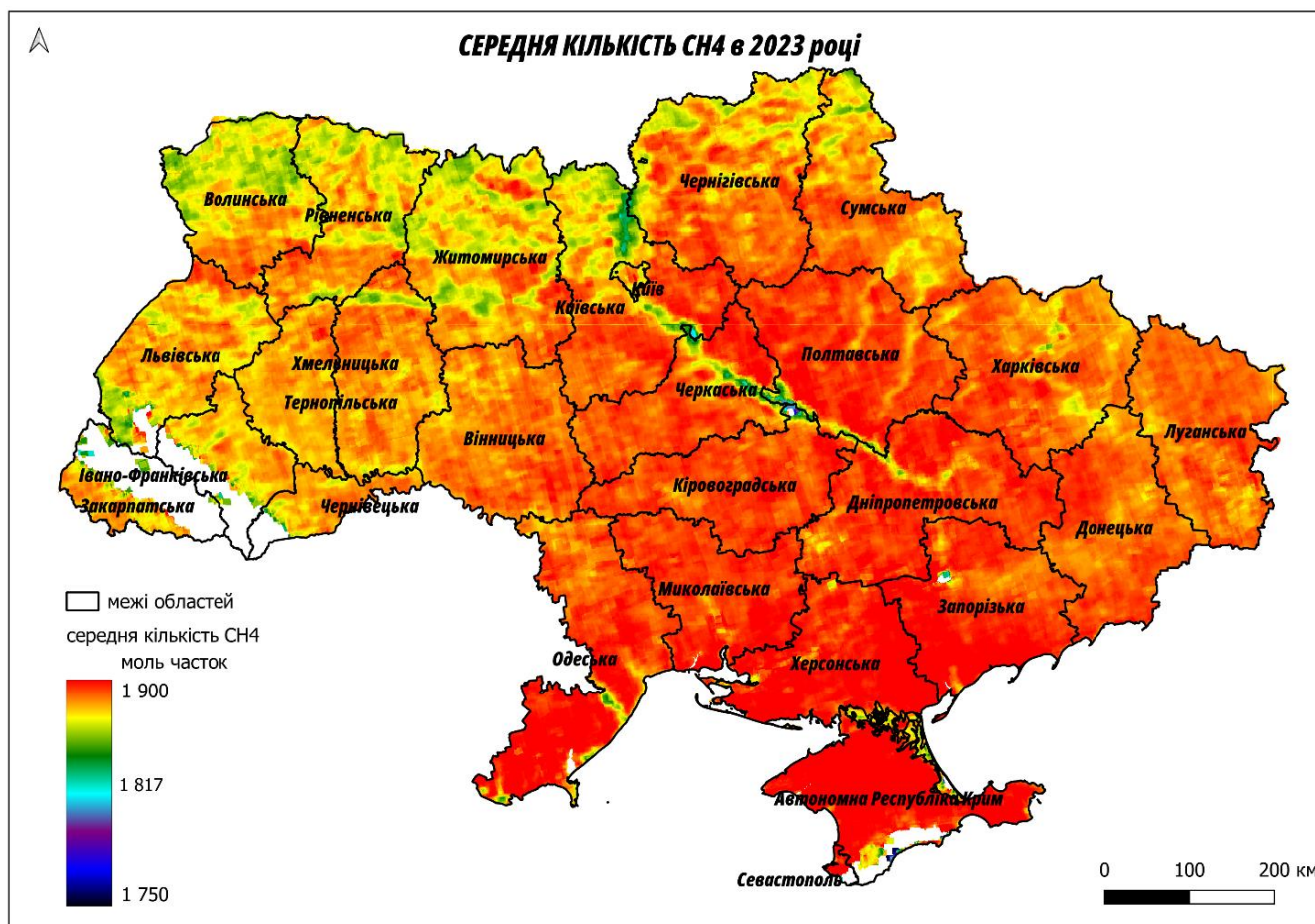


*Рис. 3.7 Середні перевищення СН<sub>4</sub>*

Найвищий пік зростання спостерігався в листопаді 2023 року. Було проаналізовано, на яку область припадає цей пік.

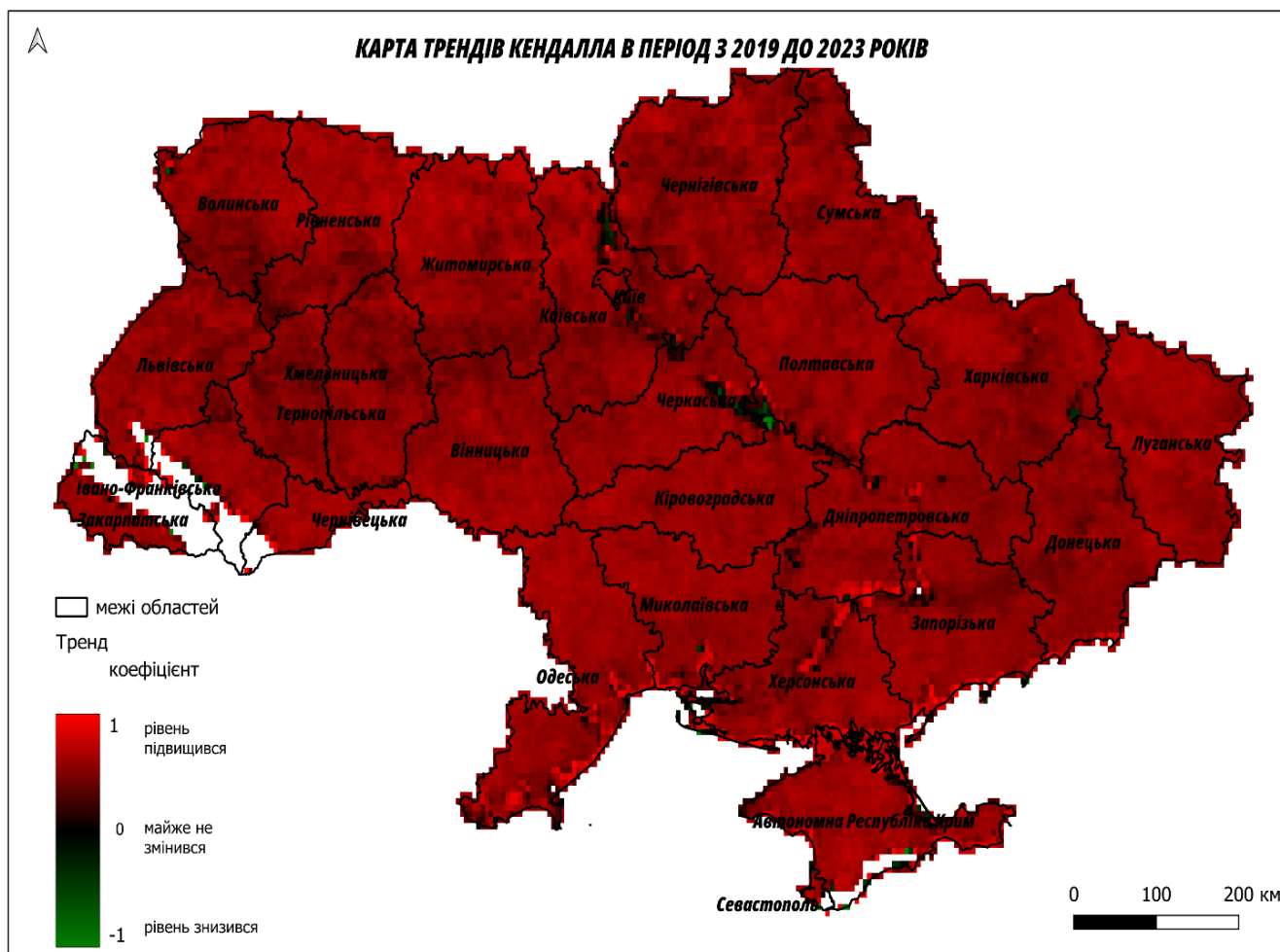
Згідно карти концентрацій на 2023 рік (рис. 3.8), найбільші концентрації на кінець 2023 року спостерігаються на місці колишнього Каховського водосховища. Після підриву дамби 6 червня 2023 року відбулося підтоплення значних територій, що знаходяться нижче за течією, як наслідок - забруднення продуктами нафтопереробки, змитого водою ґрунту, вмістом септиків та стічних ям річки Дніпро, і в той же час зневоднення так званого Каховського моря, що спричинило масову загибель та гниття рослин та тварин, та аномальні концентрації метану на даній території.





*Рис. 3.8 Карта концентрацій СН4 в 2023 році*

За допомогою коефіцієнта трендів Кендалла (рис. 3.9) підтверджено загальну тенденцію до зростання забруднення цим газом атмосфери України. Лише деякі території мають тенденцію до зниження концентрацій – це території по течії р. Дніпро в північній та центральній його частині, та незначні території в межах Карпатських гір та узбереж морів, найяскравіші перевищення на місті колишнього Каховського водосховища, а також узбережжя Чорного моря – м. Одеса, м. Приморське, м. Чорноморськ та Азовського – тимчасово окуповані м. Бердянськ, м. Приморськ, м. Кирилівка. Помітно, що тимчасово окуповане м. Маріуполь має тенденції до зниження забруднень, що зумовлено знищенням або зупинкою підприємств під час активних бойових дій.



*Рис. 3.9 Карта трендів Кендалла CH<sub>4</sub>*

Отже, на динаміку забрудненості газом CH<sub>4</sub> в цілому по Україні не суттєво вплинули жорсткі карантинні заходи з 12 березня 2020 р. до 3 квітня 2020 р. продовженого до 24 квітня 2020 р. на усій території України [78]. Зростання, характерне для квітня, було незначним, а падіння крім липня було ще і в червні. Графік зростання метану дещо змінився і в 2022 році, на початку воєнних дій. В квітні 2022 року замість зростання відбулося падіння рівня, але концентрації забруднень відновили своє поступове зростання до кінця 2023 року.

### 3.2. Дослідження забруднення повітря діоксидом азоту (NO<sub>2</sub>).

Діоксид азоту забруднює атмосферу головним чином в результаті людської діяльності: двигуни внутрішнього згоряння, спалювання викопних вуглеводнів для опалення, вироблення електроенергії, викиди з заводів та фабрик, пожеж. Він є потужним окислювачем, дуже шкідливий для дихальної

системи, навіть низькі концентрації викликають набряк легень, виявляє канцерогенну, імуно- та генотоксичну дію [51]. Невелика його кількість створюється природним способом під час грози та як результат фіксації азоту ґрунтовими бактеріями [52].

Інструмент TROPOMI дозволяє збирати дані по цій сполуці з дуже високою роздільною здатністю, майже в реальному часі. В базі даних GEE є набори по присутності NO<sub>2</sub> як у тропосфері так і в стратосфері. Даний прилад обробляє отримані результати, а для передачі в Google Earth Engine ця інформація відфільтрується, сортується, видаляються пікселі, які мають значення якості, менші встановленого показника, в нашому випадку, менші за 75% (для набору tropospheric\_NO2\_column\_number\_density), який ми використовуємо у своєму дослідженні. Роздільна здатність пікселів цього набору - 1113,2 метра, що дозволить відслідкувати забруднення атмосфери навіть на регіональному рівні. Помітно, що в діапазоні значень є «-». Це так званий «шум у даних». Такі значення спостерігаються у чистих регіонах або з дуже низьким забрудненням (табл.3). На платформі рекомендують залишати для досліджень значення, які не нижчі за «-0,001 моль/м<sup>2</sup>» [50].

Таблиця 3.2 [50]

Характеристики набору даних з приладу TROPOMI для NO<sub>2</sub>

Назва	Одиниці виміру	Min	Max	Опис
tropospheric_NO2_column_number_density	моль/м <sup>2</sup>	0,00064	0,0096	Кількість діоксиду азоту в стовпці тропосфери

В програмі представлені значення NO<sub>2</sub> та NO як загальний показник, бо дана речовина при денному світлі протягом хвилин має властивість перетворюватися одна в одну.

Було імпортовано дані із супутника Sentinel-5P із поля Near Real-Time Nitrogen Dioxide та дані розташування Теплових електростанцій (ТЕС), що

працюють на вугіллі. Скрипти створено аналогічно дослідженням забруднення метаном згідно додатку 2. Створено графік динаміки змін (рис.3.10)

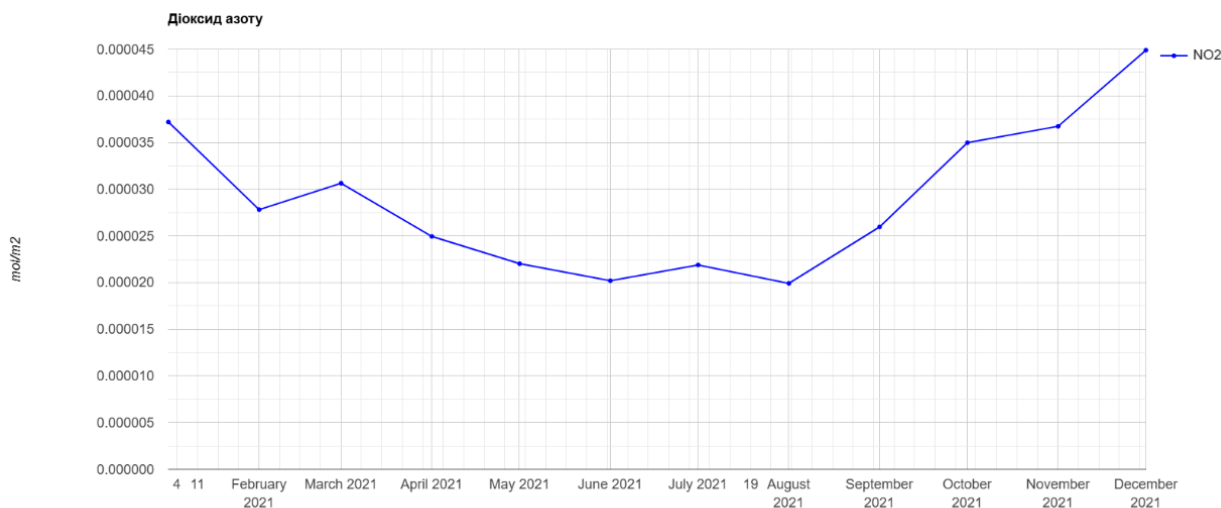


Рис. 3.10 Зміна концентрацій діоксиду азоту в 2019-2023 роках

Сезонні зміни. Забруднення повітря азотними сполуками має свої особливості. В Україні концентрації змінюються залежно від сезону (рис. 3.11). Концентрація починає зростати з середини літа, досягає свого піку в листопаді-січні, а потім спостерігається поступовий спад до мінімумів з травня до липня.

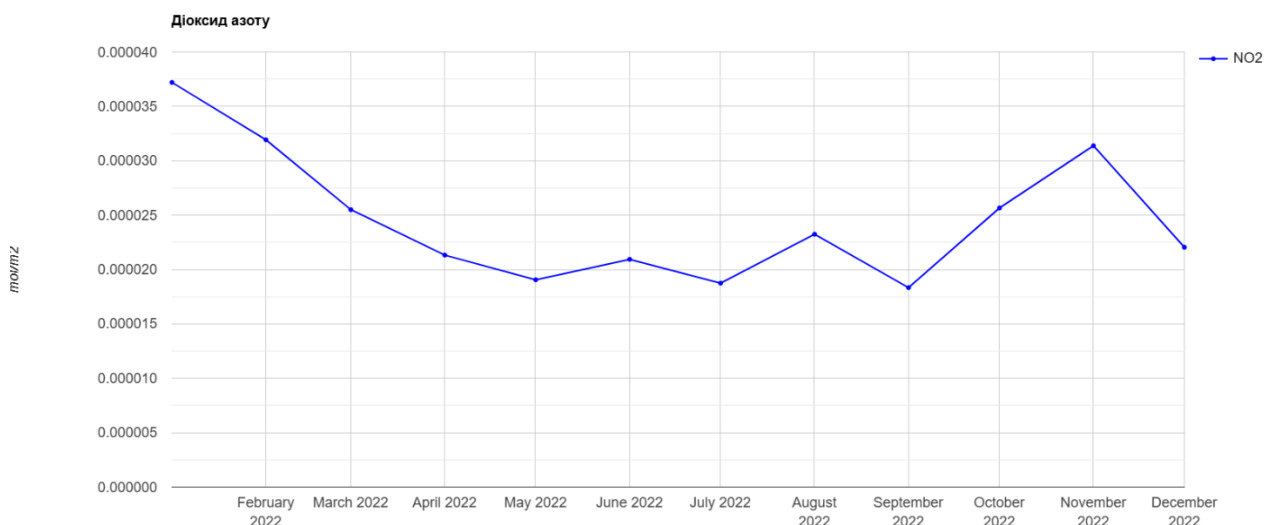
Динаміка. Середні показники NO<sub>2</sub> знизилися під час пандемії Covid-19, хоча загальна картина спадів і перевищень не змінилися. Це спричинене зниженням використання автотранспорту та переведення діяльності в дистанційну, зменшення заторів, зниження викидів від опалення та від промислового виробництва (деякі об'єкти призупиняли або скорочували діяльність, як от будівельна галузь), зменшення викидів від спалювання в аграрному секторі та ін. В 2021 році відбувся зріст концентрацій, після проведення масової вакцинації та послаблення умов карантину з піком в грудні 2021 року.

Військові дії є причиною змін концентрацій NO<sub>2</sub> над Україною. Графіки змін концентрацій, які ми побудували в GEE, змінивши період дослідження, показують відмінності довоєнного та воєнного періодів. Було відмічено підвищені концентрації в 2019-2021 роках (рис. 3.11) порівняно з періодом 2022 (рис. 3.12) та 2023 років (рис. 3.13).



*Рис. 3.11 Графік середніх концентрацій діоксиду азоту в 2021 році*

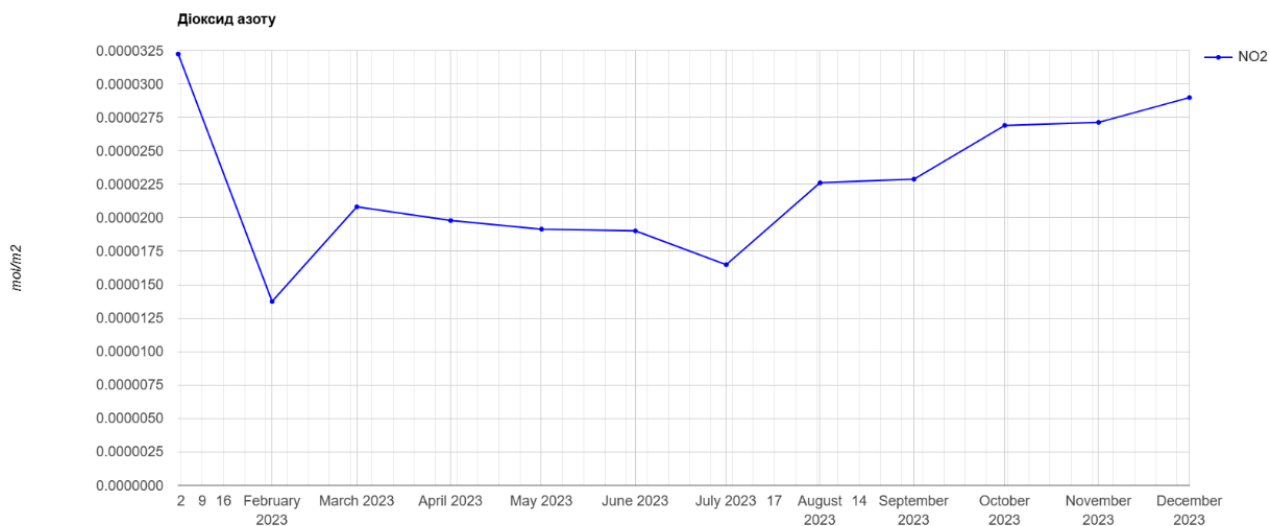
Знову побудований графік яскраво підтверджує нестандартні зміни концентрацій в деякі місяці (рис. 3.12).



*Рис. 3.12 Графік середніх концентрацій діоксиду азоту в 2022 році*

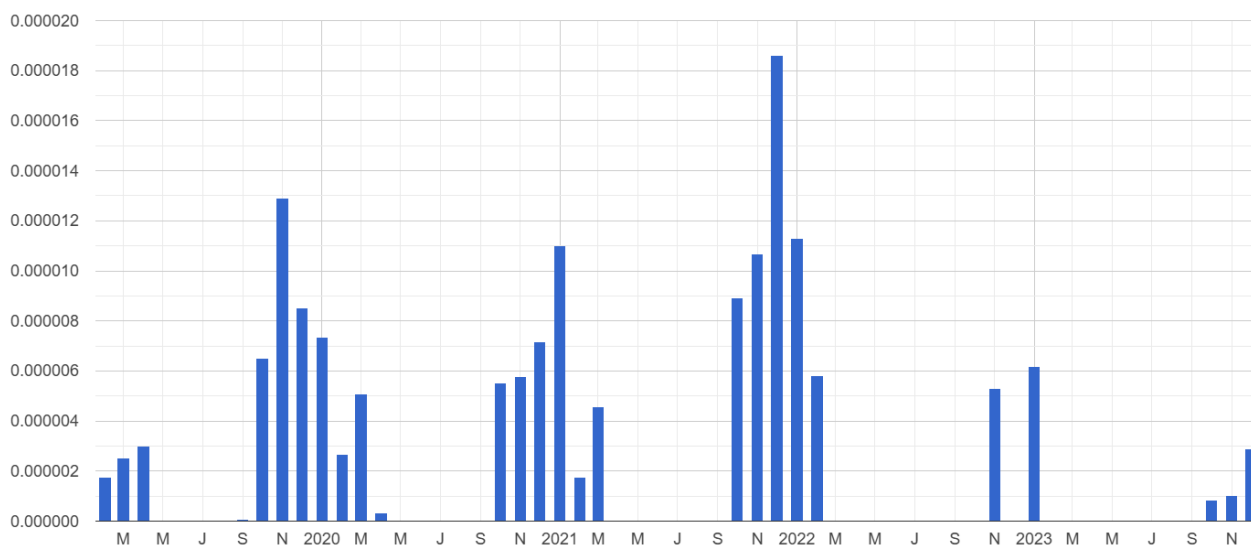
В 2022 році наявні нестандартні зниження концентрацій в місяці, коли очікувано повинен бути підйом. Після масованих ракетних обстрілів 15 та 23 листопада 2022 року спостерігалися різкі зниження концентрацій NO<sub>2</sub>. Зупинка та руйнування підприємств особливо металургійних гігантів спричинила зниження загального рівня забруднювача.

Такі ж нехарактерні піки та падіння спостерігаються і в наступному 2023 році (рис. 3.13)



*Рис. 3.13 Графік середніх концентрацій діоксиду азоту в 2023 році*

Додатково проаналізовано інформацію [81-82] підтверджено, що причиною цього були обстріли в 2023 році енергетичних, промислових об'єктів, які залишали населення без електрики, що спричиняло відсутність опалення, освітлення та зниження викидів промислових підприємств. Під час масованого обстрілу 10 лютого 2023 року було пошкоджено енергетичні об'єкти в Запорізькій, Харківській та Хмельницькій областях, що призвело до аварійних відключень світла, тому на графіку помітно різкий спад концентрацій цього газу в лютому 2023 року.



*Рис. 3.14 Діаграма позитивних аномалій NO2 в період з 2019 -2023 року*

Діаграмою позитивних аномалій (рис. 3.14) підтверджено відмінності між «ковідним», «постковідним» та військовими періодами у кількості NO<sub>2</sub>. Найбільша кількість перевищень спостерігається в грудні 2021 року та січні 2022 року, різке падіння в кінці 2022 року, а 2023 рік має зовсім не схожу картину забруднень.

Для візуалізації результатів створено карти концентрацій NO<sub>2</sub>. Спочатку за допомогою GEE (рис. 3.15), згідно додатку 2, а тоді завантажено їх на Google диск для дальшої обробки в QGIS.

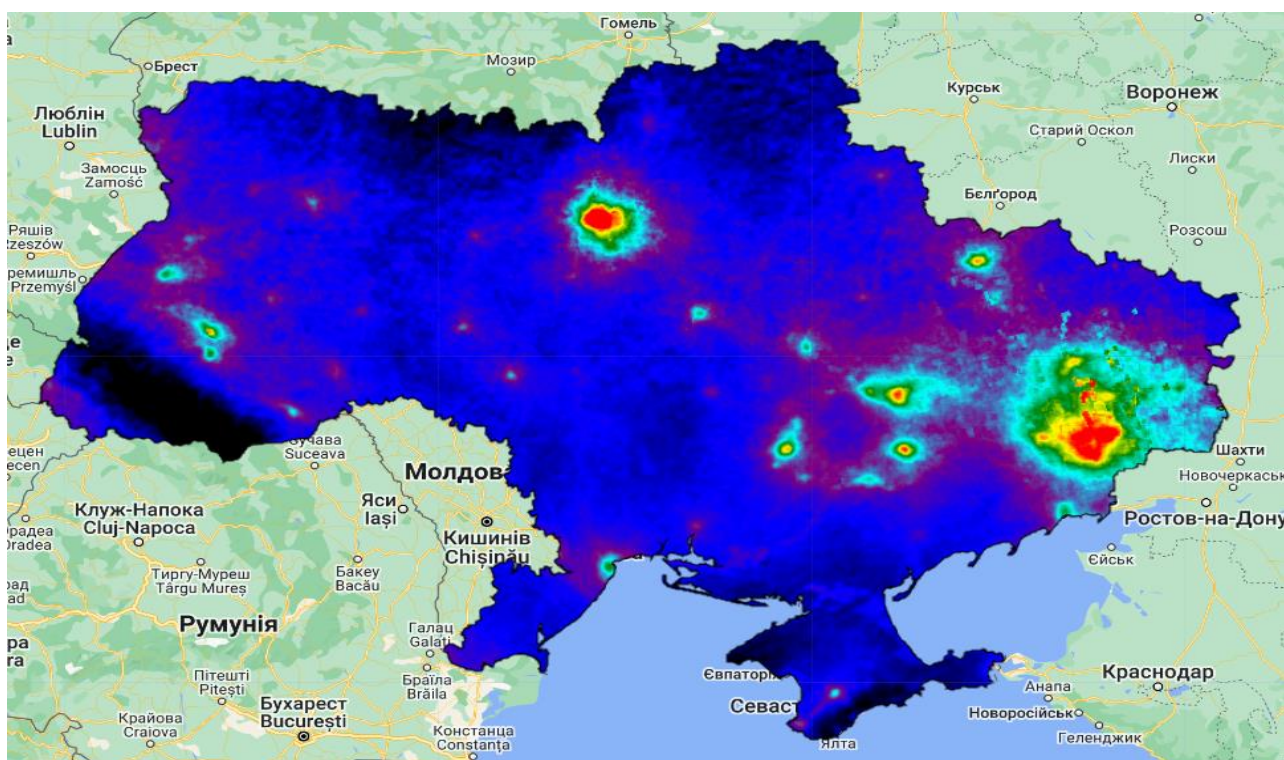


Рис. 3.15 Карта середніх значень NO<sub>2</sub> в редакторі GEE

Найбільшу кількість викидів азоту зафіксовано на території великих населених пунктів з великою концентрацією населення, автомобільного транспорту, промислових підприємств, підприємств з виробництва електроенергії. Найбільш забрудненими є місто Київ, з середніми показниками за 5 років 0.000072 моль/м<sup>2</sup>, а також м. Харків, м. Дніпро, м. Запоріжжя, м. Кривий Ріг, м. Одеса та агломерація тимчасово окупованого м. Донецьк. Дещо нижчі середні концентрації в м. Черкаси, м. Кременчук, м. Львів, м. Івано-Франківськ, м. Бурштин. В м. Люботин, м. Куп'янськ, Харківська обл. та

території тимчасово окупованої Донецької та Луганської областей. Також наявні концентрації забруднення від автомобільного транспорту вздовж швидкісних автострад. Розміщені на карті теплові електростанції (рис. 3.16) є осередками підвищених концентрацій діоксиду азоту, а в Закарпатській області спостерігаємо транскордонне перенесення цієї речовини із сусідньої Польщі. Передмістя великих промислових міст теж мають високий рівень забруднень, це зумовлене концентрацією там промисловості та автомобільного транспорту.

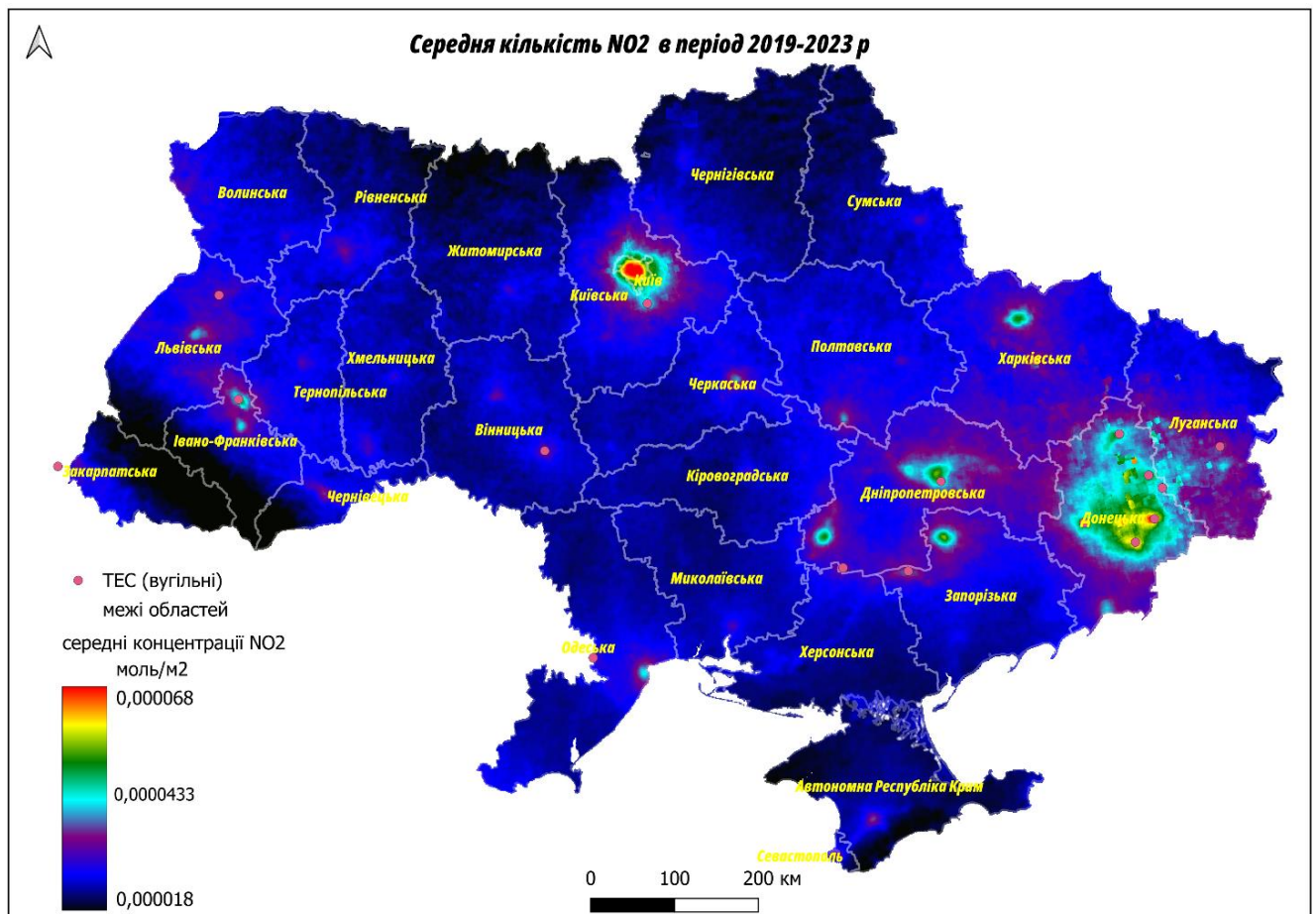


Рис. 3.16 Середня кількість NO<sub>2</sub> в період 2019-2023 років.

На графіку середніх концентрацій (3.10) відмічено зниження концентрацій NO<sub>2</sub>. Для дослідження, де саме відбулися зміни, створено карту трендів Кендалла NO<sub>2</sub> в період з 2019 до 2023 році (рис.3.17)



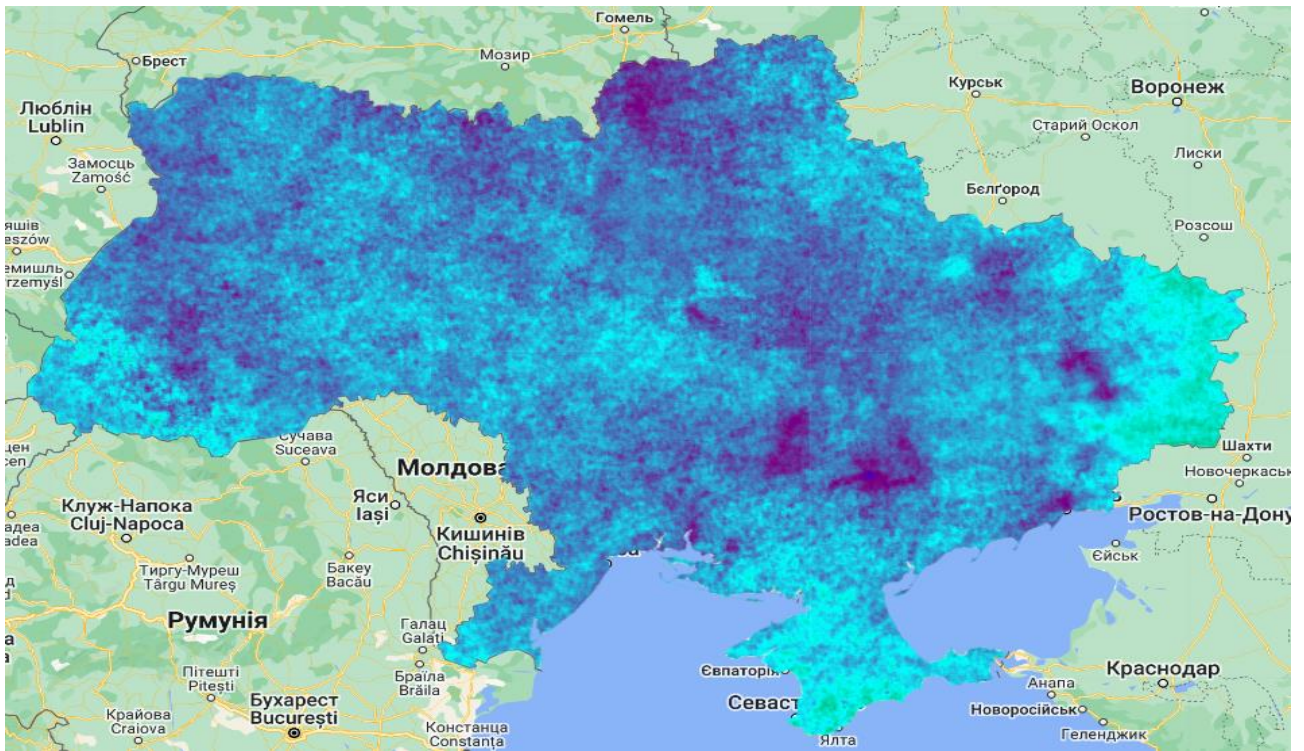


Рис. 3.17 Карта трендів Кендалла NO2 в редакторі GEE

Зроблено аналіз карти трендів, створеної в QGIS (3.18).



Рис. 3.18 . Тренди Кендалла NO2

Загалом концентрація NO<sub>2</sub> за п'ять досліджуваних років має тенденцію до спаду. Підвищення тенденцій - лише в Львівській області, Івано-Франківській (м. Дрогобич, м. Рахів, м. Долина, м. Славське, м. Східниця м. Вижниця, м. Яворів, м. Косів та ін.), тут має місце транскордонне перенесення повітряних мас, а також забруднення місцевими підприємствами. Карта показує, що місця розташування ТЕС навпаки мають тенденцію до зниження концентрацій досліджуваної речовини. Це зумовлене руйнуванням та пошкодженням цих електростанцій від ракетних атак. В т.о. Луганську, Закарпатській області навпаки спостерігаються тенденції до підвищення.

Отже загальні тенденції NO<sub>2</sub> в досліджуваній період мали невелике зниження під час жорсткого карантину, зростання під час послаблення карантинних мір, та спад в воєнний період, особливо на територіях ведення активних бойових дій та місцях пошкоджень інфраструктури по всій території нашої держави. Падіння рівня поступово змінюється підняттям, хоча загальна кількість газу не перевищує період 2019 року.

### **3.3 Дослідження забруднення повітря монооксидом вуглецю (CO).**

Чадний газ (CO) — це отруйний газ без кольору, не має запаху та смаку, й утворюється як результат неповного згоряння бензину, вугілля, торфу, спалюванні опалого листя, викидів з підприємств коксохімічної та металургійної промисловості [58, 59]. Підвищені концентрації CO у повітрі спричиняють токсичний ефект на мозок, серце, розвиток плоду вагітної жінки. Високі концентрації чадного газу посилюють дію інших забруднювачів атмосфери (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>2</sub>) і збільшують ризик розвитку респіраторних захворювань [60]. Розподіл середньої концентрації CO дуже залежить від відносної висоти місцевості. Газ накопичується в низинах і обдувається вітрами з височин. Це - природній колообіг вуглецю у повітрі [83].

Основним джерелом викидів CO є антропогенна діяльність, доцільно проаналізувати концентрацію цього газу на території певної густонаселеної

ділянки з розвиненою промисловістю, на віддалі від територій з активними бойовими діями, на територіях, близьких до ведення бойових дій [85].

Прилад TROPOMI для окису вуглецю (CO) виявляє добову глобальну кількість CO за ясного та хмарного неба, використовується спектральний діапазон 2,3 мкм короткохвильового інфрачервоного випромінювання (SWIR). Спостереження за ясного неба чутливі до тропосферного прикордонного шару CO, хмарність змінює чутливість стовпа на основі змін шляху світла. Проводиться усереднення за загальними стовпчиками для ясного неба та хмарних умов. Продукт із даними про монооксид вуглецю рівня 2 доступний в режимі офлайн (OFFL), майже в реальному часі (NRTI) і повторно обробленого (RPRO). Дані NRTI доступні протягом 3 годин, а OFFL – через кілька днів після отримання. Tropomi надає дані загального усереднення стовпців для окремих пошуків, що має вирішальне значення для перевірки. В дослідженнях рекомендовано використовувати дані з кількістю більшою за 0,5.

Таблиця 3.3 [50]

Характеристики набору даних з приладу TROPOMI для CO

Назва	Одиниці виміру	Min	Max	Опис
CO_column_number_density	mol/m <sup>2</sup>	-279	4.64	Вертикально інтегрована щільність колонки CO

Завантажено необхідні дані на платформі GEE та видозмінено скрипт для аналізу газу CO над Україною, згідно додатку 3. Створено графік середніх концентрацій газу CO в досліджуваній період (рис. 3.19).

Сезонність. Оксид вуглецю має чітко виражену сезонність. Взимку до початку весни концентрація чадного газу збільшується, найбільші значення спостерігаються у березні-квітні, а потім різко зменшуються, досягаючи в липні мінімальних значень (рис.3.19).

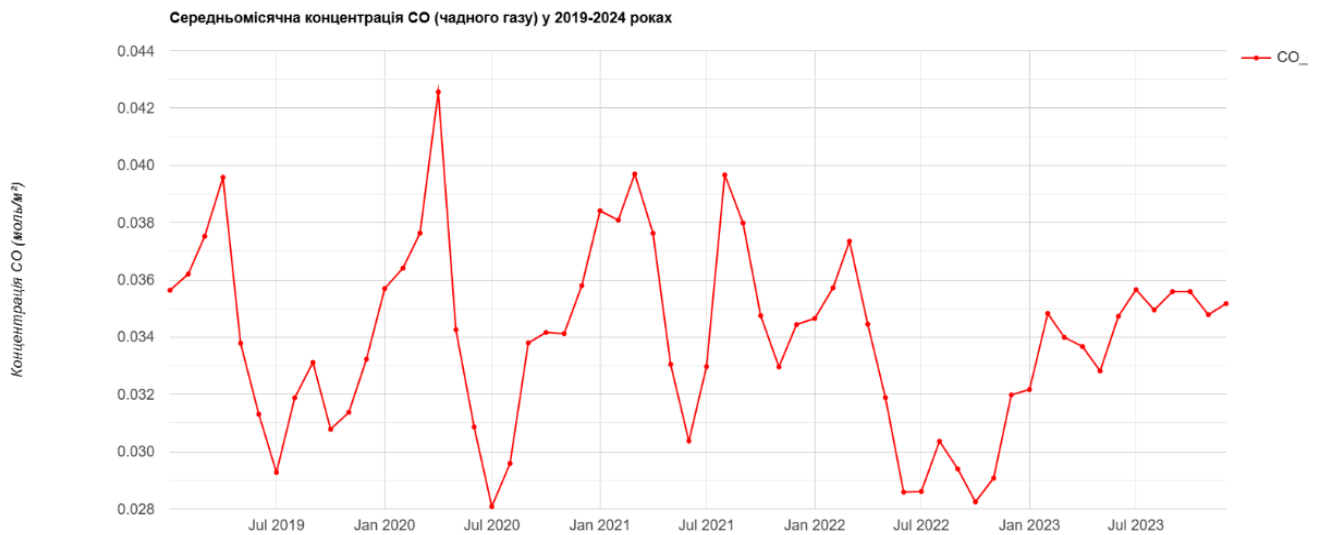


Рис. 3.19. Середньомісячні концентрації CO в 2019-2023 роках

Вплив пандемії Covid - 19 на концентрацію чадного газу було проаналізовано на основі побудованого в GEE графіка концентрацій в період 2020-2021 років (рис. 3.20).

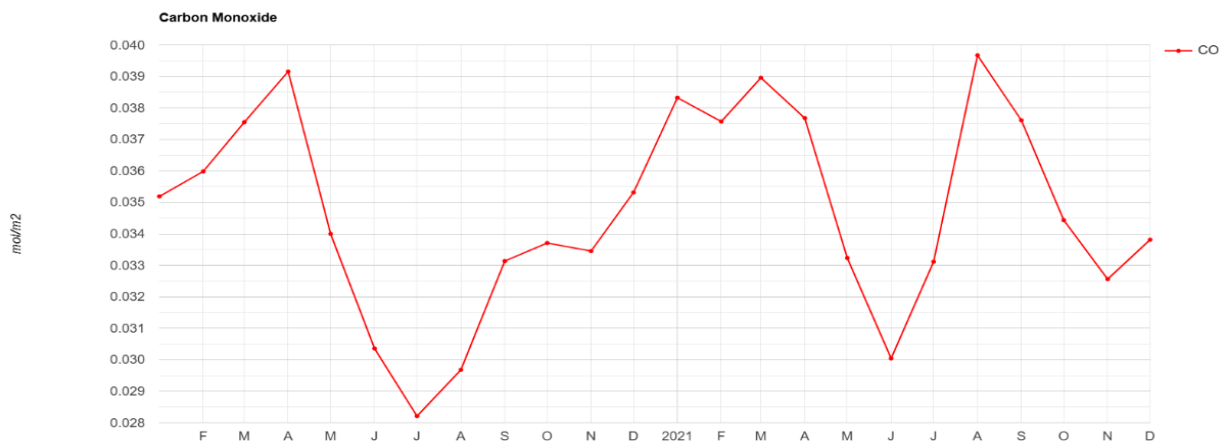


Рис. 3.20 Середньомісячні концентрації CO в 2020-2021 роках

Помітно невеликі зростання концентрацій під час введення жорстких локдаунів, коли населенню дозволяли користуватися власним авто, пік, характерний для лютого місяця в 2021 року був незначний, хоча загальна тенденція до збільшення спостерігалася. Бачимо різке нехарактерне зростання концентрації в серпні-вересні, рівень якого можна порівняти з зимовими місяцями, в дані місяці почалася масова вакцинація і були послаблені карантинні обмеження для вакцинованих громадян [78].

Вплив війни на концентрації чадного газу був відчутним.

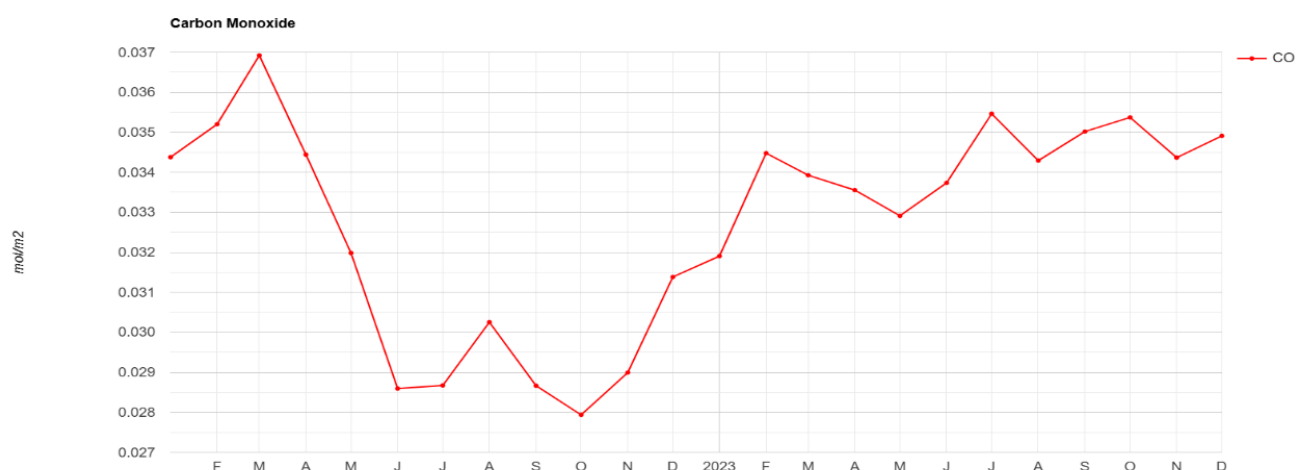


Рис. 3.21. Середньомісячні концентрації CO в 2022 – 2023 роках

Графік (рис. 3.21) наочно демонструє спади та падіння концентрацій, характер його змін не характерний для довоєнного періоду. Порівняно графіки (рис. 3.20 та рис. 3.21) та відмічено нехарактерні мінімальні концентрації в жовтні 2022 року, та менш різкі середньомісячні піки та падіння в 2023 році

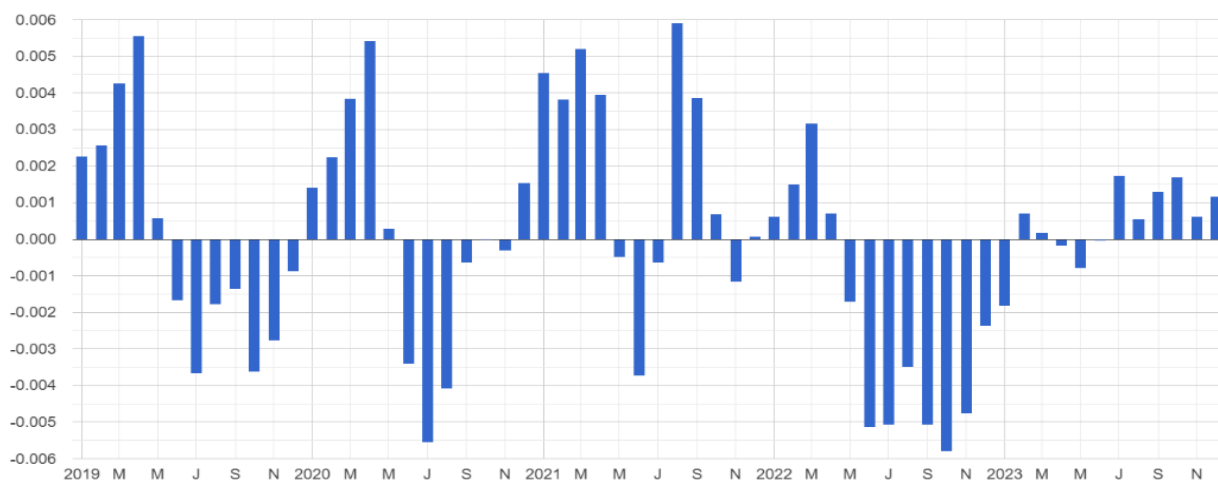
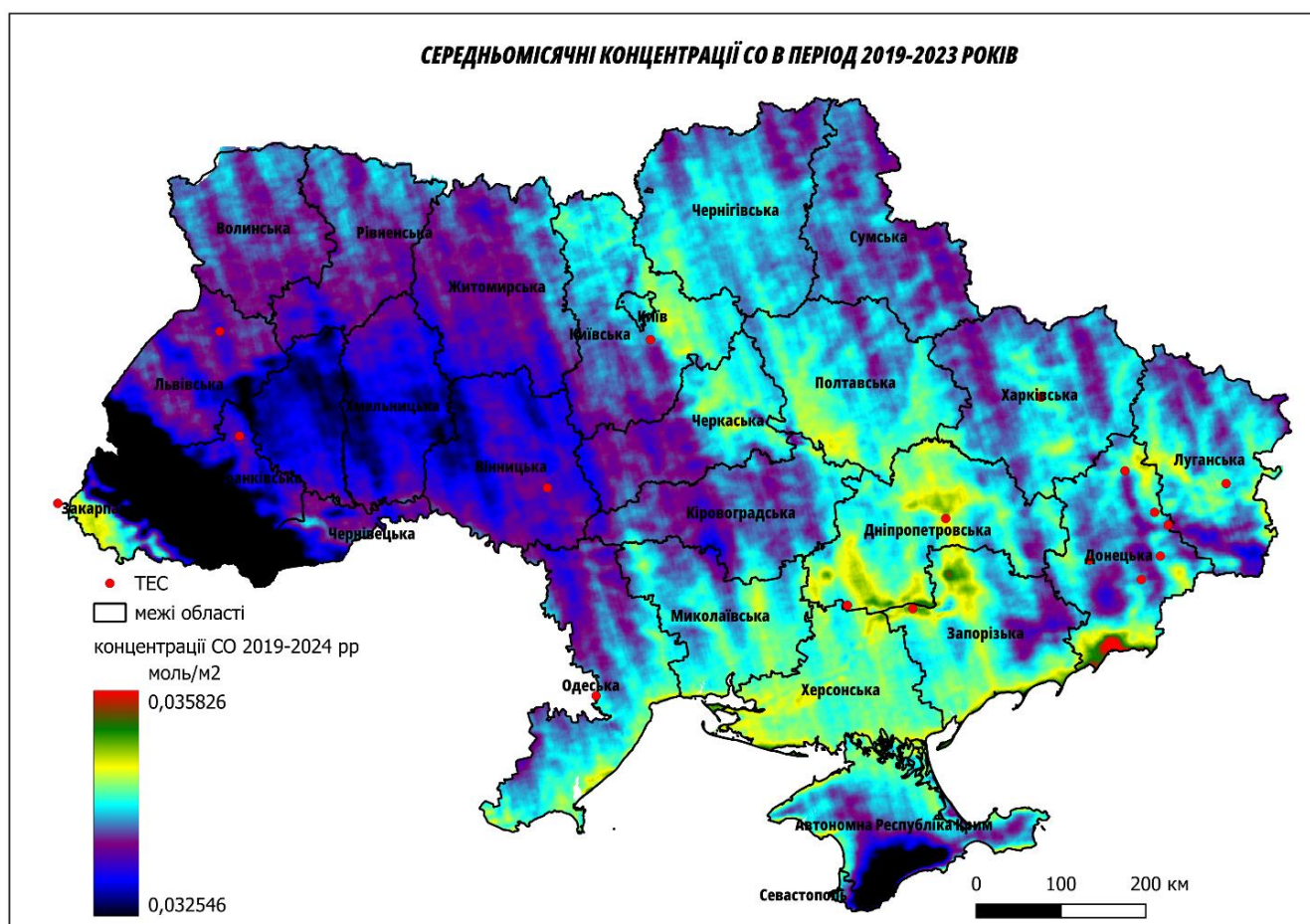


Рис. 3.22 Аномалії концентрацій CO в 2019-2023 роках

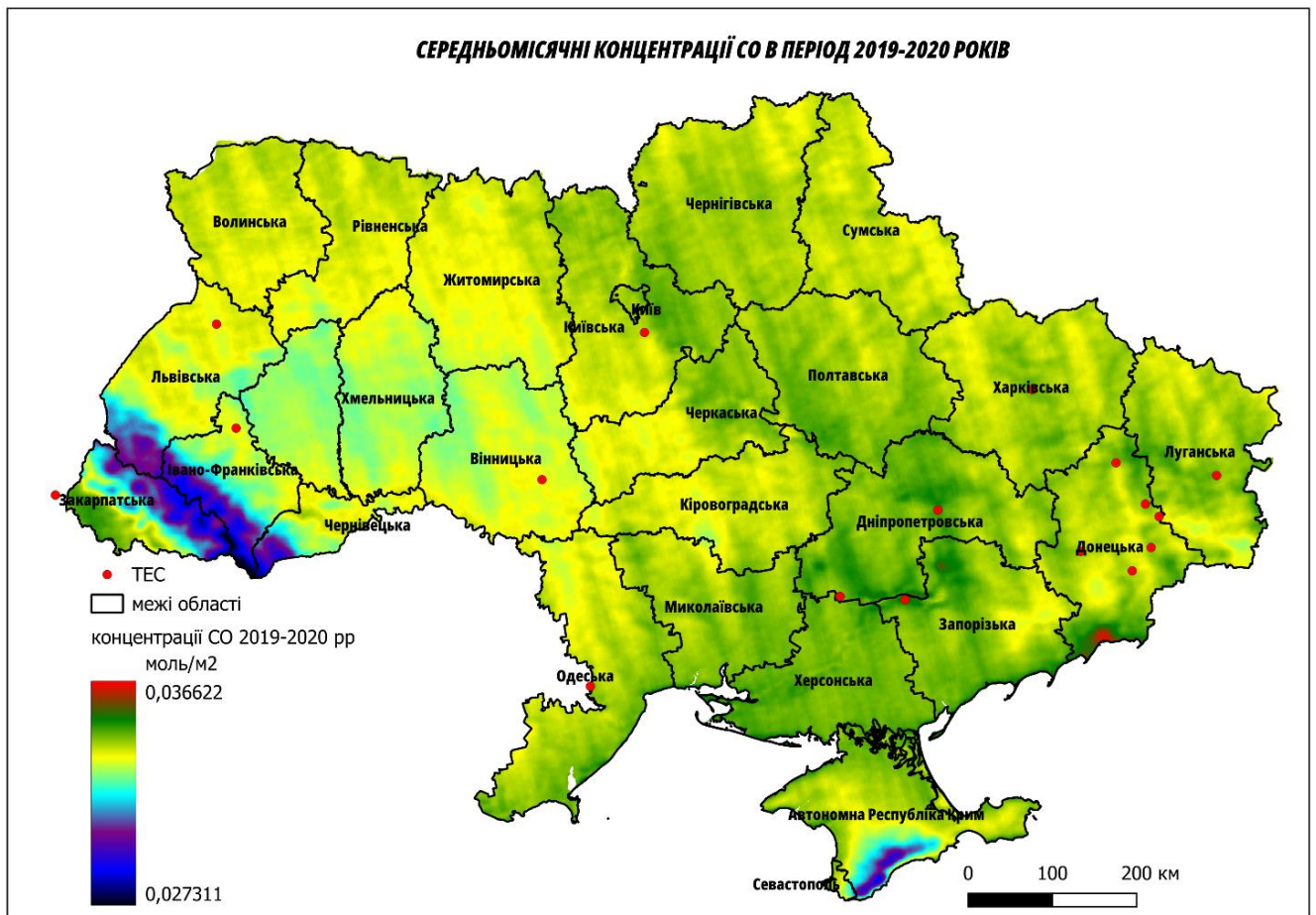
Середні концентрації після різкого падіння в 2022 році поступово підвищуються в 2023 (рис. 3.22). Діаграма демонструє падіння концентрацій було майже на 0,006 одиниць в 2022 році, а в 2023 році перевищення зовсім незначні.

Вплив рельєфу. Найнижчі середньомісячні концентрації CO помічено над висотами, а в Україні – це Карпати та Кримські гори, а найвищі концентрації спостережені у Дніпровській, Закарпатській та Чорноморсько-Азовській низовині. В той же час помічено і відчутний вплив людської діяльності на концентрацію в низинах, особливо в центрах-виробниках сталі, таких як Маріуполь, Запоріжжя, Дніпро, Кривий Ріг. Велика концентрація чадного газу спостерігається також в Києві, Херсоні, навколо електростанцій (Чорнобильська АЕС, Запорізька АЕС).



*Рис. 3.23 Середні концентрації CO в період 2019-2023 рр*

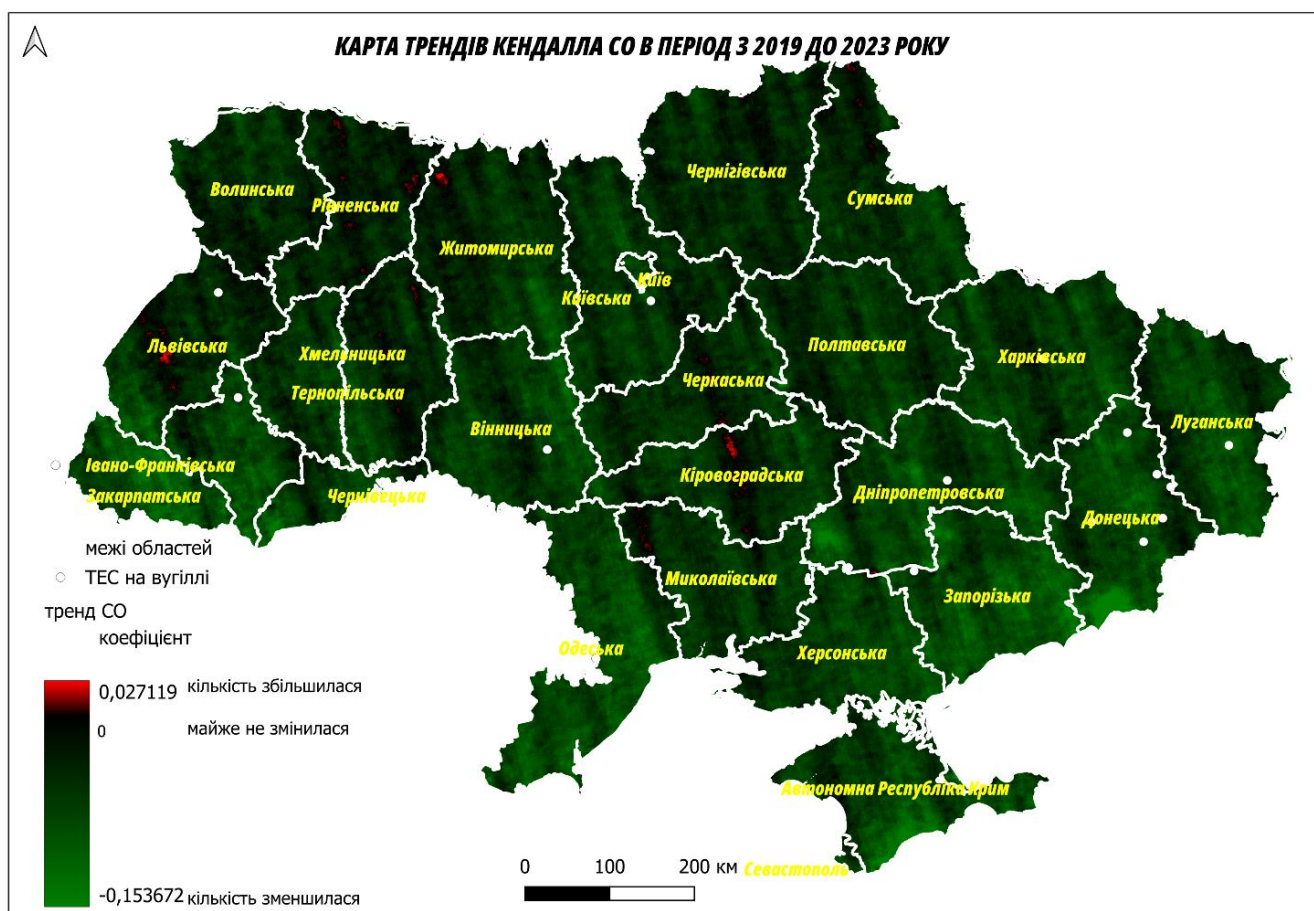
Порівняно карту середніх концентрацій (рис. 3.23) з довоєнним доковідним періодом 2019 роком (рис. 3.24).



*Рис. 3.24 Середні концентрації СО в період 2019-2020 рр*

Помітно, що середні концентрації в країні за 2019 та 2020 роки, були дещо вищими, спостерігався більший контраст між підвищеними та пониженими концентраціями.

Від впливу військових дій відбулися зупинки та руйнування підприємств, які мали найбільші викиди СО в атмосферу, серед них такі промислові гіганти як металургійний комбінат «Азовсталь», Кременчуцький НПЗ, Гостомельський Склозавод та ін. Карта трендів (рис.3.25) підтверджує зменшення концентрацій СО саме на місцях розташування металургійних підприємств: Маріуполь, Кам'янське, Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг, Кременчук, а також Енергодар. В середньому концентрації СО в Україні залишилися на тому ж рівні або мають незначну тенденцію до зниження.



*Рис. 3.25 Тенденції зміни CO в 2019-2023 роках*

Таким чином забруднення України CO залежить від рельєфу, руху атмосферного повітря, концентрацій підприємств та впливу військових дій. Загалом в Україні помітна тенденція до спаду, але вона зумовлена руйнуванням чи зупинкою підприємств-виробників сталі, як основних джерел забруднень атмосфери CO.

### 3.4 Дослідження забруднень сірчистим ангідридом SO<sub>2</sub>

Діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) в атмосфері Землі має природнє, як от вулканічна діяльність, лісові, а також торфові та вугільні пожежі, процеси мікробіологічного окислення сірки, морська сіль та діяльність фітопланктону. Майже 70 % викидів мають антропогенне походження. Основними джерелами викидів є хімічна промисловість при виробництві сірчаної кислоти, переробна промисловість – переробка сульфідних руд та використання вугілля та нафти як палива та для виробництва електричної енергії [89]. Короткочасні викиди цього газу можуть



мати як місцевий вплив, так і впливати на клімат планети, утворюючи парникові гази - сульфатні аерозолі. SO<sub>2</sub> дуже негативно впливає на здоров'я людей, наносячи шкоду дихальній системі, шкідливо впливає на гени [64, 65]. При випаданні кислотних дощів рослини отримують опіки листя, а в тваринному світі, крім впливу на дихальну систему, окислюючи середовище, ця сполука призводить до хвороб та втрати видової різноманітності [86, 87, 88].

Прилад S5P/TROPOMI для визначення кількості діоксиду сірки знімає зразки земної поверхні з часом повторного огляду в один день, з просторовою роздільною здатністю 3,5 x 7 км, це дає змогу розрізнити деталі, виявляючи навіть невеликі шлейфи цього газу (табл. 3.4). Викиди SO<sub>2</sub> мають точковий характер і в атмосфері зберігаються недовго. Достовірну інформацію прилад збирає лише тоді, коли кут зеніту менший ніж 70 градусів, тому за листопад – грудень дані відсутні. Негативні значення вертикального стовпця спостерігаються у чистих регіонах чи за низьких викидів SO<sub>2</sub>. Розробниками рекомендується не фільтрувати ці значення, крім викидів, тобто там де значення вертикальних стовпців має значення нижче ніж -0,001 моль/м<sup>2</sup>.

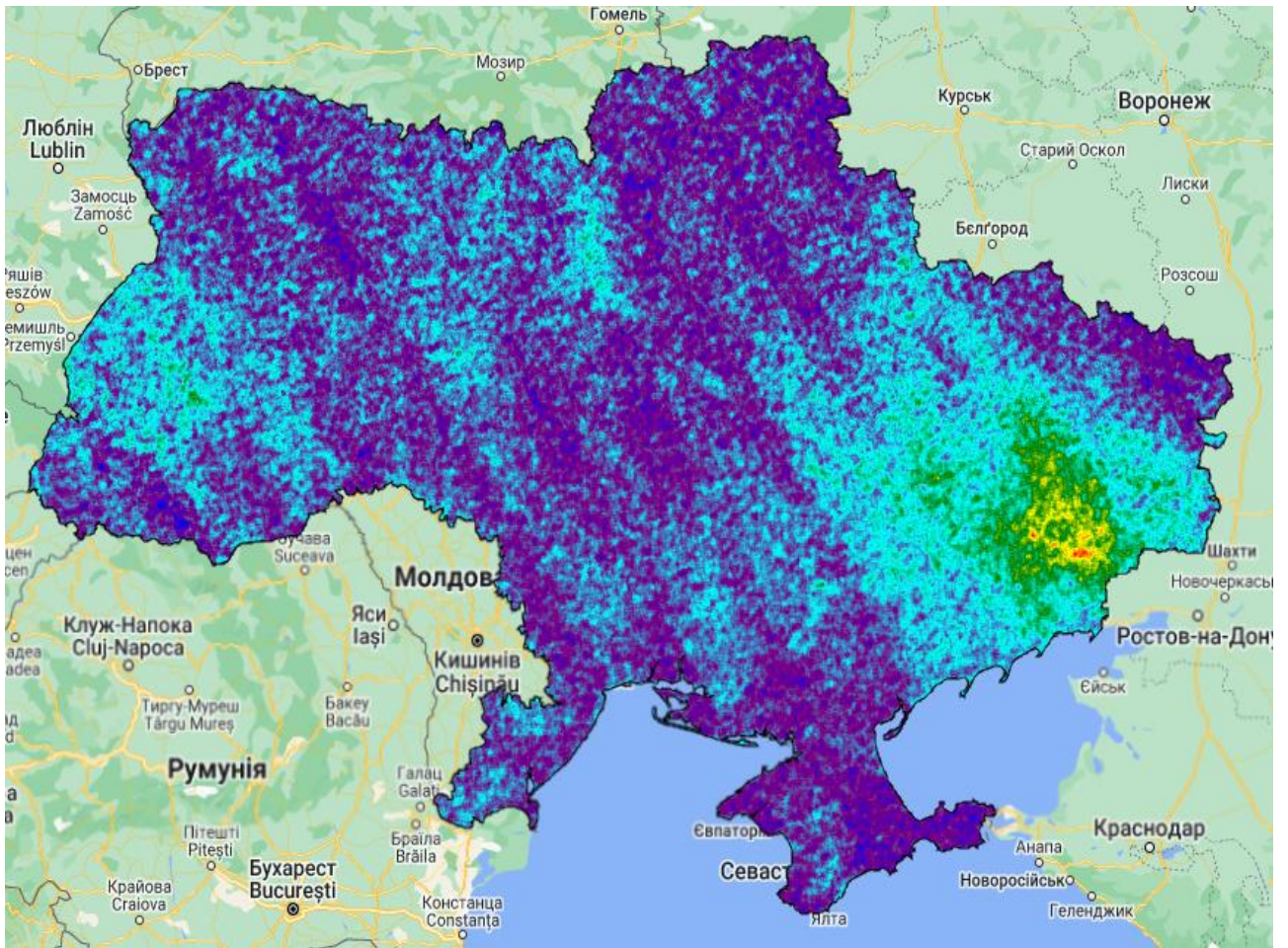
Роздільна здатність набору 1113,2 метри.

Таблиця 3.4 [50]

Характеристики набору даних з приладу TROPOMI для SO<sub>2</sub>

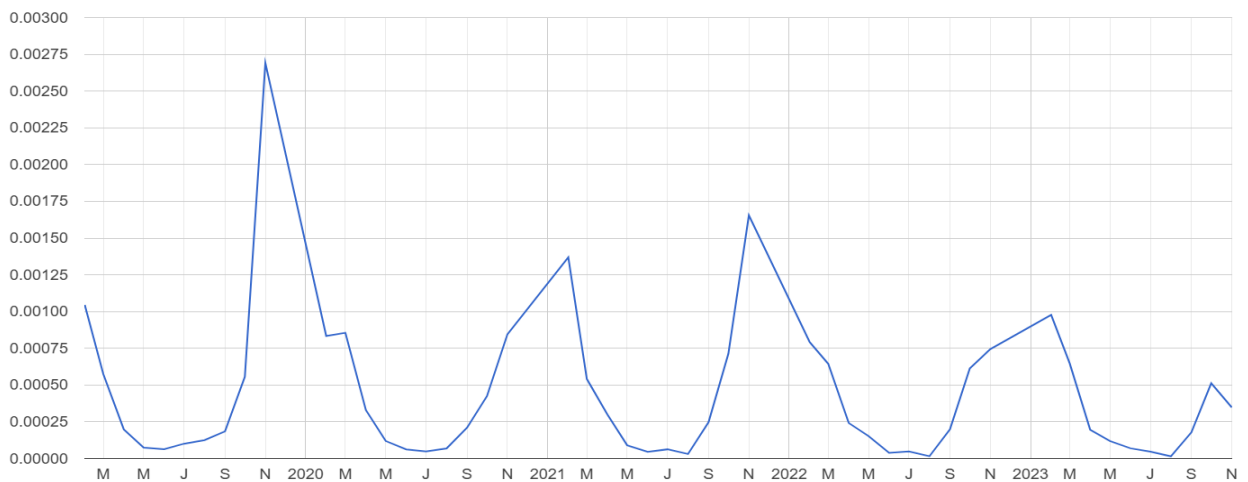
Назва	Опис	Мін*	Макс*	Одиниці
SO <sub>2</sub> _column_number_density	Щільність SO <sub>2</sub> у вертикальному стовпчику на рівні землі, розрахована за методом DOAS.	-48	0,24	моль/м <sup>2</sup>

Досліджено середні щомісячні показники SO<sub>2</sub> в атмосфері України. Використано скрипт з додатку 4, створено графік середньорічних концентрацій. Дані в період з листопад та грудень кожного року відсутні, але було створено об'єднаний графік, щоб він мав візуально привабливий вигляд для сприйняття.



*Рис. 3.26. Карта середніх концентрацій SO<sub>2</sub> в період з 2019 до 2023 року в GEE.*

Отримано такий вигляд розповсюдження SO<sub>2</sub> (рис. 3.26) та побудовано графік зміни концентрацій (рис. 3.27).



*Рис. 3.27 Графік зміни концентрацій SO<sub>2</sub> в період з 2019 до 2023 років.*

Розподіл діоксиду сірки над Україною має свої специфічні особливості, які було враховано під час аналізу. Це вплив сезону, рельєфу, джерел забруднень, вплив ковіду, вплив військових дій.

Сезонні коливання. Згідно графіка бачимо чітко виражені сезонні коливання середнього рівня SO<sub>2</sub> над Україною. В опалювальний сезон з кінця осені та взимку помітні вищі концентрації SO<sub>2</sub> через збільшене використання викопного палива для опалення. Діаграма (рис. 3.28) демонструє піки концентрацій в листопаді. Також накопичення та розсіювання SO<sub>2</sub> в повітрі залежить від погодних умов: температури, вологості, атмосферного тиску тощо. Взаємодіючи з водою, даний газ випадає у вигляді кислотних дощу, закислюючи довкілля.

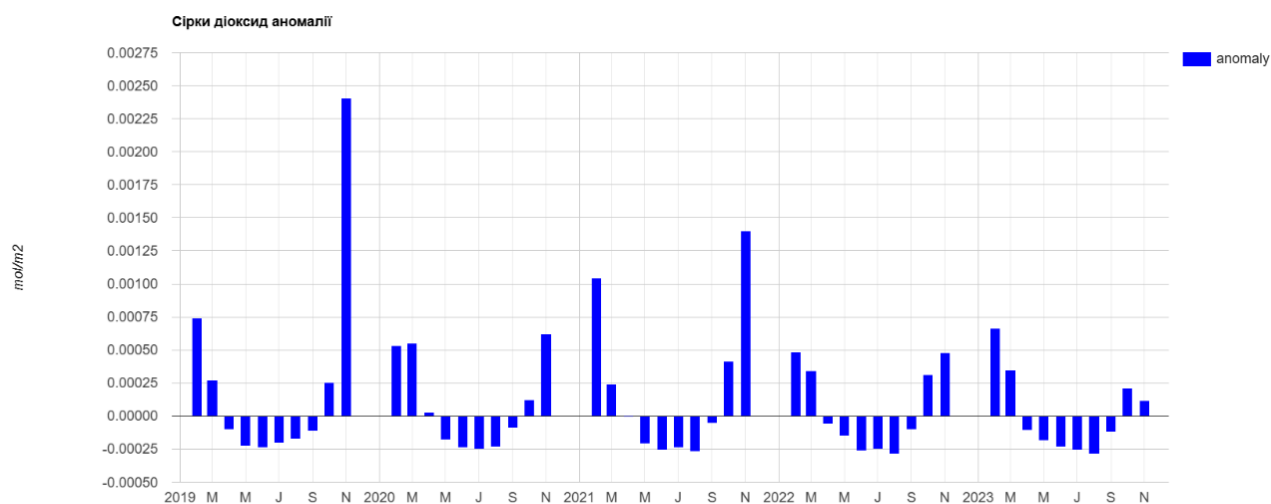


Рис. 3.28. Діаграма аномалій SO<sub>2</sub> в період з 2019 до 2023 років.

Основними джерелами забруднень діоксидом сірки являються промислові підприємства. Велика кількість металургійних, хімічних, і теплових електростанцій є основними джерелами викидів SO<sub>2</sub>. Основні промислові центри, такі як Дніпро, Запоріжжя, Маріуполь та Кривий Ріг, відомі високими концентраціями SO<sub>2</sub>. Використання в якості джерела енергії вугілля електростанціями у регіонах України також додає кількості діоксиду сірки в атмосферне повітря. Підвищені концентрації в місцях розташування ТЕС спостерігаємо у Львівській та Івано-Франківській областях (рис.3.29), а також у Києві. Найбільш забрудненими SO<sub>2</sub> територіями України є Донецька область -

0,000493 моль/м<sup>2</sup>, Дніпропетровська – 0,000539 моль/м<sup>2</sup>, Запорізька – 0,000465 моль/м<sup>2</sup>, області та місто Київ – 0,000395 моль/м<sup>2</sup>.

Внесок транспорту в загальні об'єми кількості SO<sub>2</sub> в атмосфері нижчій, порівняно з промисловістю, проте концентрації можуть підвищуватись на територіях великих міст в періоди інтенсивного автомобільного руху.

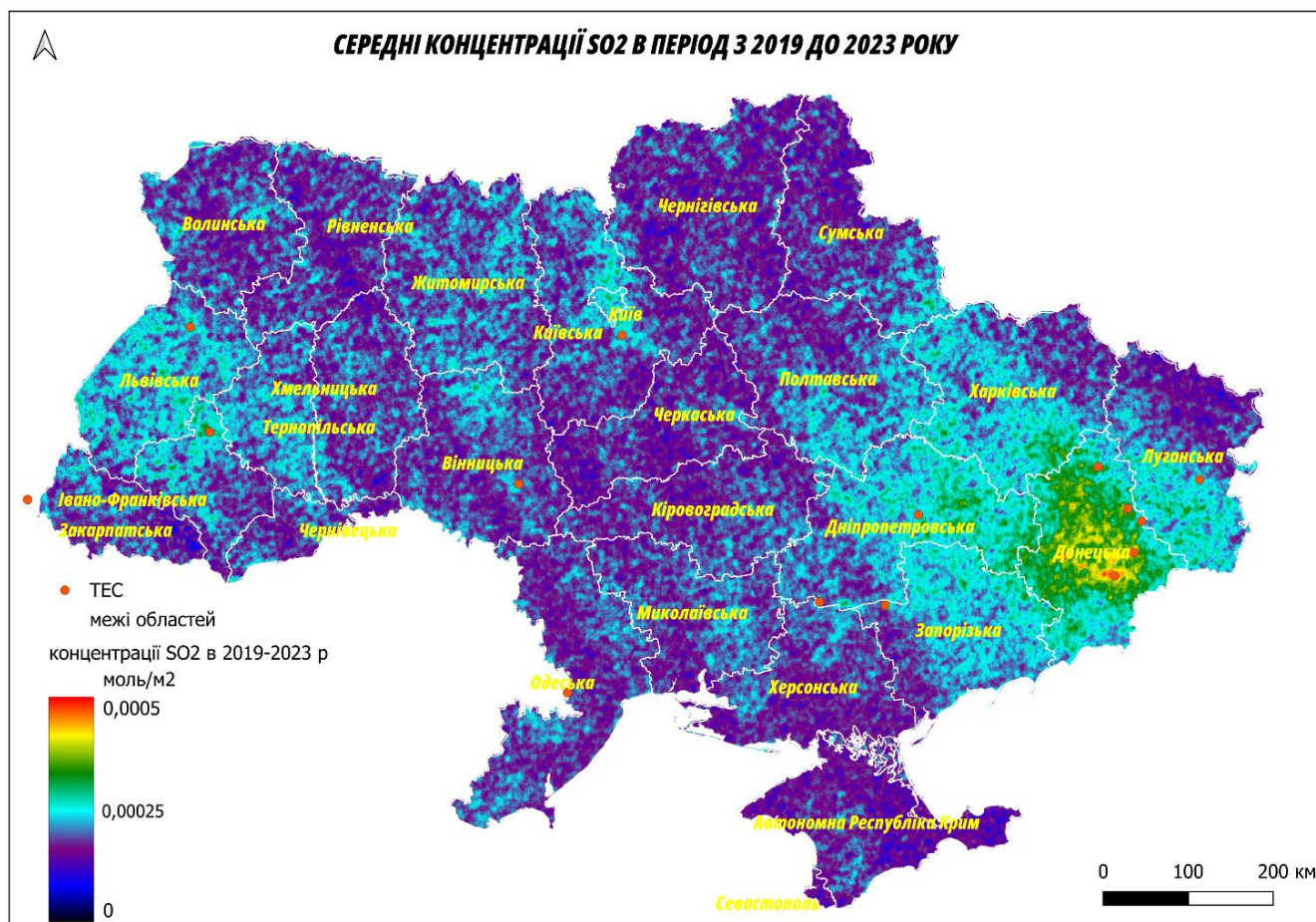


Рис. 3.29. Середні концентрації SO<sub>2</sub> над Україною в 2019-2023 роки

Хоча період існування SO<sub>2</sub> в атмосфері сягає лише 14 днів, і шлейф його розповсюдження від антропогенних викидів не такий значний як від природних джерел, проте рельєф також може впливати на розповсюдження. Гірські райони на заході України впливають на циркуляцію повітря, а отже можуть вплинути на процеси розсіювання SO<sub>2</sub>. В центральній та східній рівнинній частині нашої держави розсіювання досліджуваного газу краще, але воно також залежить від швидкості та напрямку вітрів.

Вплив COVID-19 мав вплив на концентрації SO<sub>2</sub> в повітрі України. Пік його концентрації в кінці 2020 та на початку 2021 році суттєво знизився порівняно з кінцем 2019, і хоча в кінці 2021 року знову спостерігався максимум, проте він був не такий виражений, як в «доковідний» період 2019 року (рис. 3.30). Зменшення кількості викидів транспорту та призупинка діяльності деяких підприємств мала свій вплив на його динаміку.

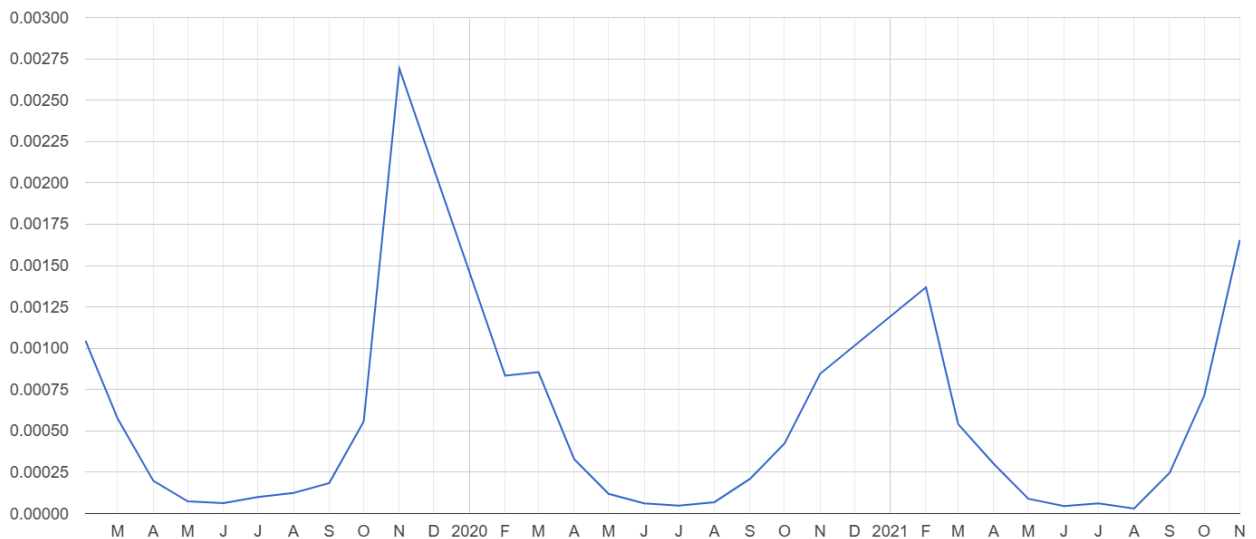


Рис. 3.30. Графік концентрацій SO<sub>2</sub> в період з 2019-2021 року.

Військові дії на території України також знизили концентрації цього газу (рис.3.31).

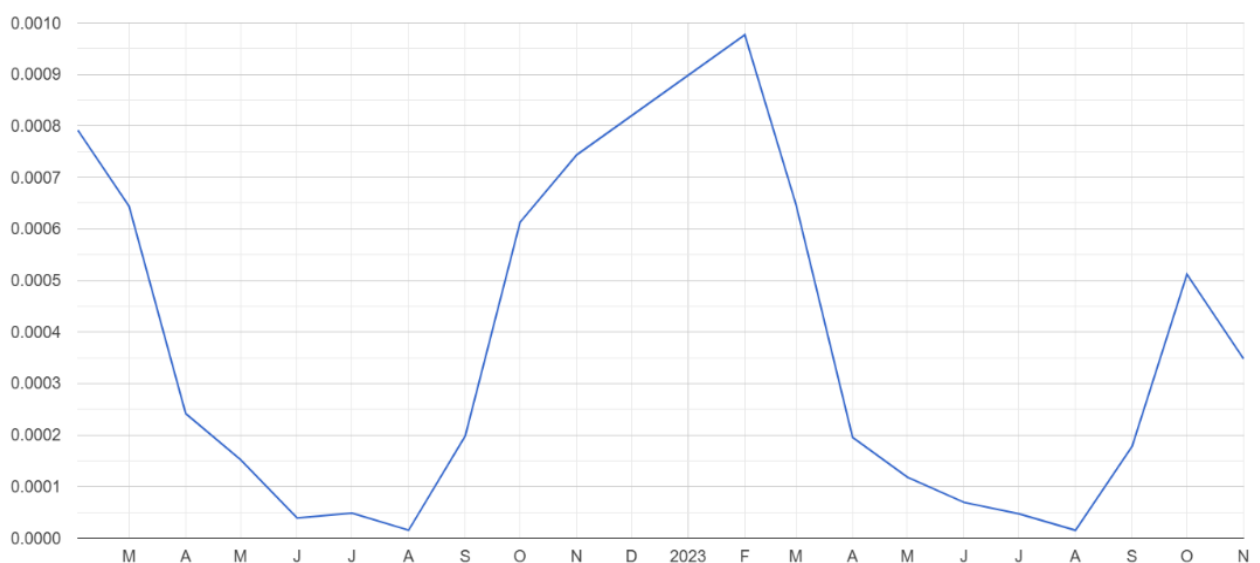
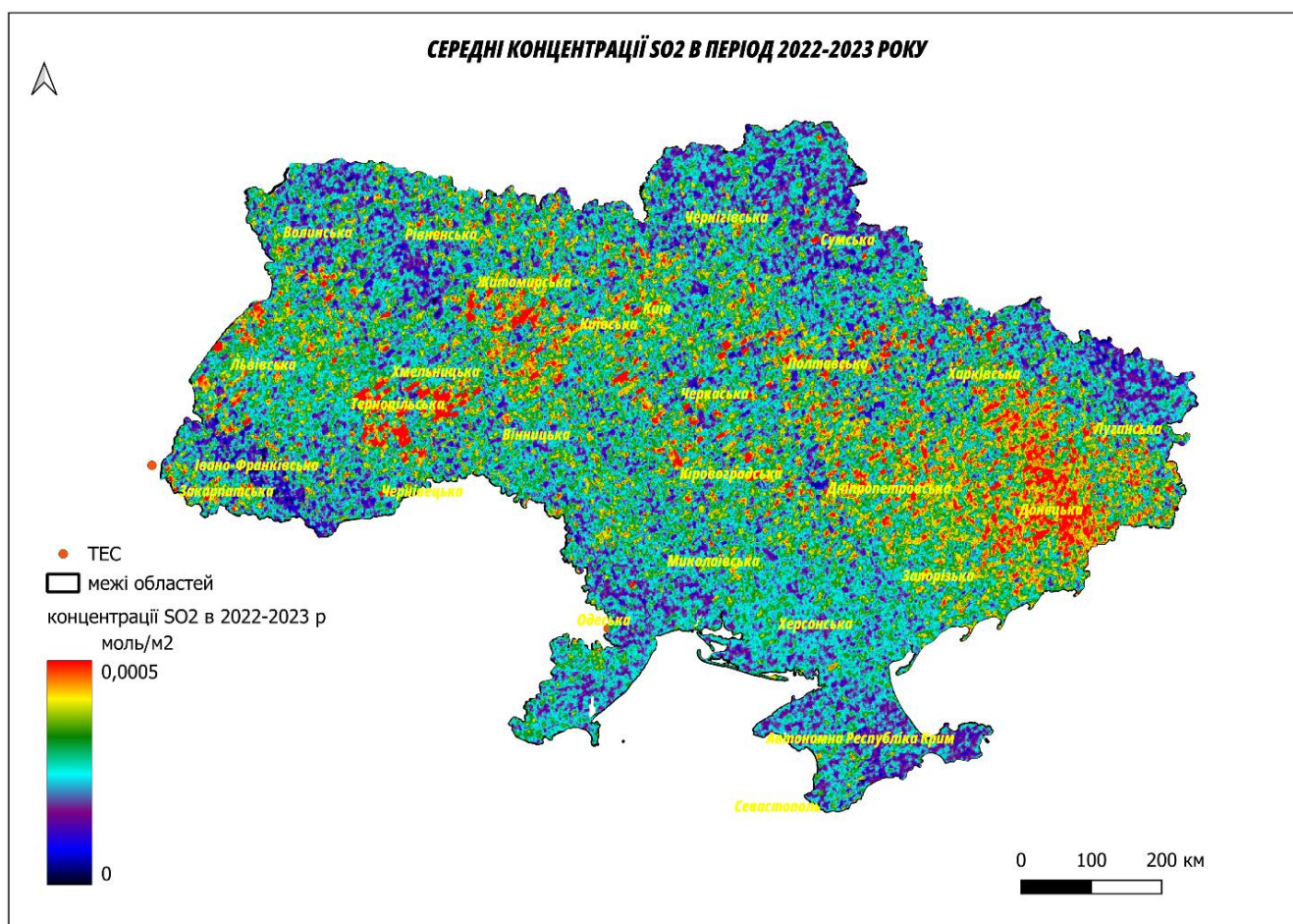


Рис. 3.31 Графік концентрацій SO<sub>2</sub> в 2022-2023 роках

Максимальні середньомісячні його концентрації знизилися до позначок менше ніж 0,0008 моль/м<sup>2</sup> в листопаді 2023 року, що в три рази нижче, ніж в листопаді 2019 року. Руїнування промисловості та підприємств енергетики спричинило загальний спад концентрацій у воєнний період, але на карті з'явилися численні точкові перевищення концентрацій на територіях де відбулися пожежі, вибухи, руїнування підприємств (рис. 3.32). Найбільше перевищень спостерігається в Донецькій, Житомирській, Хмельницькій, Тернопільській областях. Зниження мають місце в Карпатських горах, Криму та південній частині Сумської області. Відмічено, що більшість концентрацій майже не змінилася, або має незначну тенденцію до зниження



*Рис. 3.32 Середні концентрації SO<sub>2</sub> в період з 2022 до 2023 року.*

Досліджено карту трендів, помічено, що на фоні зниження загальнодержавних тенденцій, тенденції до підвищень мають центральні та

західні регіони України, в той час як східна частина – незначну тенденцію до знижень. (рис. 3.33).

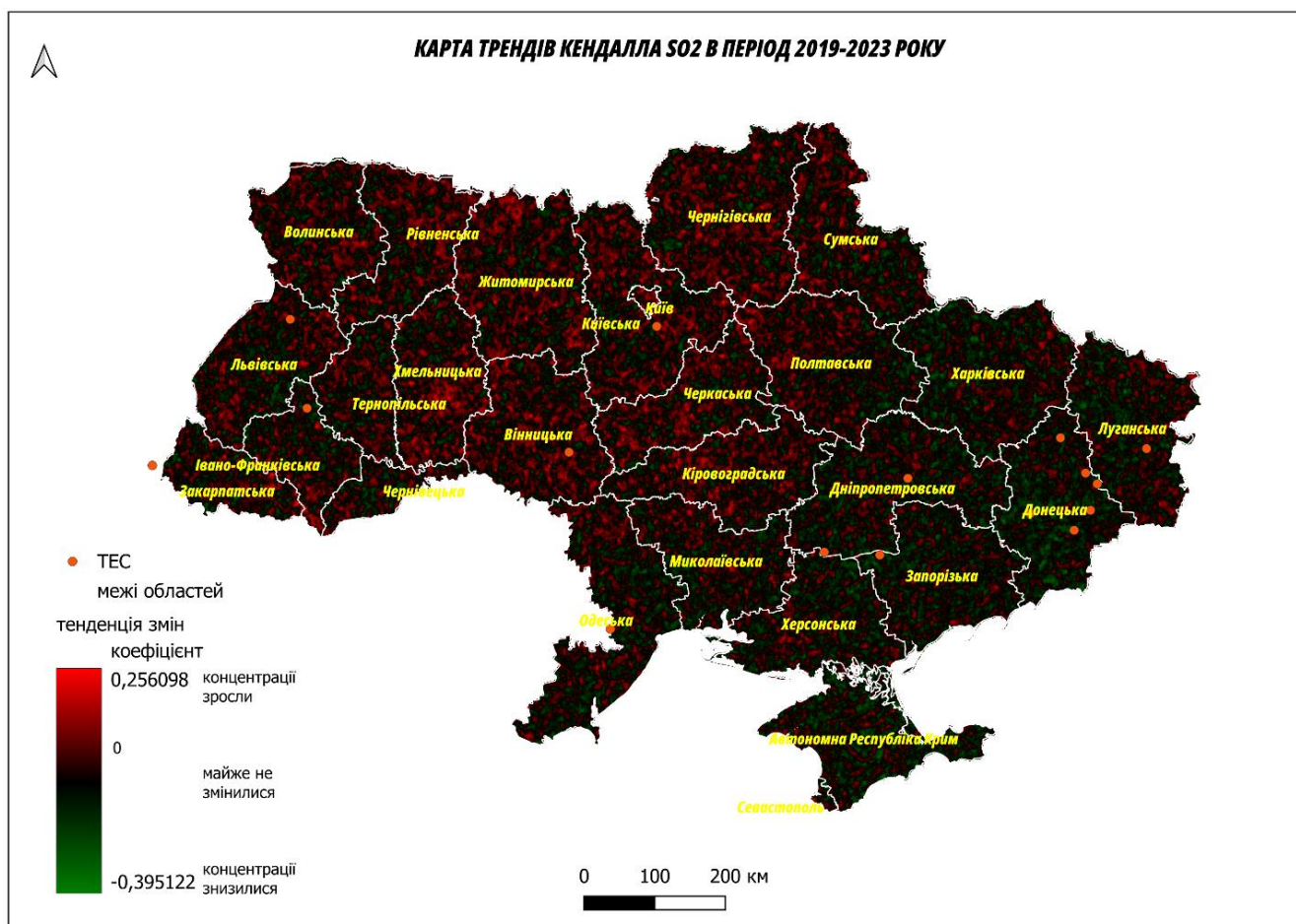


Рис. 3.33 Карта трендів Кендалла SO<sub>2</sub> в період 2019 до 2023 року.

Отже, аналіз концентрацій SO<sub>2</sub> над Україною - важлива складова моніторингу довкілля. Для цього газу доцільно буде використовувати комбінацію супутникових даних та даних з наземних станцій, адже викиди мають локальний характер, також необхідно враховувати дуже відчутний вплив військових дій на динаміку забруднення.

### Висновок до розділу 3.

Дані з супутника Sentinel-5P (TROPOMI) - це можливість моніторити концентрації CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> в режимі реального часу, а CH<sub>4</sub> в режимі офлайн та аналізувати тенденції за кілька років за допомогою платформи GEE.

Високі концентрації CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub> можуть викликати респіраторні проблеми, подразнення слизових оболонок та інші захворювання органів

дихання. Діоксид сірки, утворює при взаємодії з вологою атмосфери кислотні дощі, які можуть пошкоджувати рослинність, ґрунти та водойми.

Аналіз концентрацій  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  та  $\text{SO}_2$  над Україною показав, що кожен із цих забруднювачів має свої специфічні особливості, які зумовлені джерелами забруднення, а також природними та економічними факторами. Під час цього аналізу ми врахували такі основні аспекти:

1. Джерела забруднення. Наявність промислових підприємств: Велика кількість металургійних, хімічних, і теплових електростанцій а також підприємства переробки нафти є основними джерелами викидів  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$ . На рівень метану впливає наявність сільськогосподарських підприємств, особливо тваринництво. Основні промислові центри, такі як Київ, Дніпро, Запоріжжя, Маріуполь та Кривий Ріг, Кременчук, мали найвищі концентрації  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  та  $\text{SO}_2$ , та  $\text{CH}_4$ . Вугільні електростанції у регіонах розташування України також є джерелами викиду діоксиду сірки,  $\text{CO}$  та  $\text{NO}_2$ . Транспорт в загальних викидах  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  та  $\text{CO}$  менший порівняно з промисловістю, проте у великих містах, на трасах, в періоди інтенсивного руху концентрації цих речовин підвищуються.

2. Сезонні коливання. В Україні мають місце сезонні зміни концентрації забруднювачів атмосфери: взимку, в опалювальний сезон концентрації  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  часто вищі через збільшене використання викопного палива для опалення. Концентрації ж метану не відчутно залежать від сезону. Погодні умови (температура, вологість та атмосферний тиск) також впливають на розсіювання чи накопичення цих речовин в атмосфері.

3. Рельєф. Височини, низини впливають на розповсюдження та накопичення  $\text{CO}$  в повітрі, на височинах він розсіюється, а в низинах накопичується, Карпатські та Кримські гори можуть впливати на циркуляцію повітря і процеси розсіювання  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ . На процеси розсіювання цих забруднювачів також може впливати швидкість та напрямок вітру.

4. Прийняття екологічних законів, та модернізація підприємств, встановлення систем фільтрації, закриття підприємств під час карантинних



заходів можуть впливати на рівні забруднення і можуть їх зменшити. Проте в Україні особливий вплив на зниження або підвищення концентрацій мають ще й воєнні дії. Зниження концентрацій SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> відбувається через руйнування промислових, енергетичних об'єктів або їх закриття, зміни в споживанні енергії, в той час як пожежі на промислових, нафтових, об'єктах спричиняють локальне їх підвищення.



#### 4.1 Аналіз отриманих результатів. Порівняння концентрацій з нормами ГДК України.

Після аналізу стану атмосферного повітря України за допомогою супутникового моніторингу було здійснено порівняння показників супутникових даних із показниками ГДК України.

Для цього необхідно здійснити перерахунок гранично допустимих концентрацій (ГДК) для досліджуваних забруднюючих речовин CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> з одиниць масової концентрації (мкг/м<sup>3</sup> або мг/м<sup>3</sup>) у одиниці колонкової концентрації (моль/м<sup>2</sup>). Він нам необхідний, оскільки ГДК визначається у вигляді концентрацій в мг/м<sup>3</sup> або мкг/м<sup>3</sup>, тоді як супутникові дані надаються у вигляді колонкової кількості молекул моль/м<sup>2</sup> [12].

Спочатку перетворено масову концентрацію у молярну концентрацію. Було використано формулу для переведення масової концентрації у моль/м<sup>3</sup>, а тоді перетворено молярну концентрацію у колонкову кількість. Висота атмосфери, де розподіляється основна частина забруднювачів, була взята приблизно рівною 8-10 км (8000-10000 м), а для NO<sub>2</sub>, який концентрується лише в приземному шарі атмосфери – 1000-2000 м прийнята норма для помірнього забруднення вважається 1,000-5,000 моль/м<sup>2</sup> (додаток 6).

Ми отримали такі показники:

- ГДК SO<sub>2</sub> для України (0.05 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить приблизно 0,00624 моль/м<sup>2</sup>;

- ГДК NO<sub>2</sub> прийнята густина в одиницях моль/м<sup>2</sup> для регіонів з помірним забрудненням становить 1–5 моль/м<sup>2</sup> (для висоти 1 км);

- ГДК для CO в Україні (3.0 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить 0,8568 моль/м<sup>2</sup>;

- ор.б.р.в. для метану (CH<sub>4</sub>) в Україні (50 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить приблизно 24.94 моль/м<sup>2</sup> при середньому атмосферному тиску та висоті атмосфери 8 км, концентрація ж із супутникових знімків надається в частках сухого повітря, після розрахунку отримали результат 41.28 моль/м<sup>2</sup>, ці

результати не можна вважати достовірними, адже перерахована норма виявилася нижчою за найменший показник пропонований з супутника даних про метан.

Таблиця 4.1

Перераховані норми ГДК із одиниць об'єму в колонкову кількість

Газ	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	ГДК у колонковій кількості, моль/м <sup>2</sup>	Примітка
SO <sub>2</sub>	0.05	0,00624	при середньому атмосферному тиску та висоті атмосфери 8 км
CO	3.0	0,8568	
CH <sub>4</sub>	50,0	24,94	
NO <sub>2</sub>	0,04	1–5	прийнята норма помірного забруднення для висоти 1 км

Цей перерахунок було здійснено в сторонніх програмах, а оскільки питання перетворень все ще є предметом дискусій науковців, і наші результати не було порівняно та верифіковано з показниками наземних станцій, ми можемо лише припустити, що вони правильні, і дане порівняння запропоноване як приклад порівняння концентрацій, якщо гранично допустимі концентрації будуть надані нормативними актами в одиницях колонкової кількості. Порівняємо ці показники з даними графіків концентрацій (рис.4.1, рис.4.2, рис.4.3 та рис.4.4)

0,00624 моль/м<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ ГДК



Рис. 4.1 Середньомісячні концентрації SO<sub>2</sub> с період 2019-2023 років

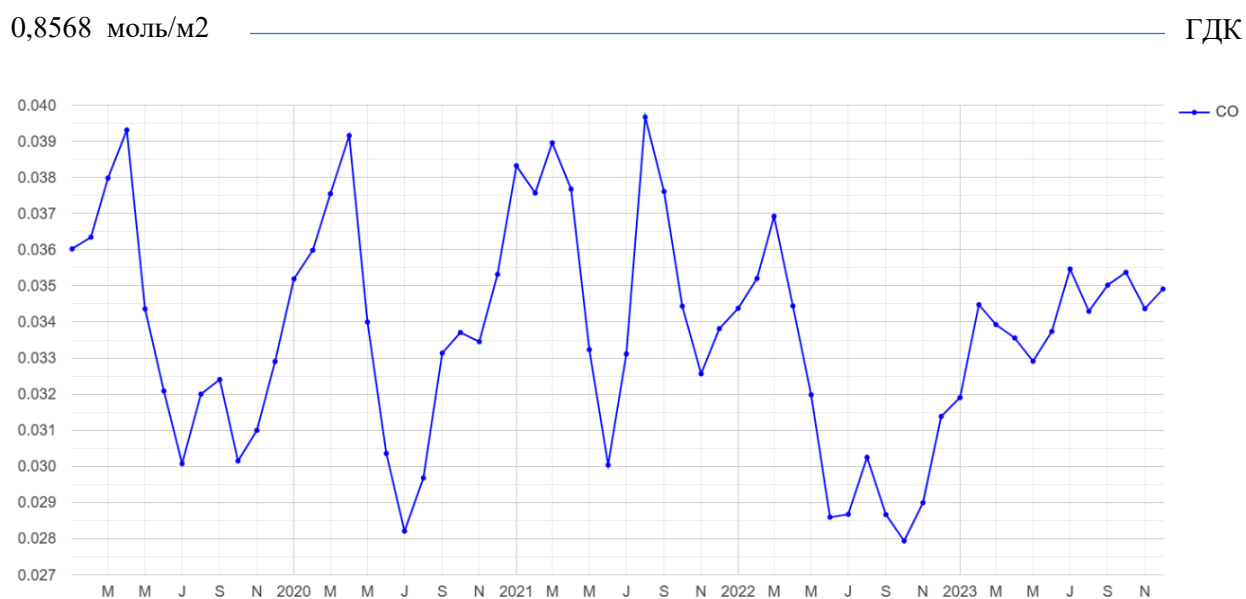


24,94 моль/м<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ Орієнтовно безпечний рівень впливу

*Рис. 4.2 Середньомісячні концентрації CH<sub>4</sub> з період 2019-2023 років*



*Рис. 4.3 Середньомісячні концентрації NO<sub>2</sub> з період 2019-2023 років*



*Рис. 4.4 Середньомісячні концентрації CO з період 2019-2023 років*

Очікувано, жоден із газів не перевищив ГДК, оскільки було пораховано середньомісячні кількості на території всієї країни. Але платформа GEE надає можливість поррахувати концентрації і на значно менших територіях, наприклад, якщо відбулися якісь надзвичайні ситуації і необхідно поррахувати перевищення певних речовин. Звичайно з умовою, що на той момент умови були сприятливі і супутником було зафіксоване це перебільшення.

Дане порівняння підтверджує важливість подальших досліджень в цьому напрямку та верифікації супутникових досліджень з наземними засобами вимірювання, необхідність як супутникових так і наземних досліджень.

#### **4.2. Оцінка можливості використання дистанційного моніторингу в державних програмах охорони довкілля.**

Аналіз змін навколишнього середовища за допомогою Google Earth Engine (GEE), як приклад наш аналіз забруднення, може зайняти важливе місце у реалізації Україною Європейської програми «Чисте повітря для Європи» (Clean Air for Europe, CAPE). Вона передбачає поступове зниження рівня забруднення повітря з метою захисту як здоров'я людей так і довкілля. Можемо виділити такі основні пункти використання GEE в реалізації пунктів програми:

1. Можливість моніторингу певних видів забруднювачів повітря в реальному часі за допомогою супутникових даних:

- моніторинг та відслідковування змін таких основних забруднювачів: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, CH<sub>4</sub>, озону (O<sub>3</sub>);

- виявлення регіонів, що мають найвищий рівень забруднення для виставлення першочергових завдань для його зниження, особливо районів, де станцій наземного моніторингу немає або неможливо дістатися туди з певних причин;

- можливість оперативного реагування на перевищені концентрації забруднювачів у містах, промислових зонах;

- за допомогою GEE можна отримати дані про забруднення в глобальному масштабі, повідомити про ризики в певних регіонах забруднення, визначити де необхідно зробити перевірку ще й наземними засобами або повідомити населення про небезпеку;

2. Оцінка вже впроваджених заходів щодо їх ефективності для покращення якості повітря:

- здійснення просторово-часового аналізу забруднення: створення в GEE часових рядів концентрацій забруднювачів (2019–2023 роки або й за більш тривалий період);

- візуалізація: тематичні карти, графіки, діаграми та ін.;

аналіз сезонних та річних змін концентрацій забруднювачів, для оптимального підбору заходів;

оцінка на поширення забрудників впливу кліматичних умов: температури, вітру, тиску;

визначення дуже забруднених регіонів із стабільно високими концентраціями забруднювачів.

3. Можливість інтеграції даних супутників та наземних станцій. GEE дозволяє поєднувати інформацію наземних станцій моніторингу (наприклад, дані Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, обласних управлінь екології тощо) та супутникові дані. Таке поєднання може покращити точність оцінок шляхом калібрування супутникових даних:

- можливість створення деталізованих карт якості повітря з визначенням зон впливу локальних джерел забруднення, таких як заводів, транспортних вузлів, ТЕС, місць видобутку корисних копалин, сміттєзвалищ та ін.;

- GEE дозволяє розробити моделі прогнозування шляхом інтеграції з платформами штучного інтелекту - можливість прогнозування забруднення у містах залежно від інтенсивності руху транспорту, наявності промислових об'єктів, зміні погодних умов та ін. Даний аналіз можна буде використати для підтримки та ухвалення рішень, щоб запобігти кризовим ситуаціям, як от зниження викидів під час погодних інверсій.

4. Оцінка впливу на здоров'я та екологію. За допомогою GEE здійснюється просторовий аналіз таких даних: густота населення, розташування шкіл, лікарень, природних об'єктів, оцінюється вплив забруднення на здоров'я населення (за моделями, розробленими ВООЗ), аналізуються ризики екосистем (вплив кислотних дощів, аналіз деградації ґрунтів та пошкодження рослинності). На основі аналізу можна спланувати заходи для захисту вразливих груп населення.

5. Автоматизована генерація звітів GEE із високою деталізацією даних може бути у нагоді при складанні звітів у рамках Паризької угоди і програми «Чисте повітря для Європи», адже результати швидко адаптуються GEE відповідно до вимог цих міжнародних організацій. Також можна порівняти отримані звіти з результатами інших країн-учасників.

6. В пункті підтримки локальних екологічних ініціатив дану платформу доцільно використати для надання даних місцевим жителям, це підвищить прозорість екологічної інформації та підтримає місцеві ініціативи громадян у програмах щодо покращення якості повітря.

7. Під час оцінки економічної ефективності заходів GEE знадобиться для визначення найбільш ефективних стратегій боротьби з забрудненням, а гарний аналіз та візуалізація буде в нагоді для залучення до екологічних ініціатив інвесторів та позичальників.

Висновок до розділу 4.

Таким чином, використання GEE в аналізі забруднення повітря дозволить Україні здійснювати більш правильні, оперативні заходи в рамках програми «Чисте повітря для Європи». Вона може стати основою для дослідження, прогнозування, створення звітності та прийняття правильних рішень, які направлені на покращення якості повітря, зниження захворюваності населення та виконання міжнародних зобов'язань.





В даному проєкті проаналізовано законодавчу базу моніторингу навколишнього середовища в Україні. Визначено, якими нормативними актами необхідно керуватися при виконанні моніторингу навколишнього середовища, які екологічні програми реалізуються в Україні для збереження та покращення його стану.

Нами було вивчено як в сучасному світі відбувається супутниковий моніторинг та які завдання поставлені перед ним, що в сучасному моніторингу стану навколишнього середовища одне з найважливіших місць займає саме супутниковий моніторинг та реалізуються світові програми, одна із наймасштабніших із яких – Copernicus. Важлива частина цієї місії – це супутниковий моніторинг стану атмосфери, аналіз кількості основних забруднювачів.

Було проаналізовано досвід вчених для аналізу стану довкілля, а саме їхній досвід використання платформи Google Earth Engine для аналізу великих об'ємів інформації. Зроблено висновок, що GEE широко використовується в дослідженнях що стосуються аналізу та прогнозування кліматичних змін, концентрацій основних забрудників повітря, наявності чи відсутності рослинного покриву, аналізу стану водойм, розвитку забудованих територій, виявлення вулканічної діяльності, моніторингу наслідків стихійних лих та ін.

На основі досвіду вчених нами було проведено дослідження стану атмосферного повітря над територією України з використанням програми GEE. І в короткий час без застосування спеціальних програм та обладнання, а лише з доступом до комп'ютера та до інтернету, безкоштовно проаналізовано основні забруднювачі атмосфери України CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>. Наявність на ресурсі навчальних відео та прикладів скриптів спрощувало користування цим ресурсом.

Було розроблено алгоритм, за яким досліджено концентрацію кожного газу, скрипти додані до даної роботи. Їх можна застосувати для перевірки концентрації над іншою необхідною територією наприклад містом, чи районом, обирати дати обстеження, додавати іншу додаткову інформацію для більш детального аналізу, необхідно лише видозмінити скрипт.

В редакторі GEE було створено карти та графіки, які в подальшому завантажено на власний комп'ютер для обробки в програмі QGIS для зручності при створенні тематичних карт. Хоча сама платформа теж надає можливість за допомогою скриптів додавати умовні позначення на карту в самому редакторі.

Було створено тематичні карти концентрацій газів в досліджувані періоди та проаналізовано, що кожен із цих забруднювачів має свої специфічні особливості, які зумовлені джерелами забруднення, а також природними та економічними факторами, карантином та військовими діями. Вивчено вплив забруднювачів на довкілля та здоров'я населення. Виявлено, що найбільш забруднені промислові центри - це Київ, Дніпро, Запоріжжя, Маріуполь, Донецьк, Кривий Ріг, Кременчук.

Визначено, що порівняння отриманих концентрацій за допомогою GEE з нормами ГДК та порогоми ВООЗ має неузгоджені моменти щодо одиниць вимірювань, адже використання супутниками оптичного обладнання дозволяє вимірювати концентрації забруднювачів у вигляді колонкової кількості молекул (моль/м<sup>2</sup>), а ГДК (гранично допустимі концентрації) зазвичай визначається у вигляді концентрації (мг/м<sup>3</sup> або мкг/м<sup>3</sup>) і порівняння може бути лише приблизним. Проведені нами розрахунки ГДК в одиниці колонкової кількості не можна вважати достовірними, для перерахунку необхідно було враховувати висоту, атмосферний тиск, температуру повітря на момент обстеження. Тому порівняння з нормами ГДК для великої території і в такий великий часовий період є недоцільним. Перерахунок можливий для невеликої території, в короткий часовий проміжок, врахувавши всі необхідні умови. Доцільно було б розробити норми і в оптичних одиницях вимірювань.

Наші дослідження за допомогою GEE можна використати для реалізації державних та міжнародних програм із захисту довкілля для моніторингу, аналізу, прогнозування, візуалізації супутникових даних, поєднуючи їх із іншими даними для досліджень.

## ДОДАТКИ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Виконав		Лініченко Т.М.			Дослідження стану навколишнього середовища з використанням Google Earth Engine	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Плющ Т.М.					84	14
Консультант								84
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				КНУБА, група зГСТм-23		

## ДОДАТОК 1. Дослідження метану в GEE

```
var roi=table.filterBounds(geometry);
Map.centerObject(roi)
Map.addLayer(roi)

var time_start="2019", time_end="2024"

var
sen5=imageCollection.select(["CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air"],["meth
ane"])
.filterDate(time_start, time_end)
.filterBounds(roi)
var
                                                    year_list=
ee.List.sequence(ee.Number.parse(time_start),ee.Number.parse(time_end).subtract(1
))
var month_list=ee.List.sequence(1,12)

var methane_monthly=ee.ImageCollection(year_list.map(function(year){
return month_list.map(function(month){
var monthly=sen5
.filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,"year"))
.filter(ee.Filter.calendarRange(month,month,"month")).mean()
var date=ee.Date.fromYMD(year,month,1)
return monthly
.set("system:time_start",date.millis())
.set("system:index", date.format("YYYY-MM-dd"))
})
}).flatten())

print(ui.Chart.image.series(methane_monthly, roi, ee.Reducer.mean(), 7000,
"system:time_start")

.setOptions({
title:"Середньомісячні концентрації CH4",
vAxis: {title: "Mol fraction"},
xAxis: {title: "date"},
series: {0:{color:"blue"}},
pointSize:4
}))

var ave= methane_monthly.mean();
var band_viz = {
min: 1750,
max: 1900,
palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
Map.addLayer(ave.clip(roi), band_viz, "methane_ave", false)
```

```

var anomaly=methane_monthly.map(function(img){
  var index=img.subtract(ave).rename("anomaly")
  return index
  .copyProperties(img, img.propertyNames())
});
print(
ui.Chart.image.series(anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 7000, "system:time_start")
.setChartType("ColumnChart"))

var pos_anomaly=anomaly.map(function(img){
  var ave_anom=ee.Number(img.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 7000
  }).values().get(0))
  return img
  .copyProperties(img, img.propertyNames())
  .set("methane_value", ave_anom)
  })
  .filter(ee.Filter.gt("methane_value",0));
print(pos_anomaly)
print(
ui.Chart.image.series(pos_anomaly,      roi,      ee.Reducer.mean(),      7000,
"system:time_start")
.setChartType("ColumnChart"))

Map.addLayer(pos_anomaly.mean().clip(roi), [], "pos_anomaly", false);

Export.image.toDrive({
image: pos_anomaly.mean().clip(roi),
description: "CH4-23",
region: roi,
scale: 1000,

  folder: "test",
  crs: "EPSG:4326"
  })

  var trend=methane_monthly.reduce(ee.Reducer.kendallsCorrelation());
  Map.addLayer(trend.select("methane_tau").clip(roi),
{palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']}, "ch4_trend", false);

var tpp = ee.FeatureCollection("WRI/GPPD/power_plants")
.filter(ee.Filter.eq('fuel1', 'Coal'))
Map.addLayer(tpp,[], 'Coal');

```

## ДОДАТОК 2. Дослідження діоксиду азоту в GEE

```
var roi=table.filterBounds(geometry);
Map.centerObject(roi)
Map.addLayer(roi)

var time_start="2019", time_end="2024"

var
sen5=imageCollection.select(["tropospheric_NO2_column_number_density"],["NO2"])
.filterDate(time_start, time_end)
.filterBounds(roi)
var
year_list=
ee.List.sequence(ee.Number.parse(time_start),ee.Number.parse(time_end).subtract(1))
var month_list=ee.List.sequence(1,12)

var NO2_monthly=ee.ImageCollection(year_list.map(function(year){
return month_list.map(function(month){
var monthly=sen5
.filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,"year"))
.filter(ee.Filter.calendarRange(month,month,"month")).mean()
var date=ee.Date.fromYMD(year,month,1)
return monthly
.set("system:time_start",date.millis())
.set("system:index", date.format("YYYY-MM-dd"))
})
}).flatten())

print(ui.Chart.image.series(NO2_monthly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000,
"system:time_start")

.setOptions({
title:"Діоксид азоту",
vAxis: {title: "mol/m2" },
xAxis: {title: "дата"},
series: {0:{color:"blue"}},
pointSize:4
}))

var ave= NO2_monthly.mean();
var band_viz = {
min: 0,
max: 0.0002,
palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};

Map.addLayer(ave.clip(roi), band_viz, "NO2_ave", false)
var anomaly=NO2_monthly.map(function(img){
```

```

var index=img.subtract(ave).rename("anomaly")
return index
.copyProperties(img, img.propertyNames())
});
print(
ui.Chart.image.series(anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")

```

## Продовження додатку 2

```

.setChartType("ColumnChart"))
var pos_anomaly=anomaly.map(function(img){
  var ave_anom=ee.Number(img.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
  }).values().get(0))
  return img
  .copyProperties(img, img.propertyNames())
  .set("NO2_value", ave_anom)
})
.filter(ee.Filter.gt("NO2_value",0));
print(pos_anomaly)
print(
ui.Chart.image.series(pos_anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")
.setChartType("ColumnChart"))
  var trend=NO2_monthly.reduce(ee.Reducer.kendallsCorrelation());
  Map.addLayer(trend.select("NO2_tau").clip(roi),
{palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']}, "NO2_trend", false);
Export.image.toDrive({
image: trend.select("NO2_tau").clip(roi),
description: "NO2TREND1923",
region: roi,
scale: 1000,
folder: "test",
crs: "EPSG:4326"
})
var tpp = ee.FeatureCollection("WRI/GPPD
/power_plants")
.filter(ee.Filter.eq('fuel1','Coal'))
Map.addLayer(tpp,[],'Coal');
Export.table.toDrive({
collection: tpp,
description: "Coal_Power_Plants",
fileFormat: "GeoJSON"
});

```



### ДОДАТОК 3. Дослідження монооксиду вуглецю в GEE

```
var imageCollection = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO"),
    table = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level0"),
    geometry =
    /* color: #00ff00 */
    /* shown: false */
    ee.Geometry.Point([32.15537028610428, 50.294829858978495]);
var roi=table.filterBounds(geometry);
Map.centerObject(roi)
Map.addLayer(roi)
var time_start="2019", time_end="2024"
var sen5=imageCollection.select(["CO_column_number_density"],["CO"])
    .filterDate(time_start, time_end)
    .filterBounds(roi)
var year_list=
ee.List.sequence(ee.Number.parse(time_start),ee.Number.parse(time_end).subtract(1))
var month_list=ee.List.sequence(1,12)

var CO_monthly=ee.ImageCollection(year_list.map(function(year){
    return month_list.map(function(month){
        var monthly=sen5
        .filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,"year"))
        .filter(ee.Filter.calendarRange(month,month,"month")).mean()
        var date=ee.Date.fromYMD(year,month,1)
        return monthly
        .set("system:time_start",date.millis())
        .set("system:index", date.format("YYYY-MM-dd"))
    })
}).flatten())

    print(ui.Chart.image.series(CO_monthly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000,
"system:time_start")
)
var ave= CO_monthly.mean();
var band_viz = {
    min: 0,
    max: 0.05,
    palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};

Map.addLayer(ave.clip(roi), band_viz, "CO_ave", false)

var anomaly=CO_monthly.map(function(img){
    var index=img.subtract(ave).rename("anomaly")
    return index
    .copyProperties(img, img.propertyNames())
});
```

```

print(
ui.Chart.image.series(anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")
.setChartType("ColumnChart"))

var pos_anomaly=anomaly.map(function(img){
  var ave_anom=ee.Number(img.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
  })).values().get(0)
  return img
  .copyProperties(img, img.propertyNames())
  .set("CO_value", ave_anom)
  })
.filter(ee.Filter.gt("CO_value",0));
print(pos_anomaly)

print(
ui.Chart.image.series(pos_anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")
.setChartType("ColumnChart"));
  var trend=CO_monthly.reduce(ee.Reducer.kendallsCorrelation());
  Map.addLayer(trend.select("CO_tau").clip(roi),
{palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']}, "CO_trend", false);

Export.image.toDrive({
  image: trend.select("CO_tau").clip(roi),
  description: "CO_trend",
  region: roi,
  scale: 1000,
  folder: "test",
  crs: "EPSG:4326"
  });
var tpp = ee.FeatureCollection("WRI/GPPD
/power_plants")
.filter(ee.Filter.eq('fuel1','Coal'))
Map.addLayer(tpp,[],'Coal');

Export.table.toDrive({
  collection: tpp,
  description: "Coal_Power_Plants",
  fileFormat: "GeoJSON"
  });

```

#### ДОДАТОК 4. Дослідження SO<sub>2</sub> в GEE

```
var imageCollection = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2"),
    table = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level0"),
    geometry =
    /* color: #d63000 */
    /* shown: false */
    ee.Geometry.Point([30.58448572600386, 50.415633533699754]);
var roi=table.filterBounds(geometry);
Map.centerObject(roi);
Map.addLayer(roi);
var time_start="2019", time_end="2024";
var sen5=imageCollection.select(["SO2_column_number_density"],["SO2"])
.filterDate(time_start, time_end)
.filterBounds(roi);
var year_list=
ee.List.sequence(ee.Number.parse(time_start),ee.Number.parse(time_end).subtract(1));
var month_list=ee.List.sequence(1,12);
var SO2_monthly=ee.ImageCollection(year_list.map(function(year){
return month_list.map(function(month){
var monthly=sen5
.filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,"year"))
.filter(ee.Filter.calendarRange(month,month,"month")).mean()
var date=ee.Date.fromYMD(year,month,1)
return monthly
.set("system:time_start",date.millis())
.set("system:index", date.format("YYYY-MM-dd")) }) })
.flatten())
print(ui.Chart.image.series(SO2_monthly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000,
"system:time_start")
.setOptions({ }));
var ave= SO2_monthly.mean();
var band_viz = {
min: 0.0,
max: 0.0005,
palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
Map.addLayer(ave.clip(roi), band_viz, "SO2_ave", false);
var anomaly=SO2_monthly.map(function(img){
var index=img.subtract(ave).rename("anomaly");
return index
.copyProperties(img, img.propertyNames());
});
print(
ui.Chart.image.series(anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")
.setOptions({
title:"Сірки діоксид аномалії",
vAxis: {title: "mol/m2"},
```

```

    xAxis: {title: "дата"},
    series: {0:{color:"blue"}},
    pointSize:4
  })
  .setChartType("ColumnChart"));

var pos_anomaly=anomaly.map(function(img){
  var ave_anom=ee.Number(img.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(), geometry: roi, scale: 1000
  })).values().get(0);
  return img
  .copyProperties(img, img.propertyNames())
  .set("SO2_value", ave_anom);
})
.filter(ee.Filter.gt("SO2_value",0));
print(pos_anomaly);

print(
ui.Chart.image.series(pos_anomaly, roi, ee.Reducer.mean(), 1000, "system:time_start")
.setChartType("ColumnChart")
.setOptions({
  title:"Сірки діоксид позитивні аномалії",
  vAxis: {title: "mol/m2"},
  xAxis: {title: "дата"},
  series: {0:{color:"red"}},
  pointSize:4
}));
var trend=SO2_monthly.reduce(ee.Reducer.kendallsCorrelation());
Map.addLayer(trend.select("SO2_tau").clip(roi),
{palette: ['blue','black','red']}, "SO2_trend", false);

Export.image.toDrive({
  image: trend.select("SO2_tau").clip(roi),
  description: "trendso21924",
  region: roi,
  scale: 1000,
  folder: "test",
  crs: "EPSG:4326"
})

var poi =
ee.FeatureCollection("WRI/GPPD/power_plants")
.filter(ee.Filter.eq('fuel1', 'Coal'));
Map.addLayer(poi, {}, 'Coal');

```

## ДОДАТОК 5.

### Перерахунок норм ГДК України в моль/м<sup>2</sup>

#### 1. SO<sub>2</sub> з одиниць моль/м<sup>3</sup> на моль/м<sup>2</sup>

Для перерахунку ГДК SO<sub>2</sub> (діоксиду сірки) в Україні у молях/м<sup>2</sup> при середньому атмосферному тиску потрібні такі дані:

1. ГДК для SO<sub>2</sub>: в Україні середньодобове значення ГДК для SO<sub>2</sub> становить 0.05 мг/м<sup>3</sup>.

2. Середній атмосферний тиск: нормальний атмосферний тиск — 101325 Па (1 атм).

3. Молярна маса SO<sub>2</sub>: 64.07 г/моль (або 0.06407 кг/моль).

4. Газова стала (R): 8.314 Дж/(моль·К).

5. Середня температура повітря: Для стандартних умов приймемо 20°C (або 293.15 К).

Формула для розрахунку концентрації в молях на м<sup>3</sup>:

Спочатку знайдемо концентрацію SO<sub>2</sub> у молях на м<sup>3</sup>, використовуючи рівняння ідеального газу:

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{C_{\text{mg/m}^3}}{M} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Крок 1. Обчислення молярної концентрації (моль/м<sup>3</sup>):

Скористаємося формулою:

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{0.05 \text{ мг/м}^3}{64.07 \text{ г/моль}}$$

1. Переведемо у кг/м<sup>3</sup>:

$$C_{\text{kg/m}^3} = \frac{0.05}{1000} = 0.00000005 \text{ кг/м}^3.$$

2. Підставимо значення:

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{0.00000005}{0.06407} \approx 0.000000780 \text{ моль/м}^3.$$

Крок 2. Перетворення у колонкову кількість (моль/м<sup>2</sup>):

Колонкова кількість розраховується шляхом множення молярної концентрації на висоту атмосфери, де поширюється SO<sub>2</sub>. Для середньої висоти 8 км (8000 м):

$$C_{\text{mol/m}^2} = C_{\text{mol/m}^3} \times H$$

1. Підставимо значення:

$$C_{\text{mol/m}^2} = 0.000000780 \text{ моль/м}^3 \times 8000 \text{ м}.$$

2. Результат:

$$C_{\text{mol/m}^2} = 0,006.24 \text{ моль/м}^2.$$

Висновок:

ГДК SO<sub>2</sub> для України (0.05 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить приблизно 0,00624 моль/м<sup>2</sup> для середньої висоти атмосфери 8 км та нормального атмосферного тиску.

Це значення будемо використовувати для порівняння

2. СО з одиниць моль/м<sup>3</sup> на моль/м<sup>2</sup>

1. Перетворимо масову концентрацію у кг/м<sup>3</sup>:

$$C_{\text{kg/m}^3} = \frac{3.0}{1000} = 0.000003 \text{ кг/м}^3.$$

2. Розрахуємо :

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{C_{\text{kg/m}^3} \{M\}}{0.02801} \approx 0.1071 \text{ моль/м}^3.$$

Крок 2: Перетворення в колонкову кількість (моль/м<sup>2</sup>)

Використовуємо формулу для обчислення колонкової кількості:

$$C_{\text{mol/m}^2} = C_{\text{mol/m}^3} \times H,$$

1. Підставимо значення:

$$C_{\text{mol/m}^2} = 0.1071 \text{ моль/м}^3 \times 8000 \text{ м}.$$

2. Обчислимо:

$$C_{\text{mol/m}^2} = 856.8 \text{ моль/м}^2.$$

Висновок:

ГДК для СО в Україні (3.0 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить

0,8568 моль/м<sup>2</sup> за нормального тиску та висоти шару атмосфери 8 км.

3. Для перерахунку ГДК метану (СН<sub>4</sub>) в Україні в молях на м<sup>2</sup> на основі супутникових даних потрібно врахувати специфіку вимірювання концентрації метану супутниками. Зазвичай супутники (наприклад, ТРОПОМІ) вимірюють колонкову концентрацію у молях на м<sup>2</sup> (моль/м<sup>2</sup>) або частках на мільйон (ppm). ГДК для метану, встановлена в Україні,

здебільшого оцінюється в м<sup>3</sup>, а супутникові дані можна конвертувати для порівняння.

Розрахунок для 1920 моль часток (максимальної концентрації СН<sub>4</sub> в період дослідження)

1. Формула для об'ємної концентрації в моль/м<sup>3</sup>:

$$C_{\text{моль/м}^3} = C_{\text{ppbv}} \times \frac{N_{\text{повітря}}}{10^9}$$

— густина молекул повітря за нормальних умов.

Результат:

$$C_{\text{моль/м}^3} = 1920 \times 10^{-9} \times 2.687 \times 10^{25} = 0.00516 \text{ моль/м}^3.$$

Якщо перевести це у колонкову густину (моль/м<sup>2</sup>):

Для шару атмосфери товщиною 8 км (8000 м):

$$C_{\text{моль/м}^2} = C_{\text{моль/м}^3} \times h$$

$$C_{\text{моль/м}^2} = 0.00516 \text{ моль/м}^3 \times 8000 \text{ м} = 41.28 \text{ моль/м}^2$$

3. Безпечний рівень для метану (Україна) з одиниць моль/м<sup>3</sup> на моль/м<sup>2</sup>

Загальні норми концентрації метану у повітрі, прийняті для житлових зон, можуть коливатися в межах 50 мг/м<sup>3</sup>.

(20°C).

Середня колонкова висота атмосфери для супутникових вимірювань становить приблизно 8000 м

Крок 1: Розрахунок концентрації у молях на м<sup>3</sup>

Концентрація метану у молях на м<sup>3</sup> обчислюється за формулою:

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{C_{\text{mg/m}^3}}{M},$$

— масова концентрація метану,

. Перетворимо у кг/м<sup>3</sup>:

$$C_{\text{kg/m}^3} = \frac{0.05}{1000} = 0.00005 \text{ кг/м}^3.$$

2. Обчислимо молярну концентрацію:

$$C_{\text{mol/m}^3} = \frac{0.00005}{0.01604} \approx 0.003118 \text{ моль/м}^3.$$

Крок 2: Розрахунок колонкової концентрації у молях на м<sup>2</sup>

Колонкова концентрація розраховується за формулою:

$$C_{\text{mol/m}^2} = C_{\text{mol/m}^3} \times H,$$

. Підставимо значення:

$$C_{\text{mol/m}^2} = 0.003118 \text{ моль/м}^3 \times 8000 \text{ м}.$$

Обчислимо результат:

$$C_{\text{mol/m}^2} \approx 24.944 \text{ моль/м}^2.$$

Висновок:

ГДК для метану (CH<sub>4</sub>) в Україні (50 мг/м<sup>3</sup>) у колонковій кількості становить приблизно **24.94** моль/м<sup>2</sup> при середньому атмосферному тиску та висоті атмосфери 8 км.

**4. ГДК України для NO<sub>2</sub>: з одиниць моль/м<sup>3</sup> на моль/м<sup>2</sup>**

Середньодобова норма: або (переведено через молекулярну масу NO<sub>2</sub> = 46 г/моль).

2. Супутникові дані, наприклад, з Sentinel-5P, зазвичай відображають концентрацію у вигляді колонкової густини, тобто у моль/м<sup>2</sup> для всього атмосферного стовпа. Тому потрібно перерахувати концентрацію для заданої товщини шару.

3. Розрахунок: для обмеженого шару, наприклад нижніх 1000 м атмосфери:

$$C_{\text{моль/м}^2} = C_{\text{моль/м}^3} \times h$$

Розрахунок для нижнього шару (1000 м):

Середньодобова норма:

$$C_{\text{моль/м}^2} = 0.00087 \text{ моль/м}^3 \times 1000 \text{ м} = 0.87 \text{ моль/м}^2$$

Максимально разова норма:

$$C_{\text{моль/м}^2} = 0.00185 \text{ моль/м}^3 \times 1000 \text{ м} = 1.85 \text{ моль/м}^2$$

Порівняння з супутниковими даними



Супутникові вимірювання відображають повну колонкову густину NO<sub>2</sub> (наприклад, для всього атмосферного стовпа). Зазвичай, колонкова густина в одиницях моль/м<sup>2</sup> для регіонів з помірним забрудненням становить 1–5 моль/м<sup>2</sup>.

Таким чином, якщо супутникові дані для нижнього шару атмосфери (до 1 км) менші за 1-5 моль/м<sup>2</sup>, це відповідає нормативам ГДК України.

Shallcross, Dudley. (2011). Atmospheric chemistry by Ann Holloway and Richard Wayne. RSC Publishing, 2010. ISBN: 978-1-84755-807-7. 260 pp. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society - QUART J ROY METEOROL SOC. 137. 1102-1102. DOI:10.1002/qj.726

ESA Sentinel-5P/TROPOMI User Guide.

ДОДАТОК 6. Концентрації СО в 2019-2023 роках

Дата	Середньомісячні концентрації	Середні концентрації за рік
01.01.2019	0,036	
01.02.2019	0,036	
01.03.2019	0,038	
01.04.2019	0,04	
01.05.2019	0,034	
01.06.2019	0,031	
01.07.2019	0,029	
01.08.2019	0,032	
01.09.2019	0,033	
01.10.2019	0,031	
01.11.2019	0,031	
01.12.2019	0,033	0,033666667
01.01.2020	0,036	
01.02.2020	0,036	
01.03.2020	0,038	
01.04.2020	0,043	
01.05.2020	0,034	
01.06.2020	0,031	
01.07.2020	0,028	
01.08.2020	0,03	
01.09.2020	0,034	
01.10.2020	0,034	
01.11.2020	0,034	
01.12.2020	0,036	0,0345
01.01.2021	0,038	
01.02.2021	0,038	
01.03.2021	0,04	
01.04.2021	0,038	
01.05.2021	0,033	
01.06.2021	0,03	
01.07.2021	0,033	
01.08.2021	0,04	
01.09.2021	0,038	
01.10.2021	0,035	
01.11.2021	0,033	
01.12.2021	0,034	0,035833333
01.01.2022	0,035	
01.02.2022	0,036	
01.03.2022	0,037	
01.04.2022	0,034	
01.05.2022	0,032	
01.06.2022	0,029	

01.07.2022	0,029	
01.08.2022	0,03	
01.09.2022	0,029	
01.10.2022	0,028	
01.11.2022	0,029	
01.12.2022	0,032	0,031666667
01.01.2023	0,032	
01.02.2023	0,035	
01.03.2023	0,034	
01.04.2023	0,034	
01.05.2023	0,033	
01.06.2023	0,035	
01.07.2023	0,036	
01.08.2023	0,035	
01.09.2023	0,036	
01.10.2023	0,036	
01.11.2023	0,035	
01.12.2023	0,035	0,034666667
Максимум	0,043	0,035833333
Мінімум	0,028	0,031666667
Середня концентрація за 5 років	0,034066667	0,034066667

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження стану навколишнього середовища з використанням Google Earth Engine	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав		Лініченко Т.М.						
Керівник		Площ Т.М.					100	13
Консультант						100		
Зав. каф.		Карпінський Ю.О.				КНУБА, група зГСТм-23		

1. Закон України Про охорону навколишнього природного середовища: від 26.06.91 № 1268-ХІІ. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
2. Закон України Про Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів: від 20.09.2022 № 2614-ІХ. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2614-20#Text>
3. Закон України Про національну інфраструктуру геопросторових даних: від 31.12.2023 № 554-ІХ. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>
4. Закон України Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: від 12.12.2019 № 377-ІХ. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text>
5. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої [...]: від 27.06.2014 № 984\_011. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text)
6. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи: від 21.05.2008 № 994\_950. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_950#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text)
7. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел: від 11.12.2018 №2018/2001. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_039-18#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_039-18#Text)
8. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до автомобільних бензинів, дизельного, суднових та котельних палив: Постанова Кабінету Міністрів України: від 01.08.2013 № 927. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/927-2013-%D0%BF#Text>

9. Кольцов М. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка] / М. Кольцов, Л. Шевченко — Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. — 13 с. — Режим доступу:  
[https://openaccess.org.ua/data/blog\\_dwnl/Analitichna\\_zapiska\\_atmosferne\\_po\\_vitrya.pdf](https://openaccess.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_po_vitrya.pdf)
10. Боголюбов В.М. Екологічний моніторинг: навч. пос. / В. М. Боголюбов, А. В. Сальнікова, О.О. Ракоїд. — Київ: НУБіПУ, 2023. — 200 с.
11. Положення про державну систему моніторингу довкілля Постанова Кабінету Міністрів України: від 30.03.1998 р. N 391 Київ . — [Електронний ресурс]: — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>
12. Shallcross, Dudley. (2011). Atmospheric chemistry by Ann Holloway and Richard Wayne. RSC Publishing, 2010. ISBN: 978-1-84755-807-7. 260 pp. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society - QUART J ROY METEOROL SOC. 137. 1102-1102. DOI:10.1002/qj.726
13. Положення про державну систему моніторингу довкілля Постанова Кабінету Міністрів України: від 30.03.1998 р. N 391 Київ . — [Електронний ресурс]: — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>
14. Конституція України: від 28.06.1996 № 254к/96-ВР . — [Електронний ресурс]: — Режим доступу:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>
15. Закон України Про охорону атмосферного повітря: від 16.10.1992 № 2707-ХІІ. — [Електронний ресурс]: — Режим доступу:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
16. Закон України Про гідрометеорологічну діяльність: від 18.02.1999 № 443-ХІV. — [Електронний ресурс]: — Режим доступу: [2849-IX - https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-14#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-14#Text)

17. Закон України Про охорону земель: від 19.06.2003 № 962-IV. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text>
18. Закон України Про управління відходами: від 20.06.2022 № 2320-IX. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
19. Закон України Про оцінку впливу на довкілля: від 23.05.2017 № 2059-VIII. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>
20. Земельний кодекс України: прийнятий Верховною Радою України 25.10.2001 № 2768-III. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
21. Водний кодекс України: прийнятий Верховною Радою України 06.06.1995 № 213/95-ВР. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
22. Лісовий кодекс України: прийнятий Верховною Радою України 21.01.1994 3852-XII. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12#Text>
23. Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України з питань моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Постанова Кабінету Міністрів України: від 14.11.2023 р. № 1203. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1203-2023-%D0%BF#Text>
24. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 2018/1999 від 11 грудня 2018 року про управління Енергетичним Союзом і пом'якшення наслідків зміни клімату...: від 11.12.2018 № 2018/1999. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_030-18#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-18#Text)
25. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених

- місце: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 10.05.2024 № 813.  
– [Електронний ресурс]: – Режим доступу:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text>
26. Закон України Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: від 12.12.2019 № 377-IX. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text>
27. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: Постанова Кабінету Міністрів України: від 14.08.2019 № 827. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>
28. Davybida Lidia. (2023). Air quality impacts of war detected from the Sentinel-5P satellite over Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1254. 012112. DOI: [10.1088/1755-1315/1254/1/012112](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012112)
29. Яценко Л.Д., Іванюта С.П., Мартюшева О.О. 2012 "Індикатори стану екологічної безпеки держави". Аналітична записка Сторінка 7ICSF 2023 IOP Conf. Серія: Земля та екологія 1254 (2023) 012112 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1254/1/0121126
30. Моніторинг якості атмосферного повітря над територією України з деталізацією для міст за даними супутника Sentinel-5P. / М. В. Савенець, В. І. Осадчий, А. В. Орещенко // Вісник НАН України. – 2021. - №3. – С. 50–58. <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.050>
31. Sentinel online . Режим доступу:  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5/overview>
32. TROPOMI. Режим доступу: <https://www.tropomi.eu/>
33. SentiWiki. Copernicus Programme. Режим доступу:  
<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/copernicus-programme>
34. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Noel Gorelick a, Matt Hancher b, Mike Dixon b, [et al.] // Remote Sensing of Environment - 1 December 2017 - Volume 202 - Pages 18-27  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>



35. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review / Amani M. [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2020. - vol. 13. - pp. 5326-5350,. [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052)
36. Kumar Lalit. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential / Kumar Lalit, Mutanga Onesimo // Remote Sens. – 2018. - № 10 (10) - 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>
37. Assessing the Relative Importance of Satellite-Detected Methane Superemitters in Quantifying Total Emissions for Oil and Gas Production Areas in Algeria /S. Naus,\* J. D. Maasackers, R. Gautam, [et al.] // Environmental Science and Technology. - November 2023. - №57(48) - 19545–19556. [DOI:10.1021/acs.est.3c04746](https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04746)
38. Давибіда Л. І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля / Л. І. Давибіда // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. - 2022. - Том 12. - №2. – С. 75 – 86. [DOI: 10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86)
39. Давибіда Л.І. Можливості використання даних дистанційного зондування землі для дослідження впливу нафтогазового комплексу на стан довкілля (на прикладі Карпатського регіону) / Л. І. Давибіда., Б. В. Карпінський // Науково-практичний журнал. Екологічні науки. - 2024. - Том 1. - № 1(52) – С. 36-41. УДК 528.88:504:622.323. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.5>
40. Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine / Hamdi A. Zurqani, Christopher J. Post, Elena A. Mikhailova, [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2018. - Volume 69. - Pages 175-185, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.006>.

41. Applications of Google Earth Engine for Big Data Analytics / Chetan R Dudhagara, Ankur P Vora, Dhaval. R Kathiriya, R S Pundir // The Pharma Innovation. - December 2022. - 12(3):2054-2062
42. Cloud-based large-scale data retrieval, mapping, and analysis for land monitoring applications with Google Earth Engine (*GEE*) / Sukanya Ghosh, Deepak Kumar, Rina Kumari // Environmental Challenges. - December 2022 <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100605>
43. United States Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). - Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division Research Triangle Park, NC. - EPA-454/B-24-002 May 2024. <https://document.airnow.gov/technical-assistance-document-for-the-reporting-of-daily-air-quality.pdf>
44. Investigating the Relationship between Urbanization and Air Pollution Using Google Earth Engine Platform: A Case Study of Istanbul. / Yasan, Duygu & Acar, Uğur & Yilmaz, Osman. // International Journal of Environment and Geoinformatics - 2024. - № 11- 130-146. DOI: [10.30897/ijgeo.1339560](https://doi.org/10.30897/ijgeo.1339560)
45. Air pollution declines during COVID-19 lockdowns mitigate the global health burden / Zander S. Venter, Kristin Aunan, Sourangsu Chowdhury, Jos Lelieveld // Environmental Research. – 2021. - Volume 192. - 110403, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110403>
46. Big data analyses for determining the spatio-temporal trends of air pollution due to wildfires in California using Google Earth Engine / Abdullah Al Saim, Mohamed H. Aly // Atmospheric Pollution Research. – 2024. - Volume 15. - Issue 9. - 102226. ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102226>
47. Google Earth Engine application for mapping and monitoring drought patterns and trends: A case study in Arkansas, USA / Shadia A. Alzurqani, Hamdi A. Zurqani, Don White, Kathleen Bridges, Shawn Jackson // Ecological Indicators. – 2024. - Volume 168. - 112759. ISSN 1470-160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112759>

48. Evaluation and Mapping the Atmospheric Air Quality of Coastal Area in Bangladesh Using Remote Sensing and GIS Techniques / Hasan, M. M. & Ahmed A. // The Dhaka University Journal of Earth and Environmental Sciences. - 2023. - № 11(2). - 53–64.  
<https://doi.org/10.3329/dujees.v11i2.68840>
49. Лановенко О. Г. СЛОВНИК–ДОВІДНИК З ЕКОЛОГІЇ: Навчально-методичний посібник / О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина, О.Є. Ходосовцев – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2013. – 226 с.
50. Earth Engine Data Catalog. Режим доступу:  
<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/>
51. P. Kovacic, R. Somanathan, Dioxide Nitrogen (Formerly Nitrogen Oxides), Editor(s): Philip Wexler / Encyclopedia of Toxicology (Third Edition), Academic Press. - 2014. - pages 558–559, ISBN 9780123864550.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01025-3>
52. Деркач Ф. А. Хімія / Ф. А. Деркач — Львів : Львівський університет, 1968. — 312 с.
53. Мотрунич М. Управління якістю атмосферного повітря в країнах Європи / М. Мотрунич за ред. Ратушної М., Амосова М, Криницького - Київ: Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2022. – 40 с.
54. Забруднення повітря в Україні - погляд з космосу / Skalsky Martin, Soroka Maksym, Labohy Jan [et al.] // Arnika - Citizens Support Centre. – November, 2020. [DOI: 10.13140/RG.2.2.21053.28645](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21053.28645)
55. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо змісту розроблення регіональних програм з охорони довкілля: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 11.07.2023 № 486. – [Електронний ресурс]: – Режим доступу:  
<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0486926-23#Text>
56. Супутниковий моніторинг вмісту метану в атмосфері на території України /Тимчишин М. А. 1, Єлістратова Л. А. 1, Апостолов А. А. 1, Ходоровського

- А. Я. [та ін.] // 17-та Міжнародна конференція Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану навколишнього середовища. - 2023. - С. 1 – 5 DOI:<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520033>
- 57.Thakur S. ROLE OF METHANE IN CLIMATE CHANGE AND OPTIONS FOR MITIGATION-A BRIEF REVIEW / Thakur, S., & Solanki, H. // International Association of Biologicals and Computational Digest, - 2022. - 1(2). - 275–281. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v1i2.80>
- 58.Beyond CO2 equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health / Kathleen A. Mar, Charlotte Unger, Ludmila Walderdorff, Tim Butler. // Environmental Science & Policy. – 2022. - Volume 134. - Pages 127-136, ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>.
- 59.Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations / Zihao Feng, Xuhong Wang, Jiaxin Yuan, Ying Zhang, Mengqianxi Yu // Science of The Total Environment. - 2023. - Volume 892, 20 - 164496 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164496>
- 60.Peter D. Sly. Adverse Environmental Exposure and Respiratory Health in Children/ Peter D. Sly//Pediatric Clinics of North America. - 2021. - Volume 68, Issue 1. - Pages 277-291, ISSN 0031-3955, ISBN 9780323836142 <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2020.09.018>
- 61.In: Neil Salkind (Ed.) The Kendall Rank Correlation Coefficient / Encyclopedia of Measurement and Statistics. – 2007. - Режим доступу: <https://personal.utdallas.edu/~herve/Abdi-KendallCorrelation2007-pretty.pdf>
- 62.Monitoring Trends of SO2 level Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine / Bakhodir Muslimbekov, Nozimjon Teshaeв, Sarvar Abdurakhmonov and Oybek Gaybulloev // E3S Web Conf. - 2024. - 563, 03068 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456303068>
63. Application of Information and Communication Technologies in Environmental Scientific Research (on Example of Sulfur Dioxide Emissions

- Research into the Atmospheric Air of Ukraine)./ Yelistratova, L., Apostolov, A., Khodorovskiy, A., Tymchyshyn, M., In: Faure, E. [et al.] // Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer, Cham. - 2024.- vol 221. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_26)
64. Monitoring Trends of CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on GoogleEarth Engine / Kazemi Garajeh, M.; Laneve, G.; Rezaei [et al.] // Pollutants. – 2023. – №3 – P. 255–279 DOI: 10.3390/pollutants3020019 License CC BY 4.0
65. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
66. Супутниковий моніторинг вмісту метану в атмосфері на території України / М. А. Тимчишин<sup>1</sup>, Л. А. Єлістратова<sup>1</sup>, А. А. Апостолов<sup>1</sup>, А. Я. Ходоровського<sup>1</sup> [та ін.] // European Association of Geoscientists & Engineers. 17-та Міжнародна конференція Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану навколишнього середовища. – 2023. - том 2023 р. - С.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520033>
67. Thakur, S., & Solanki, H. (2022). ROLE OF METHANE IN CLIMATE CHANGE AND OPTIONS FOR MITIGATION-A BRIEF REVIEW. International Association of Biologicals and Computational Digest, 1(2). - 275–281. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v1i2.80>
68. Dave S. Reay<sup>1</sup>, Pete Smith<sup>2</sup>, Torben R. Christensen<sup>3,4</sup>, Rachael H. James<sup>5</sup>, and Harry Clark<sup>6</sup>. Methane and Global Environmental Change. Annual Review of Environment and Resources. – 2018. - Volume 43. - 165-192 DOI: [10.1146/annurev-environ-102017-030154](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030154)
69. Фотограмметрична техніка & дистанційне зондування, том. 65, № 1 січня 1999 р. Американське товариство фотограмметрії та дистанційного зондування (PDF) Порівняння впливу методів агрегації на статистичні та

просторові властивості змодельованих просторових даних.  
[https://www.researchgate.net/publication/265561599\\_Comparing\\_Effects\\_of\\_Aggregation\\_Methods\\_on\\_Statistical\\_and\\_Spatial\\_Properties\\_of\\_Simulated\\_Spatial\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/265561599_Comparing_Effects_of_Aggregation_Methods_on_Statistical_and_Spatial_Properties_of_Simulated_Spatial_Data) [accessed Nov 10 2024].

70. Розробка моделі вимірювання якості повітря/Л. Монастирський, В.. Гура, О. Островського // Електроніка та інформаційні технології. - 2024. - 27 (27) DOI:10.30970/ie.27.9 Ліцензія С С ВУ 4.0
71. Md. Nazmul Haque, Md. Shahriar Sharif, Rhyme Rubayet Rudra, Mahdi Mansur Mahi, Md. Jahir Uddin, Radwan G. Abd Ellah, Analyzing the spatio-temporal directions of air pollutants for the initial wave of Covid-19 epidemic over Bangladesh: Application of satellite imageries and Google Earth Engine, Remote Sensing Applications: Society and Environment. - 2022. - Volume 28. - 100862, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100862>.
72. Про затвердження Порядку визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії Російської Федерації: Постанова Кабінету Міністрів України: від 20.03.2022 № 326. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/326-2022-%D0%BF#Text>
73. Katarzyna Kozicka Dariusz Gozdowski Elżbieta Wójcik-Gron Spatial-Temporal Changes of Methane Content in the Atmosphere for Selected Countries and Regions with High Methane Emission from Rice Cultivation October 2021 Atmosphere 12(11):1382 DOI: 10.3390/atmos12111382
74. Huntrieser, Heidi & Klausner-Harlab, Theresa & Aufmhoff, Heinfried & Baumann, Robert & Fiehn, Alina & Gottschaldt, Klaus-Dirk & Hedelt, Pascal & Lutz, Ronny & Mrazovac Kurilic, Sanja & Podrascanin, Zorica & Ilić, Predrag & Theys, Nicolas & Jöckel, Patrick & Loyola, Diego & Makroum, Ismail & Mertens, Mariano & Roiger, Anke. (2023). Emissions of Sulphur Dioxide (SO<sub>2</sub>) from Coal-Fired Power Plants in Serbia and Bosnia-Herzegovina: First Attempts of a Validation of TROPOMI Satellite Products with Airborne In Situ Measurements. DOI: 10.7251/EORU2309169H

75. Sk Nafiz Rahaman, S.M. Masum Ahmed, Mohammad Zeyad, Abid Hasan Zim  
Effect of vegetation and land surface temperature on NO<sub>2</sub> concentration: A  
Google Earth Engine-based remote sensing approach, *Urban Climate*, Volume  
47, 2023, 101336, ISSN 2212-0955,  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101336>.
76. Shami, Siavash & Ranjgar, Babak & Bian, Jinhua & Khoshlahjeh Azar, Mahdi &  
Moghimi, Armin & Amani, Meisam & Naboureh, Amin. (2022). Trends of CO  
and NO<sub>2</sub> Pollutants in Iran during COVID-19 Pandemic Using Timeseries  
Sentinel-5 Images in Google Earth Engine. *Pollutants*.  
2. DOI: [10.3390/pollutants2020012](https://doi.org/10.3390/pollutants2020012)
77. Лаурі Міллівірта. Вплив викидів українських вугільних електростанцій на  
здоров'я населення / Лаурі Міллівірта, Роза Гіренс // CREA, Вересень. –  
Режим доступу: [https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/09/Coal-  
Health-Impacts-in-Ukraine\\_UA.pdf](https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/09/Coal-Health-Impacts-in-Ukraine_UA.pdf)
78. Про запобігання поширенню на території України гострої респіраторної  
хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV: Постанова  
Кабінету Міністрів України від 11 березня 2020 р. № 211. – [Електронний  
ресурс]. – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/211-2020-  
%D0%BF#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/211-2020-%D0%BF#Text)
79. Борняк, У. І. Сучасні методи подолання наслідків екологічної катастрофи  
на прикладі Каховської ГЕС / Борняк У. І., Кривохижа Є. М. // *Scientific  
Bulletin of UNFU*. – 2023 - №33(4), 31-36. <https://doi.org/10.36930/40330405>
80. Нафтові і газові родовища / Р. М. Кондрат, П. Ф. Шпак, Б. Л. Крупський //  
Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.:  
І.М.Дзюба, А.І.Жуковський, М.Г.Железняк [та ін.]. – К.: Інститут  
енциклопедичних досліджень. - НАН України. - 2020. – Режим доступу:  
<https://esu.com.ua/article-71109>. – Останнє поновлення: 19 черв. 2023
81. Удари по об'єктах критичної інфраструктури України під час російсько-  
української війни. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/>

82. Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale Russian invasion of Ukraine / Mykhailo Savenets, Volodymyr Osadchyi, Kateryna Komisar [et al.] // Atmospheric Pollution Research. – 2023. - Volume 14. - Issue 11, 101912, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>.
83. M.A.K. Khalil The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance / M.A.K. Khalil, R.A. Rasmussen // Chemosphere. - 1990. - Volume 20. - Issues 1–2/ - Pages 227-242, ISSN 0045-6535, [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90098-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90098-E).
84. Air pollution dispersion in Hail city: Climate and urban topography impact / Walid Hassen, Nidhal Hnaien, Lotfi Ben Said [et. al] // Heliyon. – 2023. - Volume 9. - Issue 10, e20608, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20608>.
85. Rostun Nadia. Problems of loss of economic potential in regions of Ukraine as a result of military actions / Rostun Nadia & Leshchukh Iryna // Galician economic journal. - 2024. - 87. – P. 7-19. DOI: [10.33108/galicianvisnyk\\_tntu2024.02.007](https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.02.007)
86. Xiaochuan Pan Sulfur Oxides, Editor(s): Jerome Nriagu, Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition). – Elsevier. – 2019. - Pages 823-829. ISBN 9780444639523, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11333-8>.
87. Harris Lorenzaj & Adewale, Tunmise. (2024). Industrial Emissions And Air Quality: Examining Trends and the Struggle for Effective Regulation. [https://www.researchgate.net/publication/385378277\\_Industrial\\_Emissions\\_And\\_Air\\_QualityExamining\\_Trends\\_and\\_the\\_Struggle\\_for\\_Effective\\_Regulation](https://www.researchgate.net/publication/385378277_Industrial_Emissions_And_Air_QualityExamining_Trends_and_the_Struggle_for_Effective_Regulation)
88. John H. Lawton, Kevin J. Gaston, Indicator Species, Editor(s): Simon Asher Levin, Encyclopedia of Biodiversity. – Elsevier. – 2001. - Pages 437-450. ISBN 9780122268656, <https://doi.org/10.1016/B0-12-226865-2/00156-5>.
89. Дворецька І. В. Основні характеристики сезонного ходу діоксиду сірки над територією Європи / І. В. Дворецька, У. І. Марчук, М. В. Савенець //



Часопис картографії. - 2013. - Вип. 7. - С. 187-196. - Режим доступу:  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh\\_2013\\_7\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2013_7_23)

90. Communicating respiratory health risk among children using a global air quality index, / Laura A. Gladson, Kevin R. Cromar, Marya Ghazipura [et al] // Environment International.– 2022. - Volume 159. – 107023, ISSN 0160-4120.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107023>.
91. Sentinel satellite data monitoring of air pollutants with interpolation methods in Guayaquil, Ecuador, Remote Sensing Applications / Danilo Mejía C., Hermel Alvarez, Rasa Zalakeviciute [et al] // Society and Environment. – 2023. - Volume 31. – 100990. ISSN 2352-9385,  
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100990>.