

МАРІУПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

До захисту допустити:
Завідувач кафедри
Х.С. Мітюшкіна
«.....» грудня 2025 р.

«Просторовий розподіл парникових газів над територією України»

Кваліфікаційна робота здобувача другого
(магістерського) рівня вищої освіти
освітньо-професійної програми
«Екологія та охорона навколишнього
середовища»

Трегуб Анастасії Олександрівни

Науковий керівник:

доц., к.х.н. О.М.Пастернак

Рецензент:

В.І.Мокрий,

д.т.н, професор кафедри екологічної безпеки та
природоохоронної діяльності Національного
університету «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна робота
захищена з оцінкою _____

Секретар ЕК _____

«___» _____ 20__р.

КИЇВ–2025

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

- | | |
|---|----|
| 1.1. Енергетичний баланс Землі та парниковий ефект | 5 |
| 1.2. Сучасні підходи та міжнародні ініціативи щодо моніторингу парникових газів | 11 |
| 1.3. Національний вимір моніторингу парникових газів в Україні | 20 |

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА АНАЛІТИЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- | | |
|--|----|
| 2.1. Методи обробки та візуалізації атмосферної інформації | 29 |
| 2.2. Статистичні методи аналізу просторових даних | 33 |
| 2.3. Методика оцінювання потенціалу глобального потепління | 36 |

РОЗДІЛ 3. СПІВСТАВЛЕННЯ ГЛОБАЛЬНОГО ТА РЕГІОНАЛЬНОГО ТРЕНДУ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

- | | |
|---|----|
| 3.1. Глобальний тренд концентрацій парникових газів | 45 |
| 3.2. Динаміка та просторово-часові закономірності розподілу вуглекислого газу 2016 – 2021 рр. | 51 |
| 3.3. Динаміка та просторово-часові закономірності розподілу метану 2020 – 2024 рр. | 60 |

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Сучасний стан кліматичної системи Землі характеризується значним посиленням процесів глобального потепління, головним чинником якого є зростання концентрації парникових газів в атмосфері. Зміна клімату визначена однією з ключових глобальних екологічних загроз ХХІ століття, що впливає на природні екосистеми, функціонування антропогенних екосистем та якість життя населення. Згідно з міжнародними дослідженнями за останні десятиліття концентрації вуглекислого газу, метану та сполук нітрогену та сірки зросли до рекордних показників, що потребує всебічного наукового аналізу, включно з регіональними особливостями їх розподілу.

Україна є активним учасником глобальних кліматичних процесів. В державі присутній розвинутий агропромисловий комплекс, енергетичний сектор, металургійний комплекс та інтенсивні транспортні потоки. У контексті зобов'язань у межах Паризької кліматичної угоди та курсу на екологічну модернізацію, дослідження стану та просторових характеристик парникових газів над територією країни має важливе теоретичне та прикладне значення. Розуміння особливостей їх розподілу є основою для розроблення національної кліматичної політики, вдосконалення систем моніторингу та імплементації заходів зі скорочення викидів.

Особливу актуальність тема набуває у зв'язку з інтенсивним розвитком супутникових, геоінформаційних та аналітичних технологій, які дають змогу здійснювати комплексний просторово-часовий аналіз атмосфери. Дані супутникових платформ та веб-інструменти дистанційного зондування Землі відкривають нові можливості для детального відстеження концентрацій парникових газів і визначення тенденцій.

Метою даного дослідження є визначення особливостей просторового розподілу основних парникових газів над територією України з використанням сучасних ГІС-технологій та супутникових даних.

Для досягнення мети поставлено завдання:

- провести аналітичний огляд літературних джерел про природу парникового ефекту;
- визначити міжнародні та національні ініціативи щодо моніторингу парникових газів;
- розглянути методики візуалізації та оцінювання атмосферної інформації;
- отримати первинні просторово-часові дані концентрацій парникових газів;
- провести статистичний аналіз концентрацій парникових газів;
- побудувати карти просторового розподілу парникових газів.

Об'єктом дослідження є концентрації парникових газів в атмосфері над територією України. Предметом дослідження є просторово-часові особливості розподілу концентрацій.

Методи роботи: веб-інструменти платформи NASA Giovanni та платформи GOOGLE Планета Земля, методи статистичної обробки даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання їх для вдосконалення регіональних природоохоронних стратегій, систем моніторингу атмосферного повітря та формування інструментів державної кліматичної політики.

Структура роботи включає вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ

парникових газів

1.1. Енергетичного баланс Землі та парниковий ефект.

Енергетичний баланс Землі визначається співвідношенням між потоком сонячної радіації, який надходить до верхньої межі атмосфери, та сумарним довгохвильовим випромінюванням, яке система «Земля–атмосфера» повертає в космічний простір. У середньому близько 340 Вт/м^2 сонячної енергії досягає верхньої межі атмосфери; частина цього потоку відбивається хмарами, аерозолями та поверхнею, формуючи планетарне альbedo, яке за сучасними супутниковими оцінками становить приблизно 0,29 [1; 2]. Ефективне поглинання короткохвильової радіації поверхнею та атмосферою і подальше її перетворення на теплову енергію визначають термічний режим нижніх шарів атмосфери. Будь-яке стале відхилення енергетичного балансу (Earth Energy Imbalance, EEI) означає накопичення або втрату енергії й веде до зміни клімату [3; 4].

Поглинена сонячна енергія переважно перетворюється на довгохвильове інфрачервоне випромінювання, яким Земля віддає тепло в космос. Частина цього випромінювання виходить за межі атмосфери, однак значний його обсяг поглинається парниковими газами, хмарами й аерозолями, які потім випромінюють енергію в усіх напрямках, зокрема назад до поверхні. «Перерозподіл» інфрачервоного випромінювання формує фізичну основу парникового ефекту й вертикального профілю температури тропосфери та описаний рівняннями переносу випромінювання та законом Планка. Основний внесок у поглинання забезпечують молекули води та вуглекислого газу, а також метан і нітроген(I) оксид. Роль аерозолів та хмар у модифікації радіаційних потоків підтверджена сучасними дослідженнями [23].

Сучасні спектроскопічні та супутникові роботи підтверджують, що антропогенне зростання концентрації CO_2 спричинило додаткове радіаційне

навантаження приблизно $+2,1 \text{ Вт/м}^2$ порівняно з доіндустріальним рівнем [5]. Значна частина надлишкової енергії акумулюється в океанах, що підтверджується даними глобального моніторингу теплового вмісту океану [6]. Кліматичні моделі свідчать, що через інерційність океану й атмосфери підвищення температури триватиме навіть за умови стабілізації викидів CO_2 [5,7].

Подальші дослідження ЕЕІ демонструють суттєві зміни у надходженні та випромінюванні енергії на верхній межі атмосфери. Унаслідок зростання концентрацій парникових газів і трансформації аерозольного навантаження величина ЕЕІ з початку 2000-х років фактично подвоїлася [1 - 4]. Важливу роль у цьому відіграють зміни в аерозольному складі атмосфери та хмарності, які модифікують альбедо й впливають на хмарні процеси.

У сучасній літературі парникові гази (парникових газів) визначають як газоподібні компоненти атмосфери природного та антропогенного походження, здатні поглинати й випромінювати інфрачервоне (теплове) випромінювання в діапазоні земного випромінювання, формуючи парниковий ефект і сприяючи утриманню тепла в нижніх шарах атмосфери [5]. У міжнародних документах, зокрема в оцінювальних доповідях IPCC та матеріалах UNFCCC, парникових газів описуються як гази, що поглинають і повторно випромінюють інфрачервоне випромінювання, охоплюючи як природні, так і антропогенні складники атмосфери [5; 8]. Узагальнені трактування в енциклопедичних джерелах підкреслюють здатність парникових газів пропускати сонячну (короткохвильову) радіацію та частково блокувати вихід довгохвильового випромінювання, що повертається з поверхні Землі [9; 10].

Узагальнені визначення парникових газів, наведені в IPCC, UNFCCC та сучасних енциклопедичних ресурсах, виокремлюють три ключові ознаки:

- здатність поглинати інфрачервоне випромінювання;
- участь у формуванні парникового ефекту;
- поєднання природного й антропогенного походження.

Парниковий ефект у сучасній науці розглядається як процес теплового регулювання кліматичної системи Землі, у якому парникові гази, хмари та певні

групи аерозолів поглинають інфрачервоне випромінювання, що випускається нагрітою поверхнею планети після поглинання сонячної енергії, і частково випромінюють його назад у бік поверхні [5; 10]. Через зниження температури з висотою в тропосфері чистий потік випромінювання в космос зменшується порівняно з потенційним рівнем у разі відсутності поглинаючих компонентів, що призводить до прогрівання нижніх шарів атмосфери [5].

Без природного парникового ефекту середня температура поверхні Землі становила б близько -18°C , тоді як фактичне середнє значення становить приблизно $+15^{\circ}\text{C}$, що забезпечує стабільність гідросфери та існування біосфери [5; 9; 10]. Проте збільшення концентрацій довгоживучих парникових газів внаслідок антропогенної діяльності посилює цей природний механізм («посилений парниковий ефект») і є провідним чинником сучасного глобального потепління [5; 11; 12].

Історичний розвиток уявлень про здатність атмосфери утримувати тепло й впливати на клімат сформувався завдяки працям класичних дослідників XIX–XX ст., таких як Ж. Фур'є, Дж. Тіндаль та С. Арреніус. Сучасні огляди, узагальнені в доповідях IPCC та енциклопедичних виданнях, розглядають ці роботи як фундамент для сучасного фізичного опису парникового ефекту й радіаційного балансу [5; 10; 11].

У природних умовах парникові гази є невід'ємною частиною атмосфери та забезпечують підтримання оптимального температурного режиму на поверхні Землі. Їхній вміст формується в результаті взаємодії геофізичних, біогеохімічних та гідрометеорологічних процесів, які підтримують динамічну рівновагу глобальної кліматичної системи [5].

Вуглекислий газ (CO_2) надходить до атмосфери через низку природних процесів, включаючи вулканічну активність, розкладання органічної речовини та обмін між океаном і атмосферою. Сучасні синтетичні оцінки свідчать про важливу роль океану як буфера, що поглинає значну частку природних і антропогенних викидів CO_2 [13].

Метан (CH_4) у природних умовах формується переважно в анаеробних середовищах – болотах, заболочених ґрунтах, водно-болотних екосистемах.

Високоширотні тундрові й торфові масиви та мерзлотні ґрунти містять великі запаси органічного вуглецю, які за умов потепління можуть вивільняти значні обсяги CH_4 і CO_2 , посилюючи позитивний зворотний зв'язок у кліматичній системі [14; 15].

Нітроген оксид (N_2O) має переважно мікробіологічне ґрунтове походження й утворюється внаслідок процесів нітрифікації та денітрифікації. Інтенсивність цих процесів визначається рівнем вологості, температурою, ступенем аерації ґрунтів і наявністю доступних форм азоту. Новітні інвентаризації подають оновлені оцінки природних потоків N_2O у глобальній атмосфері [5; 8].

Водяна пара (H_2O) є наймасштабнішим природним парниковим газом, концентрація якого контролюється механізмами глобального гідрологічного циклу. Її надходження до атмосфери забезпечує випаровування з океанів, суходолу та рослинності, тоді як подальша конденсація формує хмароутворення, випадіння опадів і перенесення вологи повітряними потоками. Підвищення температури підсилює вміст водяної пари, створюючи позитивний зворотний зв'язок, що посилює парниковий ефект [5].

Від початку індустріальної епохи концентрації основних парникових газів різко зросли, що свідчить про домінуючий вплив антропогенної діяльності на кліматичну систему [5; 11; 12; 13, 16]. За оцінками міжнародних організацій та сучасних досліджень, основними джерелами антропогенних викидів є енергетичний сектор, промисловість, транспорт, сільське господарство, зміни землекористування та поводження з відходами [5; 17, 18].

Енергетичний сектор є ключовим джерелом антропогенних викидів CO_2 . Спалювання кам'яного вугілля, нафти та природного газу для виробництва електроенергії, тепла та в промислових процесах забезпечує більшу частку глобальних антропогенних викидів парникових газів [5; 11; 12]. Інтенсивне зростання енергоспоживання у країнах, що розвиваються, та недостатньо швидкий перехід на відновлювані джерела в розвинених державах сприяють подальшому підвищенню концентрації CO_2 в атмосфері. За даними Всесвітньої метеорологічної організації, у 2021–2023 рр. рівні CO_2 , CH_4 та N_2O досягли нових

рекордів, що підтверджує антропогенний характер сучасних кліматичних змін [13; 16].

Промисловий сектор формує істотну частку глобальних викидів парникових газів. До основних джерел належать виробництво цементу, хімічна промисловість, металургія, а також видобуток і транспортування викопного палива, що супроводжуються втратами метану [5, 18]. Високодеталізовані картографічні дослідження демонструють, що сукупні викиди CH_4 і N_2O з промисловості та енергетики є одним із найбільш проблемних сегментів глобальної структури емісій [18].

Транспорт є одним із провідних джерел антропогенних викидів CO_2 . Автомобільний транспорт становить основну частку транспортних викидів, тоді як авіація та морські перевезення формують решту. Незважаючи на підвищення енергоефективності двигунів, у багатьох країнах Європи транспортні викиди продовжують зростати через збільшення кількості автомобілів, розвиток логістики та інтенсифікацію міжнародної торгівлі [5, 11], що посилює кумулятивний ефект від використання викопного палива в інших секторах.

Сільське господарство є одним із ключових джерел CH_4 та N_2O – газів із набагато вищим, ніж у CO_2 , потенціалом глобального потепління. Метан утворюється під час ферментації у травній системі жуйних тварин, у затоплених рисових полях та при зберіганні органічних відходів тваринництва. Нітроген(I) оксид генерується внаслідок мікробіологічних процесів у ґрунтах, особливо при надмірному внесенні азотних добрив [5; 17]. Українські дослідження засвідчують зростання внеску аграрного сектору України у викиди CH_4 та N_2O через інтенсифікацію тваринництва й широке використання мінеральних добрив [19]. Глобально частка сільського господарства у викидах антропогенного метану оцінюється приблизно у 40 %.

Полігони твердих побутових відходів є значним джерелом CH_4 , який формується під час анаеробного розкладання органічної фракції відходів. Відсутність ефективних систем дегазації та низький рівень компостування істотно підсилюють антропогенне навантаження в цьому секторі [5; 8]. У

контексті України проблема поглиблюється через велику кількість переповнених полігонів, що функціонують без сучасних інженерно-екологічних рішень.

Зміни землекористування, насамперед вирубка лісів та їх трансформація в орні землі або пасовища, знижують здатність екосистем поглинати CO_2 . Ліси виконують роль природних поглиначів вуглецю, тому їх скорочення збільшує концентрації CO_2 в атмосфері; додаткові викиди утворюються під час спалювання рослинності для підготовки земель до сільськогосподарського використання [5; 11].

Узагальнюючи наукові підходи, парникові гази визначають як газоподібні компоненти атмосфери, здатні поглинати та повторно випромінювати інфрачервоне випромінювання в діапазоні земного теплового спектра, забезпечуючи утримання енергії в системі «атмосфера–поверхня Землі». Парниковий ефект є природним механізмом регуляції температури планети та необхідною умовою існування життя, однак його антропогенне посилення зумовлює сучасне глобальне потепління.

До основних парникових газів належать: водяна пара, вуглекислий газ, метан, нітроген оксид (N_2O), а також фторовані гази (HFCs, PFCs, SF_6). Їх класифікують за походженням, тривалістю перебування в атмосфері, спектральними радіаційними властивостями та потенціалом глобального потепління.

Кліматичний вплив парникових газів визначається поєднанням концентрації, часу життя, радіаційних характеристик і джерел емісії. За сучасними оцінками CO_2 забезпечує 70–76 % антропогенного впливу, CH_4 – 16–17 %, N_2O – близько 6 %, тоді як фторовані гази становлять невелику частку, але характеризуються дуже високими значеннями потенціалом глобального потепління і значною тривалістю перебування в атмосфері [5; 11; 12]. На рис.1.1 представлено структура викидів парникових газів України за даними аналітичного звіту [20].

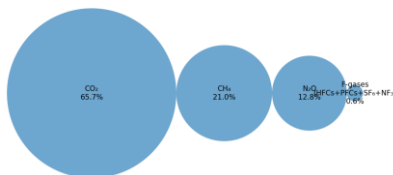


Рис.1.1. Структура викидів парникових газів України за 2021 р.. [20]

Аналіз палеокліматичних даних і сучасних вимірювань свідчить про безпрецедентне за останні сотні тисяч років зростання концентрацій CO₂, CH₄ і N₂O [5]. Супутникові та наземні спостереження міжнародних програм підтверджують як загальну тенденцію зростання їх концентрацій, так і відмінності у просторово-часових паттернах [22].

Новітні вимірювання на глобальних фонових станціях [21] (зокрема Waliguan WMO/GAW) демонструють стале зростання концентрацій CO₂, CH₄ та N₂O, а також посилення сезонної амплітуди. Аналіз джерел антропогенного метану [17; 18] визначає ключову роль сільського господарства, паливно-енергетичного комплексу та сектору відходів. Дослідження [11; 12] наголошують на необхідності швидкого скорочення глобальних викидів, насамперед у енергетичній та аграрній сферах, для обмеження подальшого наростання радіаційного примушення.

Антропогенні процеси формують переважну частку перевищення природних концентрацій парникових газів; особливо небезпечними є фторовані сполуки з глобальним потенціалом потепління, що сягатиме десятків тисяч, і тривалістю перебування в атмосфері до кількох тисяч років. У цьому контексті провідні міжнародні інституції наголошують на необхідності глибокої декарбонізації економіки, переходу на відновлювану енергетику та розвитку адаптаційних і пом'якшувальних заходів.

1.2. Сучасні підходи та міжнародні ініціативи щодо моніторингу парникових газів

У контексті глобальної зміни клімату моніторинг парникових газів – ключовий елемент екологічної політики та центральна складова сучасних

кліматичних досліджень. Сучасні тенденції демонструють перехід від фрагментарного контролю викидів до розбудови інтегрованих глобальних і регіональних систем спостереження, здатних забезпечувати високу просторово-часову роздільність та точність вимірювань. Такі системи поєднують супутникові спостереження, дані наземних станцій, результати атмосферного моделювання, що дозволяє формувати комплексне уявлення про концентрації та розподіл парникових газів в атмосфері.

Система глобального моніторингу парникових газів, яку узагальнює Міжурядова група експертів зі зміни клімату (IPCC), формує науковий фундамент сучасної кліматичної політики. В оцінювальних і спеціальних звітах Шостого циклу (AR6, 2021–2023) IPCC узагальнює результати наземних атмосферних вимірювань, супутникових спостережень, океанографічних програм, палеокліматичних реконструкцій та національних інвентаризацій викидів, що подаються в рамках UNFCCC [24, 25, 26].

У доповіді Climate Change 2021: The Physical Science Basis підкреслено визначальну роль довготривалих атмосферних спостережень, які здійснюють мережі Global Atmosphere Watch (WMO), NOAA, JMA та інші міжнародні програми. Саме вони забезпечують багаторічні ряди даних щодо концентрацій основних парникових газів (CO_2 , CH_4 , N_2O), на основі яких встановлюються тренди антропогенного впливу на кліматичну систему. За узагальненими оцінками IPCC, сучасні концентрації CO_2 зросли приблизно на 47 % відносно доіндустріальних значень, метану – на 156 %, а закису азоту – на 23 % [24].

Суттєве місце у моніторингу посідають супутникові методи, детально розглянуті в [24] та спеціалізованих документах щодо спостережень атмосфери. Дані місій OCO-2, Sentinel-5P, GOSAT, GHGSat та інших платформ дозволяють формувати високодеталізовані карти концентрацій CO_2 і CH_4 , ідентифікувати локальні джерела емісій та здійснювати інверсійне моделювання для оцінювання потоків вуглецю між атмосферою, біосферою й океаном [24,26]. З екологічної точки зору це створює підґрунтя для інтеграції просторового аналізу в національні та регіональні стратегії скорочення викидів і посилення природних поглиначів.

Важливий аналітичний блок у звітах IPCC становлять системи океанічного моніторингу. У AR6 [24] наголошується, що Світовий океан поглинає понад 25 % глобальних антропогенних викидів CO₂, а програми ARGO, GO-SHIP та SOCAT забезпечують критично важливу інформацію для оцінювання змін у вуглецевій системі океану та визначення його ролі у глобальному вуглецевому циклі [24]. Для екологічної науки такі дані є основою для прогнозування наслідків підкислення океану й трансформації морських екосистем.

Палеокліматичні дані, зокрема результати аналізу льодових кернів з Антарктиди та Гренландії, дозволяють реконструювати природні межі коливань концентрацій парникових газів у доіндустріальні періоди. У AR6 (IPCC, 2021) показано, що сучасні рівні CO₂, CH₄ і N₂O перевищують усі відомі природні значення за останні 800 тис. років, що підсилює аргументацію щодо антропогенного характеру поточних змін клімату.

У звіті Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (IPCC, 2022) [25] детально характеризується структура глобальних антропогенних джерел парникових газів. Найбільший внесок мають енергетичний сектор, промисловість, транспорт, сільське господарство та сектор землекористування, включно з лісокористуванням. Оцінки базуються на національних інвентаризаціях, підготовлених відповідно до IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) та їх оновлення 2019 Refinement (IPCC, 2006; IPCC, 2019) [27]. У IPCC Synthesis Report (2023) узагальнено ключові висновки AR6 та зазначено, що поточні рівні концентрацій CO₂ наближаються до 417 ppm, CH₄ – понад 1900 ppb, N₂O – понад 334 ppb [26]. Спеціальна доповідь Global Warming of 1.5°C (IPCC, 2018) [28] вводить поняття залишкового вуглецевого бюджету, визначаючи обсяги викидів CO₂, які ще можливі без перевищення критичних температурних порогів.

Таким чином, система глобального моніторингу парникових газів, яка узагальнюється IPCC, постає як багаторівнева інфраструктура, що включає атмосферні, супутникові, океанічні та палеокліматичні спостереження, а також стандартизовані методи інвентаризації. Вона забезпечує комплексну оцінку

сучасних змін клімату та формує науковий фундамент для екологічної політики адаптації, декарбонізації та сталого розвитку.

Міжнародна система обліку та моніторингу парникових газів, розроблена під егідою UNFCCC, є центральним механізмом оцінювання глобальної динаміки антропогенних викидів та формування кліматичної політики держав. Вона базується на принципах прозорості, порівнюваності й узгодженості методологічних підходів, що забезпечує можливість системного аналізу стану кліматичної системи та ефективності заходів зі скорочення викидів.

Ключовим елементом цього механізму є національні кадастри антропогенних викидів та абсорбції парникових газів, які держави-учасниці регулярно подають до Секретаріату UNFCCC. Такі кадастри формуються на основі уніфікованих методичних підходів IPCC, насамперед IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) [30] та 2019 Refinement [27]. База даних UNFCCC National Inventory Submissions виступає фундаментальним джерелом інформації для оцінювання національних й глобальних трендів викидів [29]. У ній акумулюються дані за секторами енергетики, промислових процесів, сільського господарства, лісового господарства та землекористування (LULUCF), відходів тощо.

Нормативну рамку для функціонування цієї системи зміцнила Паризька угода (2015 р.), яка закріпила глобальну мету стримування підвищення середньої температури на рівні значно нижче 2 °C з орієнтацією на 1,5 °C [31]. Документ передбачає розроблення та регулярне оновлення національно визначених внесків, у яких країни фіксують цільові показники скорочення викидів та заходи адаптації. Для забезпечення контролю за виконанням цих зобов'язань створено механізм прозорості дій і підтримки, що включає подання кадастрів, технічну експертизу й періодичний глобальний перегляд.

Україна, як сторона UNFCCC і Паризької угоди, здійснює подання національних комунікацій та кадастрів відповідно до міжнародних вимог. У Шостій національній комунікації України про зміну клімату наведено динаміку національних викидів, досягнення у сферах енергетики, промисловості, транспорту й землекористування, а також описано виклики, пов'язані з воєнними

діями та обмеженими можливостями моніторингу на тимчасово окупованих територіях [29]. Матеріали становлять важливу основу для формування національної кліматичної політики та планування заходів адаптації.

Моніторинг парникових газів у межах UNFCCC має велике значення для екологічної науки й практики, оскільки забезпечує емпіричну базу для верифікації кліматичних моделей, оцінювання ефективності міжнародних заходів і визначення пріоритетів сталого розвитку. Централізована система обліку й звітності також сприяє зміцненню міжнародної довіри та формуванню спільної відповідальності держав за згортання вуглецево-інтенсивних моделей розвитку.

Європейське агентство з охорони довкілля (European Environment Agency, EEA) відіграє провідну роль у систематичному моніторингу парникових газів на території Європейського Союзу. Агентство координує збір, оброблення та публікацію даних про викиди CO₂, CH₄, N₂O та інших парникових газів державами-членами ЄС, інтегруючи національні інвентаризації з супутниковими, наземними й статистичними джерелами [32].

У звіті Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2022 детально представлені часові ряди викидів за останні три десятиліття, що відображають суттєве скорочення сукупних викидів у ЄС порівняно з 1990 роком [32]. Значні зниження досягнуті передусім у секторі енергетики та промислових процесів завдяки переходу на низьковуглецеві джерела енергії, модернізації промислових технологій та впровадженню політик енергоефективності. Натомість викиди в аграрному секторі демонструють більш стабільні тенденції, а у транспорті залишаються відносно високими.

У доповіді Trends and projections in Europe 2024: Tracking progress towards climate neutrality EEA аналізує перспективи досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року [33]. Оцінки базуються на інтеграції національних політик, прогнозів розвитку енергетики та промисловості, демографічних і економічних сценаріїв. Зазначається, що, попри досягнутий прогрес, поточні темпи скорочення викидів вимагають посилення заходів у

транспортному секторі, оптимізації землекористування та більш активного розвитку відновлюваних джерел енергії.

Ключовим інструментом доступу до інформації є сервіс Greenhouse gas – data viewer, який надає можливість оперативно аналізувати дані про викиди парникових газів за країнами, секторами й роками, будувати часові ряди та проводити просторовий аналіз [33]. Завдяки високому рівню стандартизації та порівнянності даних між державами-членами ЄС, інформаційні продукти ЕЕА широко застосовуються в наукових дослідженнях, екологічному менеджменті та розробленні адаптаційних стратегій.

Таким чином, система моніторингу парникових газів, яку координує ЕЕА, формує надійну науково-аналітичну платформу для оцінювання динаміки викидів, визначення ефективності політики декарбонізації та підтримки прийняття рішень щодо досягнення кліматичної нейтральності.

Система моніторингу парникових газів, реалізована через Copernicus Climate Change Service (C3S) та Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), є одним із найсучасніших інструментів глобального екологічного спостереження. Вона базується на інтеграції супутникових даних, наземних спостережень та атмосферного моделювання для оцінювання концентрацій CO₂, CH₄, N₂O та інших парникових газів, а також аналізу їхніх джерел і поглиначів [34, 35].

У публікації Climate Indicators: Greenhouse Gases визначено ключові індикатори стану парникових газів, які відображають як глобальні тренди, так і регіональні відмінності [34]. Дані C3S поєднують результати наземних вимірювань, супутникових платформ і тривимірних атмосферних моделей, що дозволяє оцінювати просторову структуру концентрацій парникових газів у тропосфері та нижній стратосфері, відстежувати сезонні й міжрічні коливання та проводити міжрегіональні порівняння. CAMS у своєму Global greenhouse gas monitoring report подає інформацію про поточні та прогнозовані концентрації парникових газів, а також реалізує інверсійні методи оцінювання потоків парникових газів між атмосферою та поверхнею [35].

Використання систем C3S і CAMS має як наукове, так і прикладне значення. Інтегровані набори даних підтримують національні та регіональні інвентаризації, підвищують якість кліматичних моделей і забезпечують основу для оцінювання ефективності політики скорочення викидів. Для України яка розвиває власні системи моніторингу парникових газів, ці сервіси є важливими джерелами інформації про просторовий розподіл викидів, тенденції концентрацій та результативність заходів декарбонізації.

Отже, Copernicus Climate Change Service та Copernicus Atmosphere Monitoring Service формують сучасну інтегровану систему глобального моніторингу парникових газів, що поєднує багатоканальні спостереження, чисельне моделювання й інверсійний аналіз. Вони забезпечують надійну наукову основу для оцінювання стану атмосфери, прогнозування кліматичних тенденцій і розроблення політик зі скорочення антропогенних викидів.

Сучасний моніторинг парникових газів ґрунтується на інтегрованому використанні супутникових місій, наземних станцій та глобальних кліматичних центрів, що забезпечують високоточні дані про концентрації CO₂, CH₄ і N₂O у приземному шарі атмосфери. Одним із ключових елементів глобальної інфраструктури спостережень виступає європейська супутникова місія Sentinel-5P/TROPOMI, що забезпечує безперервні добові виміри газових компонентів атмосфери, включно з CO₂, CH₄, CO, NO₂ та озоном. Згідно з оновленим статус-звітом Європейського космічного агентства, місія демонструє стабільність радіометричних характеристик та забезпечує просторову роздільність до 7×3.5 км, що дозволяє ідентифікувати локальні джерела забруднення та простежувати зміни фонового атмосферного складу в регіональному масштабі [36].

Паралельно, визначальне значення мають орбітальні платформи ОСО-2 та ОСО-3, розгорнуті Національним управлінням з аеронавтики і дослідження космічного простору США. Місії здійснюють високоточні спектроскопічні вимірювання колонкового вмісту CO₂ з точністю до 0,25 %, дозволяючи формувати довгострокові ряди даних, необхідні для визначення трендів та локалізації регіональних джерел вуглецевих викидів. За даними Наукової групи ОСО-2/ОСО-3, супутники забезпечують унікальні можливості для оцінки

потоків CO₂ над міськими агломераціями, промисловими районами та природними екосистемами, що особливо важливо в контексті верифікації національних інвентаризацій та планів декарбонізації [37].

Важливим компонентом системи космічного моніторингу є також японська місія GOSAT, яка забезпечує систематичні спостереження за концентраціями CO₂ та CH₄ з 2009 року. Оновлені дані демонструють синхронізацію із західними стандартами точності та охоплюють як глобальні фонові умови, так і регіональні аномалії парникових газів над окремими континентами, включно з Європою та Східною Європою. Наукові групи JAXA підкреслюють, що саме GOSAT є ключовим джерелом для аналізу довготривалих трендів метану, зокрема у високих широтах, де відбуваються масштабні зміни в перигляціальних ландшафтах і відповідно зростає роль природних джерел CH₄ [38].

Наземний сегмент глобального моніторингу представлений Лабораторією глобального моніторингу NOAA, яка акумулює дані фонових стеження. Вимірювання NOAA забезпечують найтриваліші у світі ряди концентрацій CO₂ та CH₄, починаючи від середини XX століття. Актуальні звіти підкреслюють, що середня глобальна концентрація CO₂ у 2024 році вперше перевищила 420 ppm, тоді як метан продемонстрував одне з найшвидших зростань за останні десятиліття. NOAA є ключовим еталоном для калібрування супутникових місій ESA, NASA та JAXA, забезпечуючи необхідні контрольні значення для корекції системних похибок та формування єдиного глобального кліматичного архіву [39].

Глобальні бази даних та міжнародні дослідницькі програми є ключовим джерелом інформації для оцінювання довгострокових тенденцій викидів та концентрацій парникових газів, простежування змін у структурі антропогенних джерел, а також дослідження впливу різних секторів економіки на глобальний вуглецевий цикл. Одним із найавторитетніших джерел є Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), яка формується Європейською Комісією та містить детальні оцінки глобальних та регіональних викидів ключових парникових газів і забруднювачів атмосфери. Остання версія бази EDGAR v7.0 охоплює період до 2022 року та пропонує високу просторову деталізацію, що

забезпечує можливість точного картографування антропогенних потоків парникових газів у секторальному розрізі. Дані EDGAR активно застосовуються у моделюванні кліматичних процесів, оцінюванні національних внесків, аналізі промислових і транспортних викидів та верифікації супутникових спостережень [40].

Важливим глобальним інструментом є World Bank Climate Data API, що акумулює статистику щодо концентрацій та інтенсивності викидів CO₂, CH₄ та інших кліматичних показників для країн світу. База містить стандартизовані індикатори, які використовуються для порівняльного аналізу між державами, оцінювання рівня національних викидів на одиницю ВВП, аналізу тенденцій декарбонізації та виявлення структурних змін у глобальній економіці. Дані Світового банку демонструють стабільно зростаючу концентрацію CO₂ у поєднанні зі значною міжрегіональною нерівномірністю викидів, що відображає як різний рівень розвитку країн, так і відмінності у національних стратегіях енергетичного переходу [41, 42, 43].

Важливе значення для науки про зміну клімату має Global Carbon Project (GCP) – міжнародна дослідницька ініціатива, яка щорічно формує *Global Carbon Budget*. У звіті за 2023 рік підтверджено подальше збільшення глобальних антропогенних викидів CO₂ та фіксується рекордне зростання концентрацій унаслідок поєднання промислових, сільськогосподарських і природних факторів. Проєкт GCP об'єднує дані з атмосферних вимірювань, наземних і супутникових систем, інвентаризацій та моделей вуглецевих потоків, що дозволяє оцінювати баланс між джерелами і поглиначами вуглецю та формувати прогнози майбутніх сценаріїв емісій. Дані GCP широко використовуються в IPCC, національних кліматичних стратегіях і наукових дослідженнях у сфері глобальної екології [44].

Окреме місце в структурі міжнародного моніторингу займає Всесвітня метеорологічна організація (WMO), яка щорічно публікує *Global Greenhouse Gas Bulletin* – провідний документ щодо стану парникових газів у глобальному масштабі. У доповіді за 2023 рік зафіксовано рекордні концентрації CO₂, CH₄ і N₂O, які перевищили доіндустріальні значення у 1,5–2,5 разів. Дані WMO ґрунтуються на глобальній наземній мережі GAW, яка надає еталонні

вимірювання для всіх супутникових і модельних систем. Бюлетень визначає ключові тенденції, включно з прискоренням зростання метану в останнє десятиліття, ослабленням поглинальної здатності деяких наземних біомів та зростанням нерівномірності регіональної динаміки концентрацій парникових газів [45].

Таким чином, глобальні бази EDGAR, World Bank Climate Data API, Global Carbon Project та WMO формують цілісну систему доказового моніторингу, яка дозволяє всебічно досліджувати тенденції зміни концентрацій та викидів парникових газів, забезпечує наукову основу для міжнародних кліматичних політик і створює масштабний інформаційний ресурс для екологічних та атмосферних досліджень.

1.3. Національний вимір моніторингу парникових газів в Україні.

Система моніторингу парникових газів в Україні розгортається як цілісний комплекс інституцій, методик і інформаційних потоків, спрямованих на отримання, опрацювання та інтерпретацію даних про викиди парникових газів і пов'язані з ними атмосферні забруднювачі. Основу системи моніторингу формують взаємопов'язані блоки:

національна інвентаризація парникових газів, що реалізується у форматі щорічного Національного кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів [45].;

державний гідрометеорологічний моніторинг стану атмосферного повітря, що узагальнюється у вигляді щорічного огляду стану довкілля [46];

офіційна державна статистика викидів забруднюючих речовин та парникових газів, яку забезпечує Державна служба статистики України [47].

Скоординоване функціонування дає змогу виконувати міжнародні зобов'язання України у сфері кліматичної звітності, формувати доказову базу для кліматичної політики та планувати заходи з декарбонізації економіки.

Центральною ланкою національної системи моніторингу парникових газів виступає щорічна Національна інвентаризація парникових газів, що представлена у вигляді Національного кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів, починаючи з 1990 року [45]. Підготовку кадастру координує Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України у взаємодії зі спеціалізованими установами, з дотриманням вимог Рамкової конвенції ООН про зміну клімату та методичних настанов ІРСС.

У межах кадастру здійснюється систематичний облік викидів основних парникових газів з розподілом за секторами: енергетика, промислові процеси, сільське господарство, землекористування, зміни у землекористуванні та лісове господарство, відходи. Для кожної категорії застосовуються уніфіковані методичні підходи ІРСС, що забезпечує міжнародну порівнюваність національних даних. Розрахунки спираються на національні статистичні показники (споживання палива, виробництво вуглецевмісної продукції, тваринництва, площі земельних угідь) у поєднанні з національними та міжнародними коефіцієнтами викидів [45].

Національний кадастр виконує роль базового інструмента звітності України перед Секретаріатом РКЗК ООН, зокрема щодо виконання цілей зі скорочення викидів. Дані використовуються при розробленні Національно визначеного внеску, довгострокових стратегій низьковуглецевого розвитку, а також галузевих і регіональних програм зменшення викидів парникових газів [45, 47].

Функціонування кадастру спирається на національну систему інвентаризації антропогенних викидів парникових газів, яка визначає структуру, схеми обміну інформацією, процедури контролю якості й верифікації даних [48]. Система передбачає налагоджену взаємодію з Державною службою статистики, центральними органами виконавчої влади та суб'єктами господарювання, що подають первинну інформацію про спалювання палива, особливості технологічних процесів та інші джерела емісій.

Другим ключовим компонентом національного виміру моніторингу парникових газів є державний моніторинг стану атмосферного повітря, який

здійснюють Український гідрометеорологічний центр та Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського. На основі мережі спостережень формуються щорічні та періодичні огляди стану забруднення навколишнього природного середовища, де оцінюються рівні забруднення повітря в населених пунктах за основними хімічними домішками [46].

Хоча рутинні спостереження не завжди включають прямі вимірювання концентрацій CO_2 , CH_4 чи N_2O , інформація про вміст CO , NO_x , SO_2 та зважених частинок є важливою для інтерпретації просторово-часових закономірностей викидів парникових газів. Показники відображають інтенсивність спалювання палива в міських та промислових агломераціях, а отже опосередковано характеризують активність основних джерел викидів CO_2 та інших парникових газів. Дані гідрометеорологічної мережі використовуються як вхідні параметри для атмосферних моделей, що дозволяє оцінювати перенесення та накопичення забруднювачів у приземному шарі повітря, зокрема під час епізодів екстремального забруднення, промислових аварій, пожеж тощо [46].

Крім того, гідрометеорологічні служби формують кліматичний фон для аналізу викидів та їхнього впливу, оскільки проводять регулярні спостереження за температурою повітря, опадами, вітровим режимом та іншими метеорологічними характеристиками, що визначають умови розсіювання чи накопичення домішок в атмосфері [46]. Створюється можливість узгоджувати результати інвентаризації парникових газів з фактичними даними про стан повітря та оцінювати ризики для здоров'я населення і функціонування екосистем.

Третю складову національної системи становить офіційна державна статистика викидів забруднюючих речовин та парникових газів, яку формує Державна служба статистики України. На підставі звітності суб'єктів господарювання за спеціалізованими статистичними формами (зокрема форма № 2-ТП (повітря)) готуються статистичні збірники та бюлетені щодо викидів забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря [47].

Статистичні публікації містять інформацію про обсяги викидів від стаціонарних та пересувних джерел, розподіл емісій за видами економічної

діяльності, просторову структуру за регіонами й областями, а також дані щодо окремих пріоритетних речовин і діоксиду вуглецю [47]. Це дає змогу оцінювати внесок різних секторів економіки та територіальних одиниць у формування загальнонаціональних викидів парникових газів і забруднюючих речовин.

Методологічну основу цієї діяльності становлять затверджені методики розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів і методологічні положення щодо складання розрахунку викидів у атмосферне повітря. У зазначених документах визначено термінологію, систему показників, підходи до розрахунку викидів для різних типів джерел (стаціонарні установки, транспорт, домогосподарства), а також принципи інтеграції статистичної інформації в систему екологічних рахунків відповідно до міжнародних стандартів [48].

Статистичні дані Державної служби статистики, з одного боку, виступають самостійним інструментом моніторингу, а з іншого – служать основним інформаційним ресурсом для Національного кадастру парникових газів. Такий підхід забезпечує узгодження інвентаризаційних розрахунків з офіційною статистикою, що підвищує надійність і міжнародну порівнюваність національних оцінок.

Взаємодія цих трьох підсистем є визначальною передумовою для обґрунтування та реалізації ефективної кліматичної політики, установлення пріоритетів скорочення викидів у галузевому й територіальному вимірах та оцінювання результативності заходів з декарбонізації економіки України.

Продовжуючи характеристику національного виміру моніторингу парникових газів, доцільно розглянути результати окремих наукових досліджень, які деталізують внесок ключових секторів та просторово-кліматичні особливості викидів.

У роботі О.А. Тимощук [49] із співавторами здійснено розгорнуту оцінку ролі аграрного сектора України у формуванні сукупних національних викидів парникових газів за період 1990–2020 рр. Аналіз ґрунтується на даних Національного кадастру парникових газів та підходах ІРСС, зосереджених на трьох основних газах – CH_4 , N_2O і CO_2 , що утворюються переважно внаслідок

діяльності тваринницької та рослинницької підгалузей. Показано, що частка сільського господарства у загальному обсязі викидів парникових газів впродовж усього досліджуваного періоду залишалася істотною (близько 9–14 %), попри загальне зниження викидів в економіці, що свідчить про стійку вагомість цього сектора в національному вуглецевому балансі. У тваринництві основними джерелами емісій є процеси ентеричної ферментації жуйних тварин і системи поводження з гноєм, причому вирішальну частку становлять викиди від кишкової ферментації великої рогатої худоби. За оцінками авторів, на цю категорію протягом 1990–2020 рр. припадало орієнтовно 80–85 % сукупних викидів парникових газів від тваринництва, а до 2020 р. її внесок зменшився до приблизно 79,3 %. Така еволюція пов'язана як зі скороченням поголів'я великої рогатої худоби у 1990–2000-х роках, так і з подальшою відносною стабілізацією та трансформацією структури стада у пізніший період.

Для рослинницької підгалузі ключову роль відіграє оксид азоту (N_2O), емісія якого визначається насамперед обсягами внесення мінеральних і органічних добрив, застосуванням вапнувальних матеріалів, кількістю рослинних решток, що залишаються на полі, та площею органічних ґрунтів, залучених у сільськогосподарський обіг. У динаміці N_2O автори виокремлюють два контрастні періоди: різке падіння викидів більш ніж на 60 % до початку 2000-х років, пов'язане з кризовим скороченням інтенсивності землеробства у 1990-х, та подальше поступове зростання на тлі відновлення використання добрив і поширення інтенсивних технологій вирощування культур. Найбільший внесок у формування викидів N_2O мають саме азотні мінеральні добрива та залишки польових культур, що створюють основні потоки цього газу з орних земель.

Важливим елементом дослідження є приклад оцінювання поглинання парникових газів земельними угіддями на рівні окремої територіальної громади (Тернопільська МТГ), де для 2020 р. отримано значення близько 1070 т CO_2 . Цей підхід демонструє можливість кількісного опису локального балансу «викиди – поглинання» та підкреслює роль землекористування як інструмента часткового компенсування аграрних викидів. Робота відображає довготривалі тенденції й структурні зрушення в аграрних викидах, окреслює ключові чинники їхньої

динаміки та задає рамку для оцінювання потенціалу скорочення емісій шляхом зміни технологій і практик ведення сільського господарства.

Інша група досліджень зосереджена на атмосферно-кліматичній відповіді на зростання концентрацій парникових газів. У статті Лялько В.І. [50] зі співавторами проаналізовано зміни вмісту CO₂ над територією України та їхній зв'язок із температурним режимом повітря. Для цього використано дані дистанційного зондування атмосфери зі супутникових приладів ENVISAT/SCIAMACHY (2003–2011 рр.) та GOSAT (2010–2012 рр.), які надають оцінки колонної концентрації CO₂, у поєднанні з наземними метеорологічними спостереженнями температури. Отримані результати свідчать про наявність прямої кореляційної залежності: збільшення концентрації CO₂ супроводжується статистично значущим підвищенням температури. Залежність дозволяє авторам стверджувати, що знання тренду одного з параметрів може бути використане для орієнтовного прогнозування поведінки іншого, за умови збереження характеру взаємозв'язку.

Робота водночас демонструє переваги інтеграції супутникової інформації та наземних спостережень для регіонального аналізу кліматичної системи. Залучення даних двох супутникових місій (SCIAMACHY та GOSAT) дає змогу побудувати більш надійні часові ряди та простежити еволюцію концентрацій CO₂ над Україною на фоні глобальних змін. Виявлені взаємозв'язки можуть використовуватися для підвищення якості регіональних кліматичних оцінок та для верифікації результатів чисельного моделювання клімату і викидів парникових газів.

У ширшому контексті комплексна праця В.І. Лялько [51] виконує функцію узагальнювальної теоретико-методологічної основи, де послідовно розглянуто фізичні засади парникового ефекту, глобальні тренди потепління, регіональні особливості сучасних кліматичних змін в Україні, а також можливі сценарії їхнього подальшого розвитку й наслідки для природного середовища та суспільства. На основі поєднання супутникових і наземних даних фіксується стійке зростання середньорічної температури повітря, модифікація режиму опадів, збільшення частоти й інтенсивності екстремальних погодних явищ.

Просторовий аналіз вказує на більш виражене потепління у континентальних і південних регіонах порівняно з північними, що має важливе значення для оцінки регіональних ризиків. Особливу увагу приділено наслідкам для водних ресурсів, аграрного виробництва, стану біорізноманіття та здоров'я населення, із виокремленням прямих (теплові хвилі, посухи, повені) та опосередкованих ефектів (зміна продуктивності агроєкосистем, поширення шкідливих організмів і хвороб, деградація природних екосистем). У такий спосіб робота задає концептуальні рамки для подальших регіональних та секторальних досліджень парникових газів і кліматичних змін в Україні.

Регіональний зріз проблеми емісій CO₂ від стаціонарних джерел розкрито у дослідженні Р.А. Валерко [52] Житомирської області. Інформаційною основою були регіональні статистичні дані Держстату щодо викидів від промислових та енергетичних об'єктів за 2005–2021 рр. Для аналізу динаміки застосовано регресійні моделі та їх порівняння за якістю апроксимації й величиною похибок. Показано, що загальний тренд викидів CO₂ від стаціонарних джерел має здебільшого спадний характер на тлі деіндустріалізації та змін в енергетичному секторі, однак на часовому ряді помітні інтервали стабілізації чи локального зростання, пов'язані зі структурною перебудовою економічної діяльності. Диференційований аналіз за адміністративно-територіальними одиницями дозволив виділити території з підвищеним рівнем викидів («гарячі точки») та ідентифікувати провідні галузі – джерела CO₂. Побудовані моделі дали змогу сформулювати коротко- та середньострокові прогнози викидів і окреслити потенціал їх подальшого зменшення за умови реалізації заходів енергоефективності та модернізації промислових підприємств.

Сектор нафтогазової та вугільної промисловості розглянуто у серії робіт І. Лещенко [53,54] та Г. Кривенко [55]. У статті І. Leshchenko аналізується стан оцінювання викидів метану в нафтогазовій галузі України та його відповідність сучасним міжнародним практикам. Використовуючи дані Національного кадастру парникових газів та корпоративну звітність групи «Нафтогаз України» показано, що нафтогазовий комплекс є одним із ключових джерел метану, при цьому наявні оцінки характеризуються високою невизначеністю. Деталізовано

внесок окремих ланок ланцюга «видобуток – підготовка – транспортування – розподіл», включно з витоками з обладнання, аварійними викидами, вентиляційними потоками та факельними операціями. Зроблено висновок, що орієнтація переважно на спрощені коефіцієнти викидів (Tier 1) може спричиняти систематичне заниження реальних обсягів емісій. На цьому тлі обґрунтовується доцільність переходу до більш деталізованих рівнів IPCC (Tier 2–3), активного впровадження інструментальних вимірювань, програм з виявлення й усунення витоків (LDAR), використання супутникового моніторингу та посилення прозорості корпоративної звітності.

В роботі І. Лещенко [54] оцінює потенціал зниження викидів парникових газів у вугільному секторі України. Спираючись на дані Національного кадастру, показано, що вугільна промисловість є другим за величиною джерелом метану в країні після нафтогазового сектора, причому у 2019 р. її частка становила близько 17,8 % загальнонаціональних викидів CH_4 . Проаналізовано основні категорії джерел – дегазаційні системи діючих шахт, вентиляційні викиди, емісії з відпрацьованих шахт, а також пов'язані з вугіллям CO_2 -викиди. На основі цього запропоновано низку сценаріїв скорочення емісій з урахуванням реструктуризації галузі, закриття збиткових шахт, впровадження технологій уловлювання та утилізації шахтного метану для енергетичних потреб або його подачі в газотранспортні мережі. Розрахунки демонструють, що поєднання структурних змін у галузі з активним використанням шахтного метану може істотно зменшити викиди парникових газів і зробити помітний внесок у досягнення цілей Національно визначеного внеску України.

Стаття Г.М. Кривенко [55] доповнює галузевий аналіз прикладом на рівні окремого підприємства нафтогазового комплексу. На основі розрахунків за методиками IPCC та національними нормативами реконструйовано структуру викидів парникових газів за видами технологічних процесів, виділяючи серед головних джерел енергоустановки (котельні, турбіни), технологічні печі, факельні установки, а також витoki з трубопроводів та обладнання. Отримані оцінки річних викидів у перерахунку на CO_2 -еквівалент демонструють значний внесок низькоефективного спалювання газу і факельних операцій, тоді як

масштаб витоків метану потенційно недооцінюється через обмежені можливості їхнього інструментального контролю. Запропоновано комплекс технічних заходів зі зменшення викидів, зокрема модернізацію паливоспалювального обладнання, впровадження енергоощадних рішень, скорочення обсягів факельного спалювання, розбудову систем LDAR та оптимізацію технологічних режимів. Таким чином, робота ілюструє типову конфігурацію викидів парникових газів на об'єктах нафтогазової галузі та підкреслює важливість технологічної модернізації для їх декарбонізації.

У сукупності проаналізовані джерела окреслюють багаторівневий науковий підхід до вивчення парникових газів в Україні: від секторних і локальних оцінок емісій до аналізу атмосферних концентрацій і кліматичної відповіді, що створює цілісну основу для формування та обґрунтування національної кліматичної політики.

В розділі сформовано структуру джерельної бази, яка використовується для аналізу концентрацій і викидів парникових газів та інтерпретації просторово-часових тенденцій. Джерела згруповано за рівнем і призначенням: офіційні міжнародні ініціативи та звіти (узгоджені методології, інвентаризації, оцінки й індикатори), супутникові місії та пов'язані бази даних (спостереження з орбіти й наукові публікації команд місій), глобальні бази даних і програми (уніфіковані набори даних та узагальнюючі оцінки), а також українські офіційні джерела (національна звітність і статистика, фахові публікації). Така класифікація забезпечує порівняння даних, можливо простежити походження показників і можливість перехресної верифікації результатів між міжнародними та національними інформаційними системами.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА АНАЛІТИЧНІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методи обробки та візуалізації атмосферної інформації

Оцінювання просторового розподілу парникових газів у дослідженнях базується на підході, що поєднує супутникові спостереження, модельні реаналізи та наземні вимірювання. Інтеграція різнорідних джерел інформації є загальноприйнятою у сучасних кліматичних і екологічних дослідженнях, оскільки дозволяє підвищити просторову деталізацію аналізу, зменшити невизначеність результатів та забезпечити валідацію дистанційних продуктів за незалежними спостереженнями.

Ключовим супутниковим джерелом даних є платформа Sentinel-5P з інструментом TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), який забезпечує щоденні глобальні спостереження за колонковими концентраціями метану, чадного газу, діоксиду азоту, озону та інших атмосферних компонентів. Просторова роздільність даних після 2022 року становить до 5×5 км, що робить цей інструмент особливо ефективним для виявлення локальних і регіональних джерел викидів. Для території України дані TROPOMI є надзвичайно важливими з огляду на наявність промислових агломерацій, об'єктів енергетики, сільськогосподарських угідь та полігонів твердих побутових відходів.

Допоміжну інформацію для аналізу поверхневих і метеорологічних чинників надають супутникові сенсори MODIS (платформи Terra/Aqua), продукти яких використовуються для отримання температури земної поверхні, характеристик хмарності, оптичної товщини аерозолів та індексів рослинності. Залучення даних MODIS дозволяє досліджувати взаємозв'язки між концентраціями парникових газів і кліматичними та біофізичними умовами підстильної поверхні, що є важливим для інтерпретації просторових аномалій.

Для високоточного визначення колонкової концентрації вуглекислого газу використовуються дані супутникових місій OCO-2 та OCO-3 (NASA), які розглядаються як глобальний еталон для калібрування та валідації інших супутникових продуктів. Завдяки високій спектральній роздільності місії широко застосовуються у глобальних та регіональних дослідженнях вуглецевого циклу.

Для аналізу просторово-часової динаміки парникових газів у дослідженнях використовуються дані Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), які представлені у вигляді глобальних реаналізів концентрацій CO₂, CH₄ та N₂O з просторовою роздільністю 0,25°. Продукти CAMS поєднують супутникові спостереження з чисельним атмосферним моделюванням, що дозволяє аналізувати не лише поля концентрацій, але й процеси атмосферного перенесення, циркуляції та формування регіональних фонів парникових газів.

Метеорологічні умови враховуються на основі глобального реаналізу ERA5 Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), який надає високодеталізовані дані про температуру повітря, атмосферний тиск, відносну вологість та швидкість вітру. Залучення ERA5 дозволяє встановлювати зв'язки між погодними чинниками та просторовим розподілом парникових газів, а також враховувати вплив атмосферної циркуляції на результати супутникових спостережень.

Валідація супутникових даних у межах дослідження здійснюється з використанням наземних спостережень мережі Global Atmosphere Watch (GAW) Всесвітньої метеорологічної організації, яка забезпечує високоточні еталонні вимірювання концентрацій CO₂ та CH₄. Дані GAW широко застосовуються для оцінювання достовірності супутникових продуктів і модельних реаналізів.

Додатково використовуються дані національних пунктів спостереження Українського гідрометеорологічного центру, а також, за наявності доступу, вимірювання дослідницьких станцій ICOS (Integrated Carbon Observation System). Залучення цих джерел дозволяє здійснити регіональну валідацію супутникових оцінок та підвищити надійність результатів аналізу просторового розподілу парникових газів над територією України.

Методичний інструментарій обробки атмосферних даних у дослідженні просторового розподілу парникових газів формується на перетині геоінформаційних технологій, статистичного аналізу часових рядів та інструментів програмної обробки масивів дистанційного зондування. Такий підхід є типовим для сучасних робіт із використанням даних Sentinel-5P/TROPOMI, модельних реаналізів та наземної валідації, де важливо забезпечити відтворюваність процедур та контроль якості на кожному етапі аналітичного ланцюжка.

Геоінформаційні системи (ArcGIS Pro, QGIS) застосовуються для первинної просторової організації супутникових та модельних полів, побудови карт середніх значень і аномалій, а також виконання просторових операцій буферизації, накладання, класифікації та кластеризації. Для формування регулярної сітки та інтерполяційного відновлення полів із пропусками використовуються стандартні алгоритми IDW та Kriging, реалізовані в модулях обробки QGIS і ArcGIS.

Застосування інтерполяційних процедур до атмосферних даних обґрунтоване тим, що супутникові продукти колонкових концентрацій часто містять нерівномірне покриття через хмарність і відбракування за якістю. Порівняльні дослідження показують, що вибір методу інтерполяції може суттєво впливати на реконструкцію просторових градієнтів CO₂; оцінювання продуктивності IDW та Ordinary Kriging для атмосферного CO₂ використовується як стандартна процедура контролю якості картографічних реконструкцій [57].

Програмна обробка супутникових і модельних масивів забезпечує масштабованість і відтворюваність аналізу, зокрема під час роботи з багатовимірними даними у форматах NetCDF/HDF5. У Python ключовою є парадигма «помічених» багатовимірних масивів, реалізована у бібліотеці xarray, яка надає типові операції агрегування за координатами простір–час та зручний доступ до метаданих [58]. Для читання/запису геопросторових растрових форматів (GeoTIFF та ін.) використовується rasterio.

В екологічних і кліматичних дослідженнях, що потребують поєднання растрових полів із векторними межами, стандартом де-факто в R є пакет sf

(робота з просторовими векторними даними), а також terra для ефективних операцій із растрами великого обсягу. Узгодженість підходів до підготовки таблиць і статистичних моделей підсилюється використанням екосистеми tidyverse, що пришвидшує формування відтворюваних робочих процесів у магістерських дослідженнях екологічного спрямування.

Google Earth Engine застосовується як хмарна платформа для оперативного доступу до великих супутникових архівів та виконання обчислень без локального зберігання багатогігабайтних даних. Концептуальна основа GEE як планетарної платформи аналізу геоданих описана у роботі Gorelick та ін. [59]. Для дослідження метану найзручнішими є каталогізовані колекції Sentinel-5P/TROPOMI у GEE, зокрема продукти CH_4 із вбудованим шаром qa_value для фільтрації якості [60].

Методологічно важливими для побудови карт і часових рядів у GEE є операції агрегації (reducers), які дозволяють обчислювати статистики по територіях (наприклад, середні значення по Україні або по областях) та формувати сезонні композиції [62]. Такий підхід широко застосовується в прикладних роботах з аналізу XCH_4 за даними TROPOMI із виявленням регіональних максимумів та сезонних відмінностей [61].

Валідація є критичною умовою достовірності картографічних оцінок, оскільки супутникові продукти колонкових концентрацій залежать від умов освітлення, хмарності, аерозольного навантаження та властивостей підстильної поверхні. Еталонним підходом є зіставлення супутникових $\text{XCO}_2/\text{XCH}_4$ із високоточними наземними вимірюваннями мережі TCCON та/або стандартизованих програм глобального спостереження, що забезпечують калібровані ряди. Підходи до валідації OCO-2 за TCCON докладно описано у методичних роботах [63], тоді як для TROPOMI метану існують окремі публікації щодо удосконалення продукту та його порівняння з TCCON і GOSAT [64].

Для забезпечення просторово-часового зіставлення використовується колокація за принципом «вікна» (наприклад, ± 1 доба та радіус/площа колокації відповідно до роздільності продукту). Додатково оцінюється стабільність зміщення у часі та вплив відбракування за qa_value. Якісні вимоги до вимірювань

CO₂/CH₄/N₂O, а також рекомендації щодо розміщення станцій і метрологічного забезпечення наведені в настановах WMO/GAW [65].

2.2. Статистичні методи аналізу просторових даних.

Статистичний блок дослідження спрямований на кількісне описання трендів, сезонності, просторової структури та зв'язків концентрацій парникових газів із природними й антропогенними чинниками. Особливістю супутникових рядів є нерівномірність просторово-часового покриття, наявність пропусків через хмарність, неоднорідність похибок у різних умовах спостереження та потенційна залежність помилок від поверхневих характеристик. Тому методи статистичного аналізу підбираються так, щоб забезпечити відтворюваність результатів, їхню інтерпретованість та коректність висновків за умов неповних і «шумних» даних.

У дослідженнях поєднуються параметричні та непараметричні підходи. Параметричні методи (лінійна регресія, кореляційні моделі) застосовуються для отримання кількісних оцінок темпів зміни, для побудови регресійних залежностей і прогнозних оцінок, а також для порівняння регіонів за інтенсивністю процесів. Непараметричні критерії використовуються як стійкі альтернативи при порушенні припущень нормальності, а також у випадку автокорельованих сезонних рядів. Для підвищення надійності оцінок додатково контролюється вплив викидів та перевіряється чутливість висновків до вибору часової агрегації (добова/місячна/сезонна).

Важливим компонентом є узгодження часових рядів із просторовою структурою даних: при аналізі по областях/кластерах використовуються агреговані значення (середні або медіанні), тоді як для картографічних продуктів застосовується аналіз регулярної сітки з подальшим порівнянням між регіонами. Таким чином, статистичний блок забезпечує перехід від «сирих» супутникових вимірювань до узагальнених висновків щодо закономірностей просторового розподілу й динаміки концентрацій парникових газів.

Кореляційний аналіз використовується для виявлення статистичних зв'язків між концентраціями парникових газів та метеорологічними й ландшафтними змінними (температурою, вологістю, швидкістю вітру), а також ознаками антропогенного навантаження (ступінь урбанізації, промислові вузли, інтенсивність агровикористання). У роботах із TROPOMI-даними застосування кореляцій та багатофакторних зіставлень є типовим для пояснення просторових моделей XCH_4 , розмежування природних і антропогенних драйверів та інтерпретації сезонних максимумів [61].

Методично кореляційний аналіз виконується на узгоджених наборах даних, де забезпечено однакову часову дискретність (наприклад, середні за місяць) та просторову підтримку (комірки сітки або адміністративні одиниці). Для уникнення хибних висновків, пов'язаних із «масштабним ефектом», порівняння проводиться як на рівні всієї території країни, так і для окремих регіонів/кластерів, що дозволяє виявити просторову неоднорідність зв'язків.

Статистична значущість оцінюється за p-value для відповідних коефіцієнтів (Pearson/Spearman) з урахуванням обсягу вибірки, пропусків і потенційної автокореляції. Для даних, що не відповідають припущенню нормальності або містять асиметричні розподіли, перевага надається ранговим коефіцієнтам (Spearman). За потреби застосовується часткова кореляція або регресійні моделі з контролем впливу сезонності чи температури під час оцінки зв'язку між XCH_4 та агровикористанням. Окремо розглядається вплив затримок у часі, коли концентрації можуть реагувати на метеорологічні фактори з певним часовим зсувом; у таких випадках аналізуються кореляції з часовими розривами ($\pm 1-2$ місяці) для сезонно узагальнених рядів.

Для оцінювання довгострокових змін застосовується лінійна регресія з оцінкою нахилу тренду та довірчих інтервалів. Практично тренд оцінюється для всієї території країни, для адміністративних одиниць, для «епіцентрів» підвищених значень. Такий підхід дозволяє порівнювати швидкість змін між регіонами та встановлювати, чи є тренд загальнонаціональним, чи формально зумовлюється окремими зонами підвищених концентрацій. Додатково аналізуються сезонні тренди окремо для холодного і теплого періодів року,

оскільки інтенсивність джерел і атмосферні умови перенесення можуть суттєво відрізнятися.

Додатково у трендовому аналізі важливо враховувати потенційну автокореляцію залишків та нерівномірність дисперсії, що може впливати на оцінки значущості. У таких випадках результати параметричної регресії інтерпретуються разом із непараметричними тестами, а також із аналізом стабільності тренду при зміні базового періоду та правил фільтрації.

Просторові інтерполяції застосовуються для реконструкції полів концентрацій із розріджених або фрагментованих вимірювань. Необхідність цього етапу зумовлена тим, що супутникові карти колонкових концентрацій часто мають «дірки» через хмарність, сніговий покрив, а також через фільтрацію за якістю. Інтерполяція дозволяє отримати суцільні картографічні поля для подальшого порівняння регіонів і розрахунку площ зон із підвищеними значеннями.

IDW (Inverse Distance Weighting) ефективний за відносно рівномірного покриття і добре працює як швидкий метод згладжування. Водночас Ordinary/Universal Kriging дозволяє явно враховувати просторову автокореляцію через варіограму та отримувати оцінку невизначеності інтерпольованих значень. Kriging є доцільним для просторово корельованих величин, де існує структурована мінливість, а Universal Kriging додатково враховує наявність великомасштабного тренду (наприклад, фонового градієнта концентрації).

Методологічна доцільність порівняння кількох інтерполяційних підходів для атмосферного CO₂ показана в роботах, де оцінюють похибки різних методів, проводять перехресну валідацію та відбирають оптимальну схему для картографування [57]. У межах даного дослідження вибір інтерполяції пов'язується з густотою валідних спостережень, рівнем просторової неоднорідності, метою карти (виявлення локальних максимумів чи відтворення фону). Для контролю якості інтерпольованих поверхонь застосовується порівняння статистик вихідного та відновленого полів, а також аналіз можливої втрати локальних максимумів у районах інтенсивних джерел.

Окремою задачею є оцінка невизначеності, пов'язаної з інтерполяціями та агрегаціями. Для інтерпольованих поверхонь невизначеність зростає в областях із низькою щільністю валідних спостережень, тому результати картографування доцільно супроводжувати інформацією про покриття/кількість валідних пікселів. Для підсилення обґрунтованості висновків можливе використання перехресної валідації: частина спостережень вилучається, поверхня відновлюється, після чого похибка оцінюється за незалежною підвибіркою. Такий підхід дозволяє відокремити похибки вимірювання від похибок відновлення просторового поля.

2.3. Методика оцінювання потенціалу глобального потепління

Потенціал глобального потепління (Global Warming Potential, GWP) базова метрика сучасної кліматичної науки, яка використовується для порівняння впливу різних парникових газів на радіаційний баланс та температуру поверхні Землі [5]. Показник GWP інтегрує у часі тепловий вплив певного парникового газу в порівнянні з еквівалентною масою вуглекислого газу у заданому часовому проміжку.

У шостій доповіді IPCC (AR6) GWP залишається основною метрикою для міждержавних порівнянь викидів і формування кліматичної політики, хоча водночас активно обговорюється його обмеження та доцільність використання альтернативних показників [5; 70; 71]. Низка сучасних робіт (Allen та ін. [66], Cain та ін. [67], Lynch та ін. [68]) показує, що класичне застосування GWP_{100} може призводити до викривлення оцінки впливу короткоживучих кліматичних забруднювачів.

Радіаційна ефективність визначає, наскільки зміна концентрації певного газу призводить до зміни радіаційного впливу та додаткового нагрівання кліматичної системи. У рамках IPCC AR6 радіаційні ефективності для основних парникових газів та широкої групи галогенвмісних сполук були оновлені з урахуванням нових спектроскопічних та кліматичних даних [5]. Комплексний огляд для фторвмісних газів наведено в роботі Hodnebrog та ін., в якій детально переглянуто радіаційні ефективності та значення GWP для 127 галогенвмісних

сполук [72]. Дослідження є важливою основою для актуалізації значень GWP, що використовуються в інвентаризаціях та моделюванні.

Атмосферний час життя газу відображає тривалість перебування молекул у атмосфері до їхнього видалення хімічними реакціями. Для метану характерний час життя близько 12 років, тоді як для CO₂ він становить від десятиліть до тисячоліть, а для окремих фторованих газів може перевищувати декілька тисяч років [5; 72]. Поєднання високої радіаційної ефективності та тривалого часу життя зумовлює надзвичайно великі значення GWP для таких газів, як SF₆ та NF₃ [72].

GWP визначається як відношення інтегрального радіаційного впливу від одиничного імпульсного викиду газу до аналогічного впливу від такого ж викиду CO₂ за певний часовий період (20, 100 або 500 років) [5]. У практиці міжнародної звітності домінує часовий період 100 років (GWP₁₀₀), який обрано як компроміс між короткостроковими та довгостроковими впливами.

Водночас низка робіт показує, що для короткоживучих забруднювачів, використання фіксованого GWP₁₀₀ може суттєво спотворювати реальний внесок у потепління у найближчі десятиліття [66; 67; 69]. Cain та ін. [67] пропонують концепцію «потепління-еквівалентні викиди», що є розвитком GWP та дозволяє краще пов'язати викиди короткоживучих кліматичних забруднювачів із траєкторією температури.

Balcombe [69] та ін. на прикладі метану показали, що вибір як типу глобального потенціалу потепління і часового періоду суттєво змінює оцінку кліматичного впливу різних технологій і навіть змінює порядок їхньої пріоритетності. Використання періоду 20 років підсилює роль метану, тоді як GWP₁₀₀ більше відображає довгостроковий вплив CO₂. Розбіжності створюють невідповідність між науковою коректністю, політичною зручністю й результатами прикладної оцінки, що стимулює пошук альтернативних показників.

IPCC у доповіді AR6 систематизує значення GWP для парникових газів, включно з оновленими оцінками для галогеновмісних сполук на основі наукової роботи Hodnebrog та ін. [72]. З огляду на розвиток знань про спектральні

властивості газів і атмосферні перетворення, значення GWP час від часу переглядаються, що важливо враховувати під час порівняння історичних рядів викидів.

UNFCCC вимагає від сторін Конвенції звітування про викиди та поглинання парникових газів із використанням значень GWP, рекомендованих IPCC для відповідного звітного циклу [8]. У практиці країн відбувається поступовий перехід від значень GWP з AR4 до AR5/AR6, що фіксується у національних інвентаризаційних звітах та технічних оглядах [5; 20].

Україна у Національному інвентаризаційному звіті за 1990–2023 рр. застосовує значення GWP, погоджені в рамках IPCC, для перерахунку викидів усіх газів у CO₂-еквівалент [20]. У звіті висвітлюється структура викидів CO₂-eq за секторами та газами, що дозволяє оцінювати внесок метану, нітроген(I) оксиду та фторованих газів у загальний кліматичний вплив економіки.

Зміни у значеннях GWP, зокрема для метану та галогенвмісних газів, можуть призводити до суттєвих корекцій у довгострокових статистичних рядах викидів CO₂-eq. Розбіжності показників ускладнюють порівняння даних між звітними циклами й потребує чіткої документації методологічних змін у національних звітах [20; 72].

За даними IPCC AR6 для GWP₁₀₀ прийнято такі орієнтовні значення: CO₂ – 1, CH₄ – 27–30 (залежно від урахування непрямих ефектів), N₂O – близько 273 [5]. Відповідно одиничний викид метану має у десятки разів більший інтегральний кліматичний вплив, але діє коротший проміжок часу ніж еквівалентний за масою викид CO₂. Valcombe та ін. [69] показують, що для окремих застосувань (наприклад, порівняння природного газу з альтернативними видами палива) використання різних метрик та часових періодів для метану може радикально змінити висновки щодо кліматичної переваги того чи іншого варіанту.

Фторовані гази (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃) характеризуються надзвичайно високими значеннями GWP (тисячі або десятки тисяч у перерахунку на CO₂-eq), що зумовлено поєднанням сильної радіаційної ефективності та дуже тривалого часу життя [5]. Hodebrog та ін. [72] показали, що сумарний радіаційний примус

від галогенвмісних газів становить суттєву частку сучасного антропогенного впливу, хоча їхні концентрації у атмосфері є відносно невеликими.

Величина GWP газу визначається поєднанням характеристик) спектральних властивостей (діапазонів поглинання ІЧ-випромінювання), часу атмосферного життя, непрямих ефектів (взаємодія з іншими компонентами атмосфери). У роботі Zhang та ін. [76] показано, як управління використанням азотних добрив у рисових агросистемах впливає на сумарний GWP і інтенсивність парникових газів, включно з внеском CH_4 і N_2O . Bong та ін. [75]. продемонстрували, що для систем компостування органічних відходів основний вклад у GWP формують саме прямі викиди парникових газів під час процесу компостування, тоді як інші етапи життєвого циклу мають менший вплив.

Короткоживучі кліматичні забруднювачі мають відносно короткі часи життя, але значний миттєвий кліматичний та медико-санітарний вплив. Mathew та ін. [73] пов'язують скорочення викидів короткоживучих кліматичних забруднювачів зі зменшенням глобального потепління, з покращенням якості повітря, зниженням передчасної смертності та підвищенням продовольчої безпеки. Результати підсилюють аргументацію на користь розширення системи показників за межі «класичного» GWP_{100} для урахування комплексних екологічних і соціальних ефектів.

Викиди парникових газів, виражені в CO_2 -еквіваленті, розраховуються як добуток маси викиду конкретного газу на його GWP за обраний часовий період. Такий підхід дозволяє агрегувати викиди різних газів у єдину шкалу, що використовується як у національній статистиці, так і в системах ціноутворення на вуглецеві викиди. У системах торгівлі викидами та при оцінці технологій у рамках аналізу життєвого циклу GWP є стандартним показником для вираження кліматичного впливу різних процесів. Bong та ін. [75] застосували GWP для порівняння різних варіантів компостування й показали, що модернізація технології (зміна аерації, використання структурних добавок тощо) може суттєво зменшити загальний GWP системи управління органічними відходами. Zhang та ін. [76]. використовують GWP та інтенсивність парникових газів для оцінки ефективності інтегрованих систем управління ґрунтом і посівами в рисових

агросистемах, демонструючи можливість досягнення високих урожаїв при зниженому кліматичному впливі

Розрахунок викидів у CO₂-еквіваленті на основі GWP є стандартною практикою в глобальних та національних сценаріях декарбонізації. У цьому контексті роботи [66-68] показують, що при аналізі траєкторій, сумісних із цілями Паризької угоди, використання лише GWP₁₀₀ може недооцінювати важливість швидкого скорочення метану, як представника короткоживучих парникових газів. Застосування GWP* та концепції «потепління-еквівалентні викиди» дозволяє краще поєднати планування скорочень CO₂ і CH₄ у спільну «температурну» рамку.

Hörtenhuber та ін. [74] на прикладі тваринницького сектору Австрії показали, що оцінка продуктів тваринного походження за GWP₁₀₀ та за GWP* дає принципово різні висновки щодо їхнього внеску у потепління. При застосуванні GWP* продукти з високими поточними викидами метану можуть мати нижчий довгостроковий вплив, якщо потоки викидів стабілізуються або зменшуються. Megill та ін. [70] демонструють, що для авіації стандартний GWP погано відображає реальний кліматичний вплив, тому що значну роль відіграють водяна пара, сліди конденсації, NO_x. Натомість метрики на основі середньої температурної відповіді (ATR) або «ефективності-зваженого» GWP (EGWP) можуть бути більш інформативними. У сукупності це підкреслює, що критичними є не лише самі значення GWP, а й вибір метрики та часового горизонту для конкретного сектора.

GWP є відносно простим та зручним показником, але має низку суттєвих обмежень. Allen та ін. [66] показали, що використання традиційного GWP₁₀₀ для перетворення викидів короткоживучих парникових газів у CO₂-еквівалент може серйозно викривлювати зв'язок між звітними викидами та фактичним температурним ефектом. Cain та ін. [67] запропонували підхід «потепління-еквівалентні викиди», який дозволяє будувати траєкторії потепління на основі комбінованих викидів CO₂ та короткоживучих парникових газів, що є розвитком ідеї GWP*. Lynch та ін. [68] на низці простих сценаріїв викидів показали, що GWP* краще узгоджується з реальною температурною відповіддю системи на

викиди метану, ніж GWP_{100} , оскільки враховує зміни темпів викидів, а не лише їхнє інтегральне значення.

Серед основних недоліків GWP можна виокремити інтегральний характер, залежність від часового горизонту, відносний характер. GWP «усереднює» вплив викиду за обраний період, не відображаючи конкретну часову траєкторію температури. Різні значення GWP_{20} і GWP_{100} можуть призводити до протилежних висновків щодо пріоритетів політики, особливо для метану [69]. GWP завжди визначається відносно CO_2 , тоді як альтернативні метрики (AGWP, AGTP) дозволяють оцінювати абсолютні зміни радіаційного примусу та температури [71].

Balcombe та ін. [69] критикують сліпе застосування GWP_{100} у технічних оцінках, показуючи, що воно може як переоцінювати, так і недооцінювати доцільність окремих технологічних рішень залежно від горизонту аналізу й структури викидів.

В таблиці 2.1 представлено інші показники, які розвиваються паралельно з GWP. Вибір метрики (GWP, GWP^* , GTP, ATR тощо) суттєво впливає на розподіл відповідальності за викиди між секторами та країнами, а отже, є не лише науковим, а й політичним рішенням. Для короткоживучих газів доцільно розглядати не лише величину потоку викидів, а й зміну цього потоку у часі. У GWP^* сталі викиди метану приблизно відповідають «нульовому» додатковому потепління, тоді як збільшення чи зменшення викидів прямо транслюється у додаткове нагрівання або охолодження.

В таблиці 2.2 наведено показники для парникових газів відповідно до IPCC AR6. Для CO_2 показники співпадають з IPCC AR5, для CH_4 та N_2O оновлено. Для галогенвмісних сполук наведено оцінені часи життя та радіаційні ефективності, а також врахуванням непрямих внесків в порівнянні з AR5. Для метану додатково враховують джерело походження. Метан з викопного вуглецю має *трохи вищі* значення, ніж метан невикопного походження. Також у таблиці подано загальні невизначеності показників, пов'язані з невизначеністю радіаційної ефективності, часом життя та кліматичною реакцією.

Альтернативні показники для викидів парникових газів

GTP	Global Temperature-change Potential	оцінює зміну температури у певний момент часу внаслідок імпульсного викиду
GWP*	Global Warming Potential	що поєднує інтегральні властивості GWP з урахуванням змін потоку викидів і дозволяє описувати короткоживучі парникові гази в рамках підходу «потепління-еквівалентні викиди» [67; 68]
ATR	Average Temperature Response	Megill та ін. пропонують як більш адекватні для оцінки авіаційних неCO ₂ -ефектів [70]
EGWP	Efficacy-weighted Global Warming Potential	
AGWP	Absolute Global Warming Potential	Zieger та ін. застосовують як динамічні метрики, що дозволяють краще поєднати оновлення IPCC AR6 із задачами динамічної оцінки життєвого циклу [71]
AGTP	Absolute Global Temperature Potential	
CGTP	Combined Global Temperature Potential	омбінований показник, який застосовується насамперед до короткоживучих газів; інтерпретує їхній внесок через зміну темпу (швидкості) викидів, а не просто «скільки викинули»; у контексті net zero означає: нульові викиди CO ₂ та інших довгоживучих парникових газів, і при цьому не зростаючі викиди короткоживучих газів (IPCC AS6).

Таблиця 2.2

Фізичні характеристики парникових газів IPCC AR6

Показник	CO ₂	CH ₄ (викопний)	CH ₄ (невикопний)	N ₂ O	HFC-32	HFC-134a	CFC-11	PFC-14
Час життя (роки)	Multiple	11.8 ± 1.8	11.8 ± 1.8	109 ± 10	5.4 ± 1.1	14.0 ± 2.8	52.0 ± 10.4	5×10 ⁴
Радіаційна ефективність (W·m ⁻² ·ppb ⁻¹)	1.33 ± 0.16 ×10 ⁻⁵	5.7 ± 1.4 ×10 ⁻⁴	5.7 ± 1.4 ×10 ⁻⁴	2.8 ± 1.1 ×10 ⁻³	1.1 ± 0.2 ×10 ⁻¹	1.67 ± 0.32 ×10 ⁻¹	2.91 ± 0.65 ×10 ⁻¹	9.89 ± 0.19 ×10 ⁻²

В таблиці 2.3 наведено комбіновані показники лише для сполук із часом життя менше 20 років. CGTP має одиниці «роки» і застосовується до зміни швидкості викидів, а не до разової кількості викиду.

Таблиця 2.3

Кліматичні показники парникових газів IPCC AR6

Показник	CO ₂	CH ₄ (википний)	CH ₄ (невикипний)	N ₂ O	HFC-32	HFC-134a	CFC-11	PFC-14
GWP-20	1	82.5 ± 25.8	79.7 ± 25.8	273 ± 118	2693 ± 842	4144 ± 1160	8321 ± 2419	5301 ± 1395
GWP-100	1	29.8 ± 11	27.0 ± 11	273 ± 130	771 ± 292	1526 ± 577	6226 ± 2297	7380 ± 2430
GWP-500	1	10.0 ± 3.8	7.2 ± 3.8	130 ± 64	220 ± 87	436 ± 173	2093 ± 865	10587 ± 3692
GTP-50	1	13.2 ± 6.1	10.4 ± 6.1	290 ± 140	181 ± 83	733 ± 410	6351 ± 2342	7660 ± 2464
GTP-100	1	7.5 ± 2.9	4.7 ± 2.9	233 ± 110	142 ± 51	306 ± 119	3536 ± 1511	9055 ± 3128
CGTP-50 (роки)	—	2823 ± 1060	2675 ± 1057	—	78175 ± 29402	146670 ± 53318	—	—
CGTP-100 (роки)	—	3531 ± 1385	3228 ± 1364	—	92888 ± 36534	181408 ± 71365	—	—

Показник GWP залишається базовим інструментом для оцінки та порівняння кліматичного впливу різних парникових газів, а також для агрегування викидів у формі CO₂-еквіваленту у національних звітах та кліматичній політиці. Однак сучасні наукові дослідження показують, що статичне застосування GWP₁₀₀ може викривлювати внесок короткоживучих забруднювачів у потепління; оновлені радіаційні ефективності та значення GWP для галогенвмісних газів суттєво впливають на оцінку їхнього внеску у радіаційний вплив; у ряді секторів (авіація, тваринництво, управління відходами,

аграрні системи) вибір метрики (GWP, GWP*, ATR, AGWP/AGTP) істотно змінює результати оцінки та висновки.

Таким чином, GWP слід розглядати як важливу, але не єдиний показник в системі оцінювання кліматичного впливу. Для досліджень, пов'язаних з короткоживучими забруднювачами, динамічними сценаріями переходу та інтегрованими оцінками «клімат + здоров'я», доцільно комбінувати GWP із GWP*, GTP, ATR, AGWP/AGTP та іншими показниками, адаптуючи набір метрик до конкретних завдань дослідження.

У другому розділі обґрунтовано методологічну основу дослідження просторового розподілу парникових газів над територією України та сформовано аналітичну схему, яка поєднує супутникові спостереження, модельні реаналізи й наземні вимірювання. Запропонований підхід відповідає сучасним вимогам екологічного моніторингу, оскільки забезпечує поєднання високої просторової деталізації супутникових продуктів із фізичною узгодженістю реаналізів і можливістю незалежної валідації результатів за наземними даними. Сформовано методичні передумови для коректного переходу від первинних полів концентрацій до інтерпретованих просторово-часових закономірностей, придатних для подальшого порівняння регіонів і вироблення практичних рекомендацій.

РОЗДІЛ 3

СПІВСТАВЛЕННЯ ГЛОБАЛЬНОГО ТА РЕГІОНАЛЬНОГО ТРЕНДУ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Глобальний тренд досліджуваних показників оцінено на основі довготривалих спостережень Глобальної лабораторії моніторингу Національного управління океанічних та атмосферних досліджень (NOAA GLM) (США). Аналіз парникових газів над територією України виконано на основі даних платформи NASA Giovanni, яка надає веб-інструменти для візуалізації та первинної статистичної обробки супутникових, реаналізних і модельно-асимільованих продуктів без необхідності попереднього завантаження повних масивів даних [77]. Обраний підхід забезпечує відтворюваність результатів завдяки фіксації джерел, змінних, часових інтервалів і параметрів просторового усереднення. Територія України задавалась шейп-файлом або координатно – шляхом введення меж за широтою та довготою. По всіх комірках регулярної сітки, що потрапляють у межі обраної області, веб-інструменти платформи обчислюють просторові середні значення для кожного часового інтервалу обраного періоду.

3.1. Глобальний тренд концентрацій парникових газів

Протягом останніх десятиліть глобальна динаміка концентрацій парникових газів у атмосфері Землі демонструє стійку тенденцію до зростання. Провідні міжнародні організації визнали, що збільшення концентрацій CO₂, CH₄, N₂O та фторованих газів є ключовим фактором сучасного глобального потепління. Приріст температурної залежності прискорився із середини XX століття на фоні індустріалізації, зміни типів землекористування та зростання енергетичного споживання.

Від початку індустріальної епохи середні глобальні концентрації основних парникових газів зросли до максимальних рівнів за останні сотні років, що підтверджено як сучасними інструментальними вимірюваннями, так і реконструкціями льодовикових кернів (рис.3.1). У роботі [78] розроблено

напівемпіричну модель, яка описує зв'язок між глобальними викидами CO_2 та атмосферною концентрацією діоксиду вуглецю в період 1750–2018 рр. Для аналізу використано довготривалі ряди даних енергетичних викидів і антропогенних змін землекористування, а також реконструкції концентрацій CO_2 за крижаними кернами і вимірюваннями на станції Мауна-Лоа. Дані льодових кернів зазвичай мають часову точність ± 2 роки, тоді як значення вуглекислого газу для зразків льоду з річного шару змінюються менш ніж на 1,2 ppm. Для Мауна-Лоа концентрації мають точність $\pm 0,2$ ppm. Дані демонструють, що концентрація CO_2 неухильно зростає з 1750 року, і це зростання також значно прискорилося з 1960 року. Ключовий результат роботи полягає в тому, що автор знаходить сталу величину $\approx 51,3\%$ для всього аналізованого періоду, тобто приблизно половина викидів CO_2 залишається в атмосфері, а інша половина поглинається океаном та наземними екосистемами.

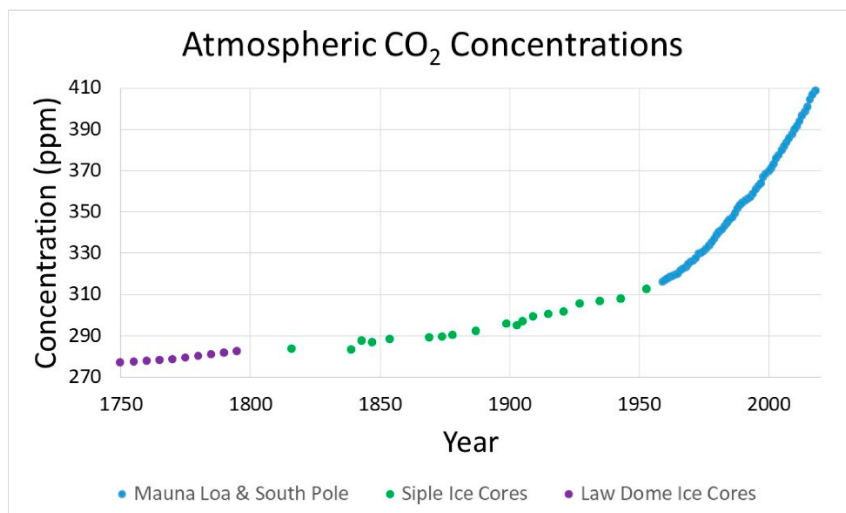


Рис.3.1. Динаміка концентрації CO_2 в атмосфері (ppm) [78].

Протягом кількох десятиліть Лабораторія глобального моніторингу NOAA здійснює вимірювання CO_2 та інших парникових газів у мережі віддалених пунктів відбору повітря, отримані на основі спостережень на морських поверхневих станціях. Концентрації парникових газів подано як молярну частку в сухому повітрі, що визначається співвідношенням кількості молекул до загальної кількості молекул у пробі після видалення водяної пари. Значення виражено в частках (ppm, ppb). Дані за поточний рік мають попередній статус і

можуть бути уточнені після повторного калібрування еталонних газів та додаткових процедур контролю якості. На графіках (рис.2.2 – 2.5) червоні маркери відображають усереднені значення, тоді як чорна лінія демонструє довгостроковий тренд із вилученою сезонністю. Для її побудови використано рухоме середнє, що враховує сім суміжних сезонних циклів, за винятком перших і останніх трьох з половиною років ряду, де сезонність усереднена відповідно за перші та останні сім років. Глобальне середнє значення формується шляхом попереднього згладжування часових рядів для кожної станції, після чого згладжені дані переносять на широтний профіль із 48 рівними часовими інтервалами на рік. На основі широтних розподілів для кожного інтервалу обчислюють глобальні середні значення [82].

Річне збільшення концентрації парникових газів визначають як різницю між значеннями на 1 січня двох суміжних років після видалення сезонного циклу. Попередня оцінка річного приросту публікується у квітні наступного року і згодом уточнюється у зв'язку з надходженням нових даних; стабілізація показника зазвичай відбувається восени. Регулярне поповнення бази даних дозволяє зменшувати похибку початкових оцінок, що зумовлено як підвищенням просторової репрезентативності, так і мінімізацією крайових ефектів апроксимаційних методів. Початкові оцінки річного збільшення зазвичай демонструють позитивне зміщення в середньому на $+1 \pm 0,8 \text{ ppm} \cdot \text{рік}^{-1}$ для CO_2 , $+1 \pm 0,8 \text{ ppb} \cdot \text{рік}^{-1}$ для CH_4 яке поступово зникає до середини літа. Окремі роки можуть характеризуватися значно більшою варіативністю. Аналогічні тенденції спостерігаються для середніх значень за місяць, де початкові оцінки інколи завищені.

Оцінка невизначеностей ґрунтується на комбінації бутстреп-методу варіювання складу мережі станцій та Монте-Карло моделювання, що враховує випадкову похибку вимірювань. Для цього формується ансамбль із 100 глобальних часових рядів, на основі яких розраховуються середні значення та стандартні відхилення річних приростів. Хоча ці статистичні процедури забезпечують кількісне оцінювання невизначеностей, початкові зміщення

можуть суттєво перевищувати формально розраховану похибку, що вимагає обережності в інтерпретації найсвіжіших даних.

На рис.3.2 представлено глобальні усереднені концентрації вуглекислого газу.

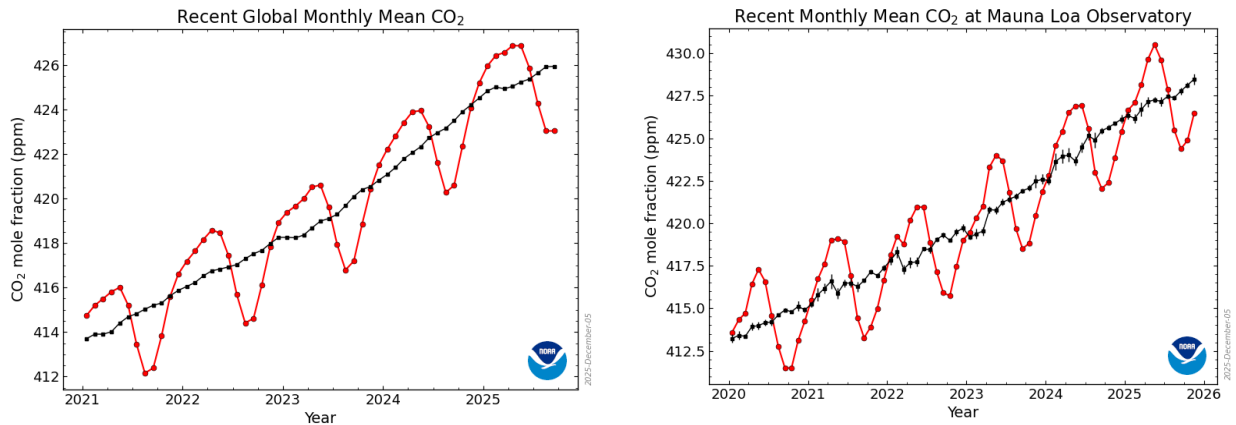


Рис.3.2. Динаміка концентрації вуглекислого газу за 2021-2025 рік: (а) - середньомісячний глобальний рівень; (б) – у Мауна-Лоа [79].

На рис.3.3 представлено глобальні середні концентрації метану в атмосфері. Графік (б) демонструє динаміку за 2021-2025 рік, (а) репрезентує повну часову серію з 1983 року, початок здійснення моніторингу мережею вимірювальних пунктів NOAA.

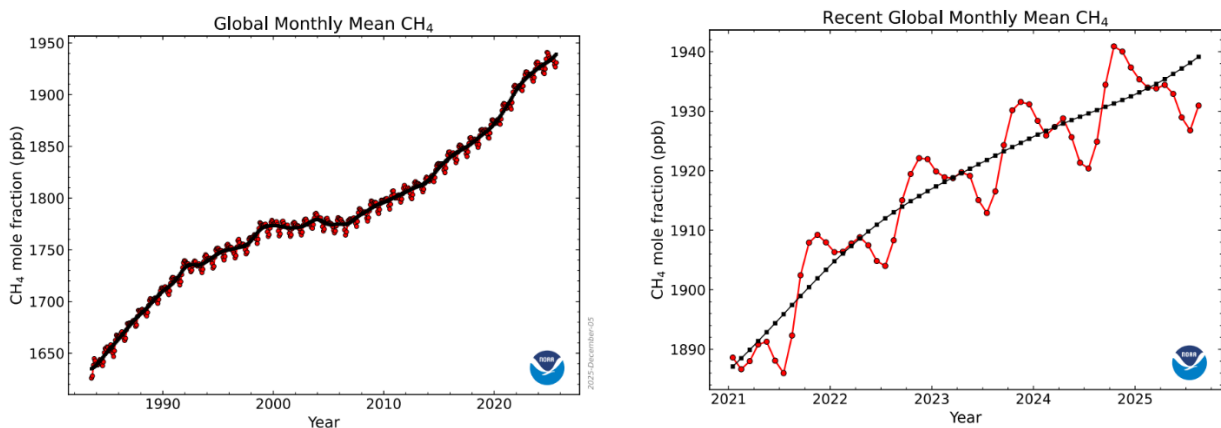


Рис.3.3. Глобальний тренд щорічні середні концентрації метану за період 1983-2025 (а) та 2021-2025 (б) за даними NOAA [80].

За даними [80] щорічного збільшення середнього рівня атмосферного метану побудована діаграма за 2000-2024 рр. (Рис.3.4). Динаміка річного приросту глобальної концентрації атмосферного метану у 2000–2024 рр.

демонструє декілька виразних фаз, що відображають зміни в природних і антропогенних джерелах та стоках CH_4 .

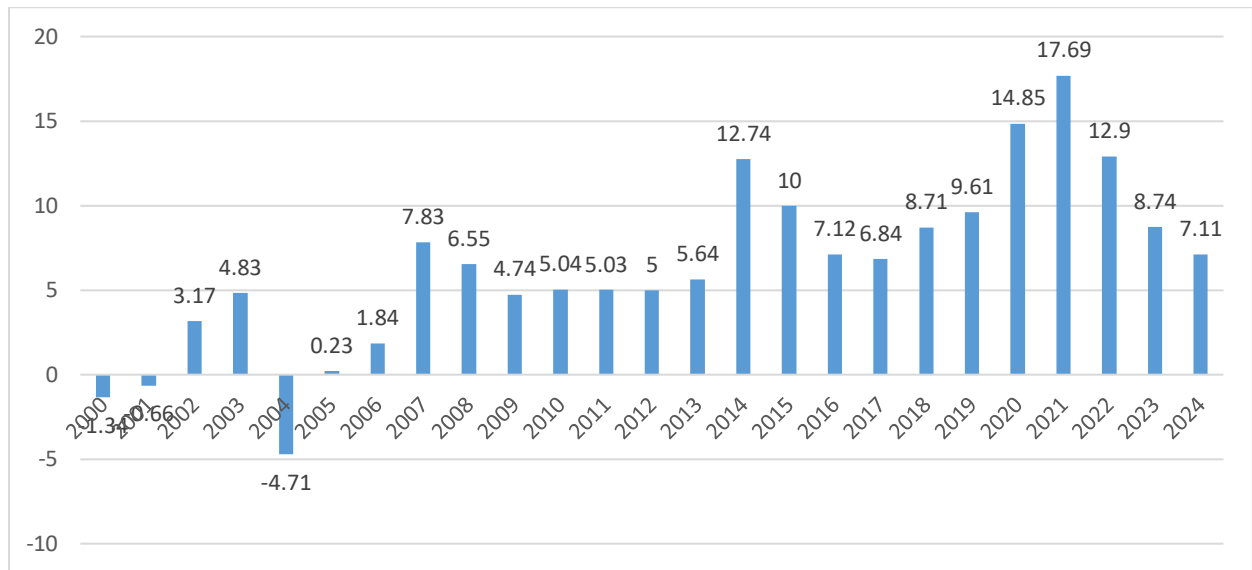


Рис.3.4 Динаміка річної зміни глобального середнього рівня атмосферного метану за даними Лабораторії глобального моніторингу NOAA за 2000-2024 рр (побудовано автором за даними [80]).

Початок періоду (2000–2006 рр.) характеризується низькими темпами зміни метану, включно з окремими негативними значеннями (–1,34 ppb у 2000 р., –0,66 ppb у 2001 р., –4,71 ppb у 2004 р.). Це свідчить про баланс або перевагу процесів вилучення CH_4 над викидами, що узгоджується з періодами стабілізації глобального метанового тренду, зафіксованими в літературі для початку 2000-х.

Після 2006 р. відбувається стійкий перехід до зростання концентрацій. У 2007–2013 рр. річні прирости коливаються в діапазоні 4,7–7,8 ppb, демонструючи помірне прискорення метанового накопичення. Це може бути пов'язано з розширенням тропічних джерел, збільшенням біогенних викидів і стабільно зростаючим внеском сільського господарства.

Період 2014–2021 рр. позначений різким посиленням темпів зростання. Згідно з даними, у 2014 р. зафіксовано стрибок до 12,74 ppb, а в наступні роки зберігається підвищений рівень приростів (10 ppb у 2015 р., 8,7–9,6 ppb у 2018–2019 рр.). Найстрімкіше збільшення відбулося у 2020–2021 рр., де прирости досягли 14,85 ppb та 17,69 ppb відповідно – одних із найвищих значень за всю історію спостережень NOAA. Цей період частково пов'язують із кліматичними аномаліями (зокрема, сприятливими умовами для викидів у тропічних болотах)

та потенційним зміщенням у хімії тропосфери, що знижує ефективність руйнування CH₄.

Після піку 2021 р. спостерігається поступове зниження темпів зростання: у 2022 р. приріст становив 12,9 ppb, у 2023 р. – 8,74 ppb, а в 2024 р. – 7,11 ppb. Хоча значення все ще перевищують рівні початку 2000-х, зменшення може свідчити про часткову стабілізацію або зміни у балансі джерел і стоків метану.

У цілому, залежність демонструє довгостроковий тренд істотного прискорення накопичення CH₄ у атмосфері після 2007 р., піковий період 2020–2021 рр. і відносне зниження темпів у 2022–2024 рр. Ця динаміка підтверджує посилення ролі біогенних джерел метану та чутливість глобального метанового циклу до кліматичних та антропогенних чинників.

Таблиця 3.1

Середні значення парникових газів за даними Лабораторії глобального моніторингу NOAA, за даними [80]

С _{ср}	CO ₂ , ppm	CH ₄ , ppb	CO ₂ , ppm
	Global		Mauna-Loa
2024	422.80	1929.56	424.61
2023	419.37	1921.42	421.08
2022	417.09	1910.92	418.53
2021	414.70	1894.81	416.41
2020	412.44	1878.72	414.21

Глобальні концентрації парникових газів демонструють стале та прискорене зростання, яке перевищує довготривалі природні варіації. Найбільший внесок у зміну клімату мають CO₂ та CH₄, концентрації яких у 2024 році досягли найвищих рівнів за досліджений період.

1.2. Динаміка та просторово-часові закономірності розподілу вуглекислого газу 2016 – 2021 рр.

Для оцінювання просторово-часової мінливості CO₂ над територією України обрано набір даних Gridded Daily OCO-2 Carbon Dioxide assimilated dataset – продукт рівня L3, сформований на основі спостережень місії OCO-2 та моделювання в системі GEOS. Місія OCO-2 забезпечує високоточні оцінки XCO₂ (усереднений вміст CO₂ за атмосферою колонкою), але спостереження мають значні прогалини через смугу вимірювань приблизно 10 км та обмеження реєстрації сигналу за наявності хмар і щільних аерозолів.

Для отримання суцільних полів у цьому наборі застосовано асиміляцію даних моделювання атмосферного перенесення в GEOS поєднується зі спостереженнями, а стан атмосфери коригується відповідно до вимірних значень CO₂. Це дозволяє заповнювати пропуски там і тоді, де прямі спостереження відсутні, та отримувати просторово-часово узгоджені оцінки колонкової мольної частки CO₂. Зокрема, супутникові спостереження OCO-2 рівня L2 засвоюються кожні 6 годин у системі GEOS CoDAS (NASA GMAO).

Рівні супутникових даних відображають ступінь обробки на рівні L1 фіксуються первинні вимірювання сенсора; на рівні L2 з L1 отримують геофізичні параметри (для OCO-2 – XCO₂ уздовж траси супутника), при цьому покриття є нерівномірним і містить прогалини; рівень L3 – це узгоджений продукт на регулярній сітці, де значення L2 агрегуються (у цьому випадку з кроком $0.5^\circ \times 0.625^\circ$) і подаються у вигляді просторових полів та/або рядів. [77]

Для України просторово усереднений часовий ряд за 2016–2022, дані після лютого 2022 відсутні на ресурсі. Показник подано в одиницях [mol CO₂/mol dry] – мольна частка CO₂ у сухому повітрі, усереднена за атмосферою колонкою. Це безрозмірна величина, яку за потреби можна подати в ppm (перерахунок: помножити на 10^6)).

За даними часової динаміки колонкової мольної частки CO₂ побудовано графік залежності «час–концентрація» (рис.3.5). Для кількісного опису довготривалої зміни визначено лінійну лінію тренду та отримано її рівняння, а

також розраховано коефіцієнт кореляції, який характеризує силу лінійного зв'язку між часом і значеннями CO₂.

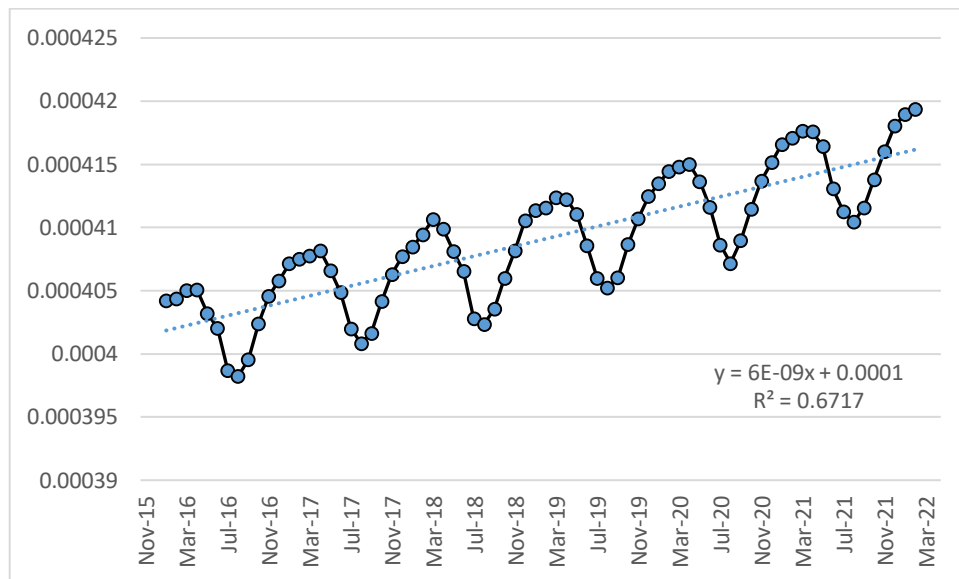


Рис. 3.5. Динаміка колонкової мольної частки CO₂ (mol CO₂/mol dry) над територією України за 2016–2022 рр. за даними NASA Giovanni.

Для співставлення національних значень CO₂ з «еталонними» глобальними показниками використано глобальні річні середні мольні частки CO₂ – WMO Global Mean – що публікуються Всесвітньою метеорологічною організацією в межах програми WMO/GAW на базі аналізу World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) і використовуються у WMO Greenhouse Gas Bulletin [16].

В таблиці 3.2 наведено розраховані середньорічні значення XCO₂ над територією України за 2016–2021 рр.. Співставлення середнього значення по Україні порівняно з WMO global mean дозволяє оцінити, наскільки динаміка над країною узгоджується із глобальною тенденцією накопичення CO₂ в атмосфері та чи відрізняється за рівнем/темпом змін від глобального фону. За період 2016–2021 рр. розрахована середня концентрація CO₂ над територією України становила 408,72 ppm, тоді як еталонне глобальне середнє WMO Global Mean – 409,63 ppm. Упродовж усіх років значення для України були нижчими за глобальні на 0,6–1,1 ppm (у середньому на 0,91 ppm). Водночас темп зростання CO₂ над Україною (≈2,44 ppm/рік) практично збігається з глобальним (≈2,38 ppm/рік), а між рядами спостерігається майже повна узгодженість ($r \approx 0,999$), що

свідчить про домінування загальносвітового тренду накопичення CO₂ у атмосфері над регіональними відхиленнями.

Таблиця 3.2

Порівняння середньорічних значень CO₂ над Україною та глобального середнього значення за даними WMO (2016–2021 рр.)

Рік	CO ₂ , ppm, Ukraine	CO ₂ , ppm, Global	Δ (Ukraine–Global), ppm	Приріст Ukraine, ppm/рік	Приріст Global, ppm/рік
2016	402,759	403,800	–1,041	–	–
2017	405,385	406,000	–0,615	2,626	2,200
2018	407,203	408,200	–0,997	1,818	2,200
2019	409,680	410,800	–1,120	2,477	2,600
2020	412,336	413,300	–0,964	2,656	2,500
2021	414,954	415,700	–0,746	2,618	2,400
ср	408,720	409,633	–0,914	2,439	2,380

* WMO Greenhouse Gas Bulletin No.21, 2025.

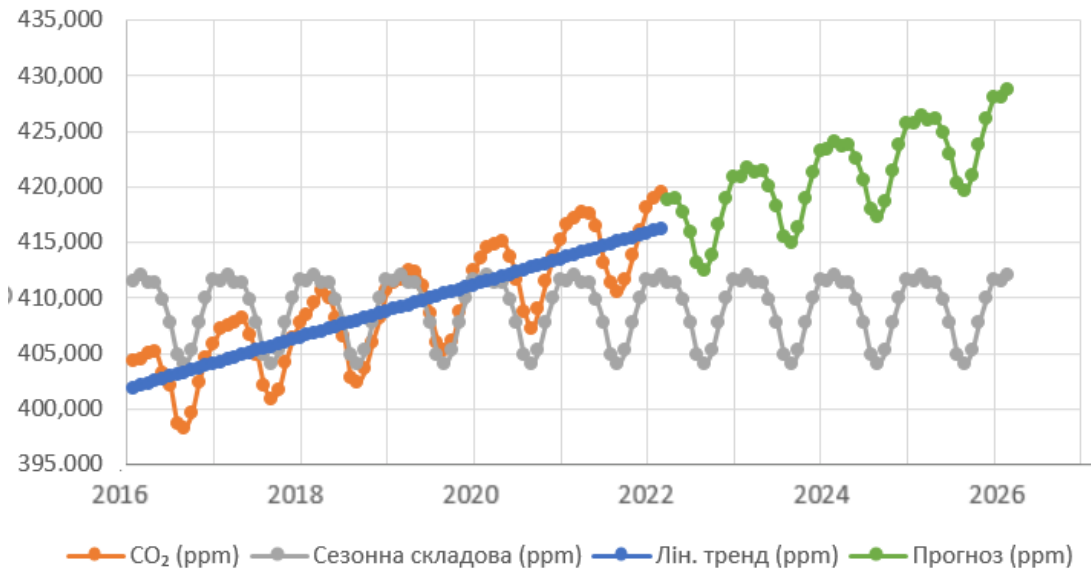


Рис. 3.6. Динаміка XCO₂ (ppm) 2022-2026 рр. на базисі NASA Giovanni, 2016-2021, Україна.

На основі вихідних даних по XCO₂ побудовано графік залежності «час–XCO₂» та визначено лінійну лінію тренду для вихідного ряду. Для цього тренду отримано рівняння та оцінено тісноту лінійного зв’язку між часом і значеннями

XCO_2 через коефіцієнт кореляції Пірсона ($r = 0,8195$), що відображає суттєвий вплив сезонних коливань на розкид значень.

Далі виконано вилучення сезонності методом віднімання «норми за місяць» (середніх значень для кожного календарного місяця за весь наявний період), після чого побудовано тренд для ряду (рис.3.6). Тренд дозволив виділити довготривалу компоненту зміни CO_2 , темп зростання за трендом становить близько 2,38 ppm/рік, а кореляція між часом і десезоналізованими значеннями істотно зросла ($r = 0,9889$), що свідчить про домінування стійкого довготривалого тренду після усунення сезонних коливань.

На основі моделі «тренд + сезонна складова» виконано прогнозування на 48 місяців. Прогнозні значення отримано як сума лінійного тренду десезоналізованого ряду та сезонної компоненти для відповідного місяця. Для інтерпретації результатів додатково розраховано середньорічні прогнозні значення CO_2 : 2022 – 416,699 ppm; 2023 – 419,438 ppm; 2024 – 421,818 ppm, що відображає очікуване подальше зростання CO_2 за збереження поточних тенденцій.

У підсумку доповнення забезпечує кількісну оцінку довготривалого тренду CO_2 , коректніше виділення тренду через десезоналізацію, прогнозну оцінку на 4 роки, узгоджену з виявленим темпом зростання та сезонною структурою ряду.

В таблиці 3.3 наведено результати кореляційного аналізу для двох порівнянь: Серія(1): глобальні значення CO_2 за даними NOAA Global Monitoring Laboratory та супутниково-асимільованих оцінок XCO_2 над Україною за даними NASA Giovanni ($n=74$) та Серія(2) глобальні значення XCO_2 та прогнозних значень описової моделі ($n=43$).

Для серії(1) (NOAA Global vs Giovanni/Україна) встановлено дуже сильний позитивний лінійний зв'язок. $r = 0,958$, що означає регіональний ряд CO_2 над Україною змінюється майже синхронно з глобальним фоном. Високе значення $R^2 = 0,917$ вказує, що близько 91,7% варіації одного ряду статистично узгоджується з іншим у межах лінійної моделі. Ранговий коефіцієнт $r_s = 0,960$, що підтверджують стійкий монотонний характер зв'язку. Середня різниця ($Y-X$) є близькою до нуля ($-0,083$ ppm), що свідчить про мінімальне систематичне

зміщення між рядами, хоча на окремих відрізках часу можливі помітні відхилення (до $-3,715 \dots +2,149$ ppm).

Для серії(2) (NOAA Global / «описова» модель) зв'язок також є сильним позитивним, але нижчим за серію 1: $r = 0,898$ ($p < 0,001$), $R^2 = 0,806$, тобто модель відтворює приблизно 80,6% варіації глобального ряду в лінійному наближенні. Ранговий коефіцієнт Спірмена ($r_s = 0,866$) підтверджують монотонну узгодженість, однак середня різниця ($Y-X$) є більш від'ємною ($-0,706$ ppm), що вказує на систематично нижчі прогностні оцінки порівняно з глобальними значеннями.

Таблиця 3.3

Результати кореляційного аналізу концентрацій вуглекислого газу NOAA GLM / NASA Giovanni (серія 1: 2016-2021) / моделювання (серія 2: 2022-2024) Україна.

Показник	Серія 1, n=74	Серія 2, n=48
r	0,958	0,898
95% ДІ для r	0,933 ... 0,973	0,818 ... 0,944
R ²	0,917	0,806
Якість зв'язку (за r)	дуже сильний	сильний
r _s	0,960	0,866
Рівняння регресії (Y від X)	$Y = 1,1099 \cdot X - 45,039$	$Y = 0,951 \cdot X + 19,934$
95% ДІ для нахилу	1,031 ... 1,188	0,804 ... 1,098
Середня різниця (Y – X), ppm	-0,083	-0,706
Мін/макс (Y – X), ppm	-3,715 ... +2,149	-4,023 ... +1,939

У серії 1 узгодженість із глобальним рядом вища ($r=0,958$; $R^2=0,917$), ніж у серії 2 ($r=0,898$; $R^2=0,806$), що свідчить про кращу синхронність супутникового ряду Giovanni з глобальними змінами порівняно з прогнозом описової моделі.

Для просторового аналізу колонкового CO₂ над територією України сформовано дві карти розподілу за 2020 (рис. 3.7) та 2021 роки (рис. 3.8). Область дослідження задавалась шейп файлом, а результат подано у вигляді просторового поля на регулярній сітці продукту $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. Карта просторового розподілу CO₂ відображає середній вміст над територією України за період, що дає змогу виявити регіональні контрасти та зони підвищених/знижених значень у межах країни.

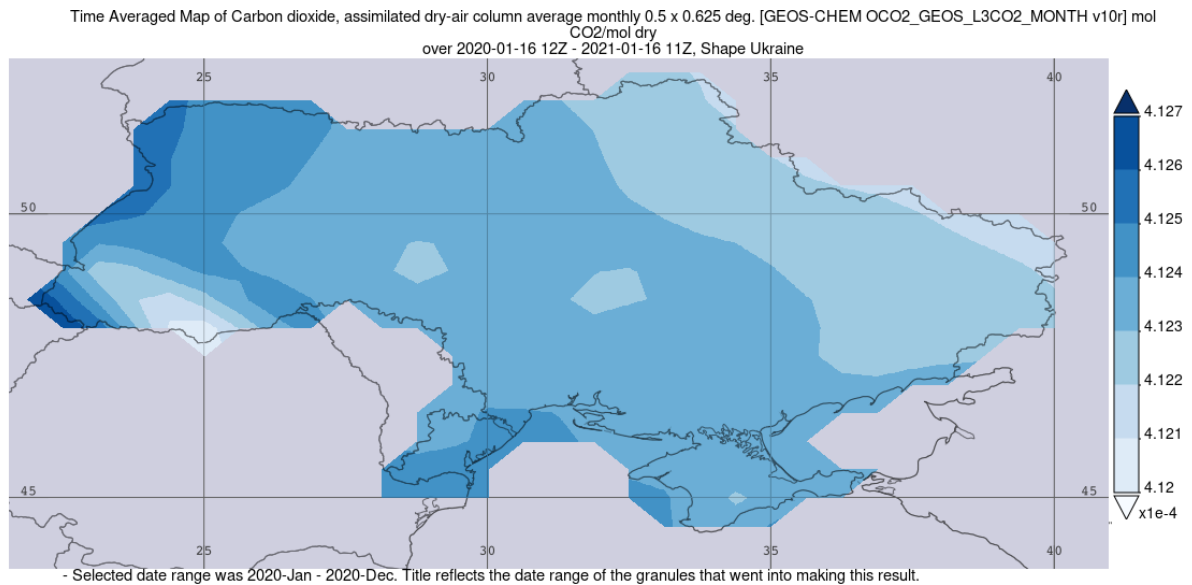
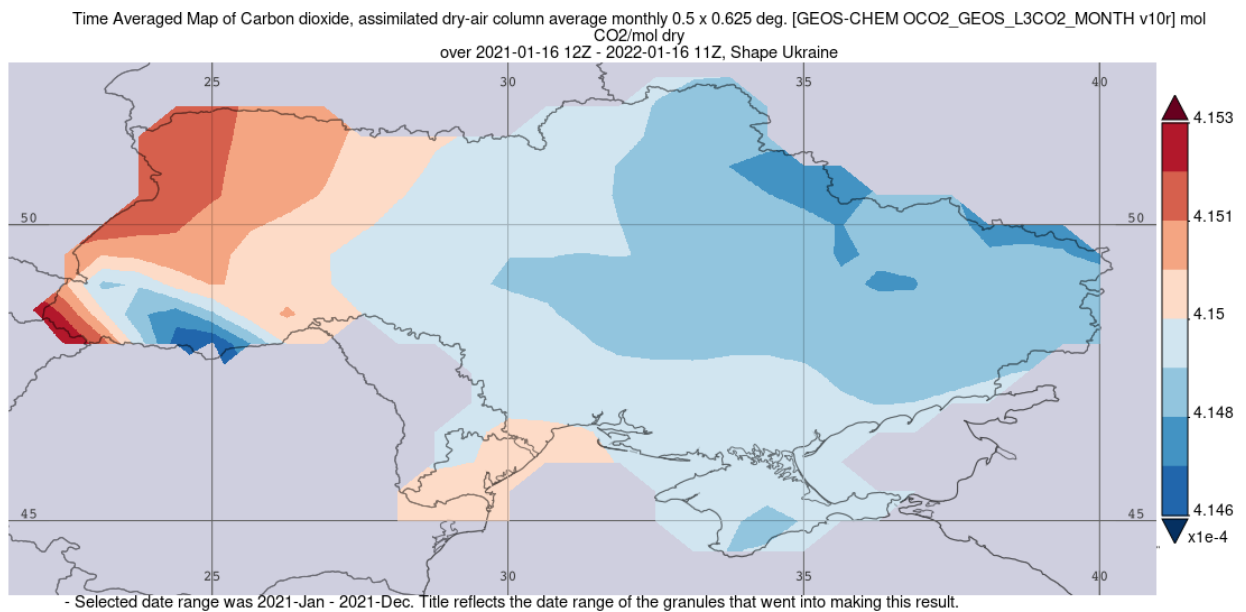


Рис. 3.7. Просторовий розподіл середнього колонкового CO₂ над територією України за даними NASA Giovanni (Time Average Map): “Carbon dioxide, assimilated dry-air column average”, 2020 рік, сітка $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, mol CO₂/mol dry.



(2021p.)

Рис. 3.8. Просторовий розподіл середнього колонкового CO₂ над територією України за даними NASA Giovanni (Time Average Map): “Carbon dioxide, assimilated dry-air column average”, 2021 рік, сітка $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, mol CO₂/mol dry.

Карта дозволяє оцінити внутрішню просторову неоднорідність показника та порівняти різні частини території між собою. Слід враховувати, що асимільований колонковий продукт (OCO-2/GEOS), тому просторові відмінності відображають поєднання спостережень і модельного перенесення, а також усереднення в межах відносно грубої сітки $0.5^\circ \times 0.625^\circ$.

Аналіз просторової мінливості CO₂ показав, що значення CO₂ в межах регіонів змінюються в дуже вузьких межах: мінімум становить 414,6 ppm (Сумська обл.), максимум – 415,15 ppm (Закарпатська обл.). Загальний діапазон дорівнює 0,55 ppm, стандартне відхилення $\sigma \approx 0,125$ ppm, середнє значення $\approx 414,904$ ppm. Такий малий розкид свідчить, що просторові відмінності CO₂ між областями в межах наведеної вибірки є переважно фоновими, а отже прямий статистичний зв'язок із регіональними емісіями може бути слабким або не проявлятися через вплив атмосферного перенесення та усереднення.

Порівняння розподілу показує, що у 2021 р. загальний рівень CO₂ є вищим відносно 2020 р., що узгоджується із загальною тенденцією зростання атмосферного CO₂ у часових рядах. Водночас просторова структура поля зберігається, відмічається стійкий градієнт «захід–схід», за якого нижчі значення характерні для східних регіонів, тоді як вищі – для західної частини країни.

Отже, зміни між 2020 і 2021 роками проявляються переважно як підвищення середніх значень, тоді як просторові закономірності розподілу CO₂ над Україною залишаються подібними. Таким чином, на фоні загального зростання концентрації CO₂ зберігається відносно стабільний просторовий розподіл, ймовірно зумовлений поєднанням атмосферного перенесення, сезонних умов та особливостей усереднення в межах сітки продукту.

Проведено аналіз кількості підприємств, емісії CO₂ (т) та емісії CO₂ у перерахунку на 1 підприємство (т/підпр.) за регіонами, використовуючи дані Державної служби статистики України / розділ Навколишнє природне середовище / Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря за 2021 рік.. Дані агреговані в Таблиці 3.4. Сумарні емісії CO₂ за таблицею становлять $\approx 111,85$ млн т CO₂.

Викиди діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від стаціонарних джерел
викидів за регіонами 2021 р. (за даними Держстат України)

	*Кількість підприємств, які мали викиди діоксиду вуглецю, одиниць	*Кількість викидів діоксиду вуглецю, тонн	**Емісія CO ₂ на 1 підприємство, тонн
Донецька	277	22699515	81948
Дніпропетровська	397	22321800	56226
Запорізька	255	12935756	50728
Івано-Франківська	146	12067114	82651
Харківська	344	6173308	17946
Вінницька	312	4302647	13791
м.Київ	228	3899698	17104
Київська	274	3348449	12221
Львівська	388	3125965	8057
Полтавська	371	2598461	7004
Хмельницька	234	2498136	10676
Черкаська	307	2414902	7866
Рівненська	146	2337178	16008
Миколаївська	284	2129663	7499
Луганська	142	1941986	13676
Одеська	224	1408699	6289
Чернігівська	199	1330776	6687
Сумська	220	1145222	5206
Кіровоградська	194	837165	4315
Житомирська	309	679216	2198
Волинська	169	515498	3050
Тернопільська	258	417244	1617
Херсонська	181	352620	1948
Закарпатська	96	235557	2454
Чернівецька	92	137636	1496

*(за даними Державної служби статистики України)

** розраховано автором

Розподіл емісій є різко неоднорідним: найбільші значення характерні для кількох промислово розвинених регіонів:

Донецька обл. – 22,70 млн т CO₂

Дніпропетровська обл. – 22,32 млн т CO₂

Запорізька обл. – 12,94 млн т CO₂

Івано-Франківська обл. – 12,07 млн т CO₂.

Разом чотири регіони формують $\approx 62,6\%$ сумарних емісій у вибірці, що дозволяє трактувати їх як ключові «високоемісійні» території. Найнижчі емісії зафіксовано для Чернівецької (0,138 млн т), Закарпатської (0,236 млн т) та Херсонської (0,353 млн т) областей.

Найвищу кількість підприємств мають Дніпропетровська (397), Львівська (388), Полтавська (371) та Харківська (344) області. Водночас приклад Львівської області демонструє, що велика кількість підприємств не обов'язково означає високі емісії: для коректної інтерпретації необхідно аналізувати також емісії на 1 підприємство, тобто інтенсивність викидів.

Середнє значення емісій на 1 підприємство становить ≈ 17546 т/підпр., медіана ≈ 7866 т/підпр., що вказує на значний вплив регіонів-лідерів і підтверджує високу неоднорідність. Найвища інтенсивність емісій характерна для:

Івано-Франківської обл. ≈ 82651 т/підпр.

Донецької обл. ≈ 81948 т/підпр.

Дніпропетровської обл. ≈ 56226 т/підпр.

Запорізької обл. ≈ 50728 т/підпр.

Найнижча інтенсивність виявлена для Чернівецької (≈ 1496 т/підпр.), Тернопільської (≈ 1617 т/підпр.), Херсонської (≈ 1948 т/підпр.), Житомирської (≈ 2198 т/підпр.) та Закарпатської (≈ 2454 т/підпр.) областей. Це узгоджується з тим, що в індустріальних регіонах домінують джерела з високою питомою емісією, тоді як у низці інших областей переважає менш вуглецемістка структура виробництва.

З огляду на неоднорідність та можливі «викиди» у даних оцінено кореляції як параметричним (Пірсон), так і ранговим (Спірмен) підходами. Виявлено

помірний статистично значущий зв'язок між кількістю підприємств і сумарними емісіями CO₂: ρ Спірмена $\approx 0,559$; $p \approx 0,0037$, що означає: зі збільшенням кількості підприємств у регіоні сумарні емісії, як правило, зростають. Натомість зв'язок між концентрацією CO₂ (ppm) та емісіями/кількістю підприємств у межах цієї таблиці є слабким і статистично невираженим, що логічно пояснюється дуже малим просторовим розкидом CO₂ (ppm) на фоні великого розкиду емісій (т).

Сумарний обсяг викидів за таблицею становить 111,85 млн т CO₂, при цьому розподіл є різко нерівномірним: Донецька, Дніпропетровська, Запорізька та Івано-Франківська області разом формують близько 62,6% загальних емісій. Показник “емісія на 1 підприємство” демонструє істотні відмінності в інтенсивності викидів: у високовуглецевих індустріальних регіонах він сягає $\approx 50\text{--}83$ тис. т CO₂/підприємство, тоді як у регіонах з найнижчими емісіями становить $\approx 1,5\text{--}2,5$ тис. т CO₂/підприємство. Водночас значення CO₂ (ppm) у таблиці змінюються в дуже вузьких межах, що вказує на фоновий характер концентрацій і пояснює відсутність вираженого прямого зв'язку між рівнем CO₂ та локальними емісіями в межах цієї вибірки.»

1.3. Динаміка та просторово-часові закономірності розподілу метану 2020 – 2024 рр.

Метан належить до парникових газів, що істотно впливають на радіаційний баланс атмосфери та формують коротко- та середньострокові кліматичні ефекти. Для регіональних досліджень важливим є середній рівень та його просторові контрасти, сезонні коливання та зміни між роками. Їх показники відображають поєднання природних процесів та антропогенних чинників, таких як температурно-вологісний режим, стан ґрунтів і водно-болотних угідь, аграрна діяльність, урбанізація, енергетика, поводження з відходами. З огляду на обмежену можливість наземних вимірювань супутникові продукти є важливим джерелом узгоджених спостережень, що дозволяють досліджувати регіональні закономірності на єдиній сітці та зі сталою повторюваністю у часі.

Досліджено динаміку денної та нічної мольної фракції метану над територією України за 2020–2025 рр. інструментами платформи NASA Giovanni.. Джерело даних зонд Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) на борту супутника Aqua (платформа EOS), який забезпечує інфрачервоні спектрометричні вимірювання для відновлення термодинамічних параметрів атмосфери та газів. Для роботи використано рівень Level-3 Monthly Gridded Retrieval (AIRS Only L3). Продукт містить щомісячні поля на регулярній глобальній сітці з кроком $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (довгота від -180° до $+180^{\circ}$, широта від -90° до $+90^{\circ}$). Для кожного місяця надаються середні значення параметра, стандартне відхилення, кількість внесків у комірку. Середні значення формуються як усереднення добових значень з урахуванням кількості валідних спостережень, що зменшує вплив нерівномірної вибірки у просторі й часі. Одиниці вимірювання показника ppbV, що відповідає мольній фракції газу в повітрі.

Просторовий крок $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ орієнтований на регіональні оцінки: одна комірка покриває десятки–сотні кілометрів в ширину, тому продукт коректніше інтерпретувати як характеристику регіонального фону та великих просторових градієнтів, а не як індикатор окремих локальних джерел. Додатково денні та нічні набори формуються з різних часових вікон проходження супутника, що створює підґрунтя для аналізу відмінностей. Подібні відмінності слід інтерпретувати з урахуванням умов спостережень, температурних контрастів та особливостей відновлення параметра.

Для території України отримані часові ряди за 2020–2025 рр. з шагом місяць для денних (рис.3.9.) та нічних значень (рис. 3.10). Територію України задано як просторовий полігон, для якої сервіс обчислює середнє значення параметра по області.

Отримані ряди даних характеризуються спільними взаємопов'язаними компоненти - регулярну сезонність та річні відхилення. На графіках спостерігається повторюваний річний цикл із відмінностями між холодним і теплим сезонами, який узгоджується з тим, що концентрації метану в атмосфері залежать від поєднання інтенсивності джерел, вертикального перемішування та ефективності хімічного руйнування метану. В теплий період, коли фотохімічні

Time Series, Area-Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Daytime/Ascending, AIRS-only) monthly 1 deg. @1000hPa [AIRS AIRS3STM v7.0] ppbv over 2020-Jan - 2025-Oct, Region 22.0813E, 44.2311N, 40.134E, 52.2246N

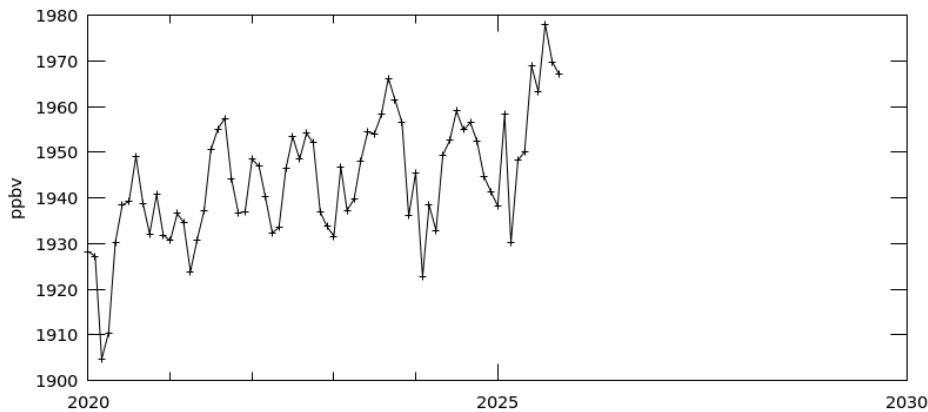
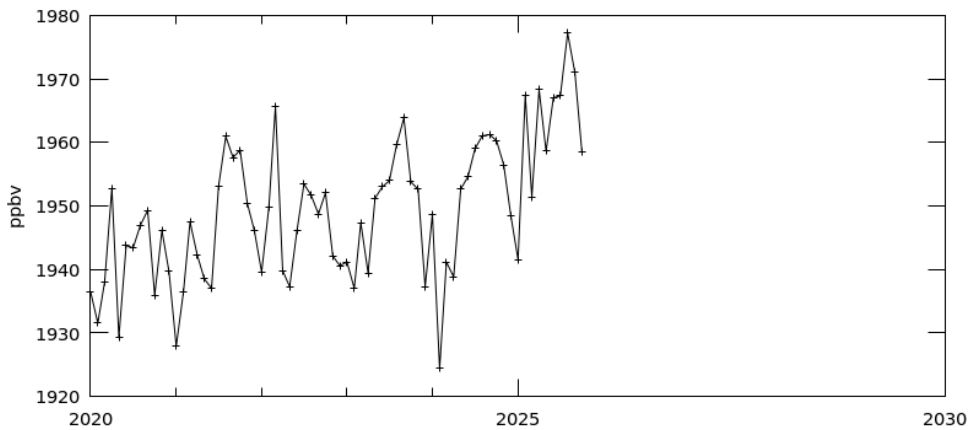


Рис. 3.9. Середні (місяц/день) концентрації [ppbV] метану у повітрі над територією України за 2020-2025 рік; за даними NASA Giovanni: *Time Series, Area-Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Daytime/Ascending, AIRS-only), monthly.*

Time Series, Area-Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Nighttime/Descending, AIRS-only) monthly 1 deg. @1000hPa [AIRS AIRS3STM v7.0] ppbv over 2020-Jan - 2025-Oct, Region 22.0813E, 44.2311N, 40.134E, 52.2246N



- The user-selected region was defined by 22.0813E, 44.2311N, 40.134E, 52.2246N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 22.5E, 44.5N, 39.5E, 51.5N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Рис. 3.10. Середні (місяц/ніч) концентрації [ppbV] метану у повітрі над територією України за 2020-2025 рік; за даними NASA Giovanni: *Time Series, Area-Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Nighttime/Ascending, AIRS-only), monthly.*

процеси активніші та зростає турбулентність у приземному шарі, сезонний хід часто характеризується зменшенням фонового рівня або приглушення піків. У холодний період, посилюється роль стабільної стратифікації та зменшується інтенсивність окиснення, що може сприяти підвищенню спостережуваних значень.

Денні й нічні значення демонструють синхронність у фазі сезонного циклу, оскільки відображають той самий регіональний стан атмосфери, але вимірний у різні частини доби. Разом з тим, систематичні або сезонно залежні відмінності між день і ніч можуть виникати з двох причин. По-перше, реальні циклічні коливання метану пов'язані зі зміною висоти планетарного прикордонного шару: вночі він нижчий і стабільніший, а вдень – вищий та інтенсивніше перемішаний; це впливає на те, як локальні та регіональні емісії «розбавляються» у приземному шарі. По-друге, для супутникових ІЧ-вимірювань важливими є температурні контрасти та умови спостережень, які можуть дещо змінювати чутливість до шарів атмосфери та формувати відмінності у відновленому параметрі між денними та нічними проходженнями.

В таблиці 3.5 наведено розраховані середньорічні значення концентрація метану над територією України за 2020–2024 рр., отримані за даними NASA Giovanni (AIRS-only) окремо для денного (Daytime/Ascending) та нічного (Nighttime/Descending) режимів. Річні показники для вихідних даних розраховано як арифметичне середнє 12 місячних значень упродовж відповідного календарного року. Окремою колонкою наведено різницю Δ (день–ніч), яка характеризує циклічні коливання середньорічних оцінок. У 2020–2024 рр. різниця має від'ємні значення, тобто нічні середні рівні CH_4 перевищують денні, причому найбільша різниця спостерігається у 2020 р. (–10,193 ppbV), а найменша — у 2023 р. (–0,021 ppbV). Для порівняльного контексту в таблиці подано глобальні середньорічні значення CH_4 за даними WMO Global Greenhouse Bulletin [16], а також річні викиди CH_4 за даними Держстату (тонн) [47]. Таким чином, таблиця забезпечує співставлення супутникових оцінок рівнів CH_4 над Україною (денних/нічних), глобального

фону та офіційної статистики викидів та створює базис для подальшого аналізу кореляційних зв'язків.

Таблиця 3.5

Середньорічні значення (2020–2024 pp.)

Рік	CH ₄ , ppbV, Giovanni день	CH ₄ , ppbV, Giovanni ніч	Δ (день–ніч), ppbV	CH ₄ , ppbV, Global WMO	Викиди CH ₄ , тонн, Держстат
2020	1930.933	1941.126	–10.193	1890	429192
2021	1939.550	1946.410	–6.860	1907	454888
2022	1943.880	1947.260	–3.380	1923	371372
2023	1949.195	1949.216	–0.021	1934	354894
2024	1945.853	1950.591	–4.738	1942	275989

На рис. 3.11 побудованому графіку «рік – концентрація CH₄» представлено три ряди середньорічних значень мольної фракції метану (ppbV) за 2020–2024 pp.: нічні (NASA, Nighttime/Descending), денні (NASA, Daytime/Ascending) та глобальні середні значення (WMO, Global). Загалом усі три криві відображають річні зміни без різких стрибків, що відповідає фоновому характеру CH₄ у масштабі річного усереднення.

Нічний ряд є найвищим серед оцінок упродовж усього періоду. Значення зростають від 1941,126 ppbV у 2020 р. до 1950,591 ppbV у 2024 р. із невеликими коливаннями між роками. Крива демонструє загальну висхідну тенденцію нічних значень у межах аналізованого періоду.

У 2020–2023 загальний хід денного ряду є подібним, значення збільшуються від 1930,933 ppbV у 2020 до 1949,195 ppbV у 2023. Водночас у 2024 р. спостерігається зниження денного середньорічного значення до 1945,853 ppbV, тобто денна крива має локальний спад наприкінці періоду на тлі зростання нічного ряду. Можна припустити, що денні оцінки є більш варіабельними між роками порівняно з нічними або значення потребує додаткової верифікації.

Різниця між нічними та денними значеннями на графіку проявляється як стійкий вертикальний розрив між кривими. Величина розриву зменшується від 2020 до 2023 р., коли денний і нічний ряди майже збігаються ($\Delta \approx -0,021$ ppbV у

2023 р.), а у 2024 р. розрив знову зростає ($\Delta \approx -4,738$ ppbV). Асиметрія в річних середніх послаблюється в середині періоду та посилюється наприкінці, тобто не є сталою величиною.

Глобальний ряд розташований значно нижче двох «національних» супутникових рядів за абсолютним рівнем, але демонструє найбільш монотонне зростання від 1890 ppbV у 2020 р. до 1942 ppbV у 2024 р. На графіку це виглядає як рівномірно висхідна лінія, що відображає загальносвітову тенденцію підвищення фоновому метану. Відстань між глобальною кривою та рядами над Україною поступово скорочується, однак розраховані величини залишаються вищими протягом усього інтервалу.

Таким чином, узагальнюючи рис.3.X можна виділити особливості:

- зростання денних / нічних середньорічних значень CH_4 над Україною в 2020–2024 рр.;
- стає підвищення глобального фоновому CH_4 .

Розходження між денним і нічним рядами та їх відмінність від глобального фону доцільно інтерпретувати обережно, враховуючи вплив умов спостережень, атмосферного переносу та те, що річні значення є результатом усереднення сезонно змінного сигналу.

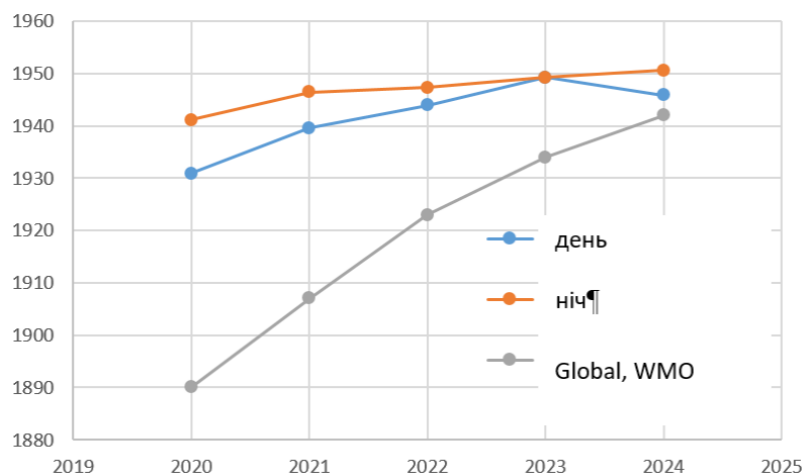


Рис. 3.11. Середньорічні значення мольної фракції метану [ppbV] над територією України за 2020–2024 рр. за даними NASA Giovanni (AIRS-only): денний режим (Daytime/Ascending) і нічний режим (Nighttime/Descending), а також глобальні середньорічні значення CH_4 (WMO, Global).

Для перевірки узгодженості динаміки супутникових концентрацій метану над Україною з офіційною статистикою викидів виконано кореляційний аналіз:

- 1. річні середні значення мольної фракції CH₄ (ppbV) за даними NASA Giovanni для денного режиму та річними викидами CH₄ за Держстатом (т/рік);
- 2. аналогічно для нічного режиму;
- 3. глобальними середньорічними значеннями CH₄ (ppbV) та викидами Держстату.

Аналіз проводився для періоду 2020–2024 рр. (n = 5 пар значень), що необхідно враховувати при інтерпретації результатів через підвищену статистичну невизначеність.

Основним показником лінійного зв’язку обрано коефіцієнт кореляції Пірсона (r) із двосторонньою перевіркою значущості (p-value). Додатково, з огляду на малий обсяг вибірки та нелінійність, розраховано рангову кореляцію Спірмена (r_s). 95% довірчі інтервали для (r) оцінено за перетворенням Фішера.

Таблиця 3.6

Результати кореляційного аналізу (2020–2024)

	r (Пірсона)	p	95% ДІ для r	r _s (Спірмена)	p
(CH ₄ день, ppbV) / (викиди, т)	-0.674	0.212	[-0.976; 0.514]	-0.800	0.104
(CH ₄ ніч, ppbV) / (викиди, т)	-0.755	0.140	[-0.983; 0.381]	-0.900	0.037
(CH ₄ Global, ppbV) / (викиди, т)	-0.876	0.051	[-0.992; 0.028]	-0.900	0.037

Отримані коефіцієнти Пірсона мають від’ємний знак, тобто в межах 2020–2024 рр. роки з вищими середніми значеннями CH₄ (ppbV) у досліджуваних рядах відповідають рокам із нижчими національними викидами CH₄ за Держстатом (т/рік). За критерієм Пірсона статистично значущого зв’язку на рівні p=0.05 не отримано для денного та нічного рядів; для пари «Global–Держстат» p ≈ 0.051 (межове значення). За критерієм Спірмена зв’язок для «ніч–Держстат» та

«Global–Держстат» є значущим ($p \approx 0.037$), однак з огляду на $n = 5$ цей результат слід трактувати як індикативний.

Важливо підкреслити, що кореляція між концентраціями (ppbV) і викидами (т/рік) не є прямим доказом причинно-наслідкового зв'язку. Мольна фракція CH_4 над Україною формується під впливом атмосферного переносу, циркуляції, вертикального перемішування, фотохімічних процесів окиснення та транскордонного фону, тоді як статистичні дані Державної служби статистики відображають національні сумарні викиди й не враховують метеорологічної зумовленості змін концентрацій. Тому результати кореляції доцільно інтерпретувати як перевірку узгодженості напрямків річних змін та як підґрунтя для подальших моделей із урахуванням метеорологічних показників і переносу.

Карти просторово-часового розподілу середніх значень метану вдень (рис. 3.12) та вночі (рис. 3.13) за 2023 р. ілюструють просторову неоднорідність мольної фракції над Україною. На карті є плавні регіональні градієнти та зони відносних підвищень, що може бути пов'язано з видами землекористування,

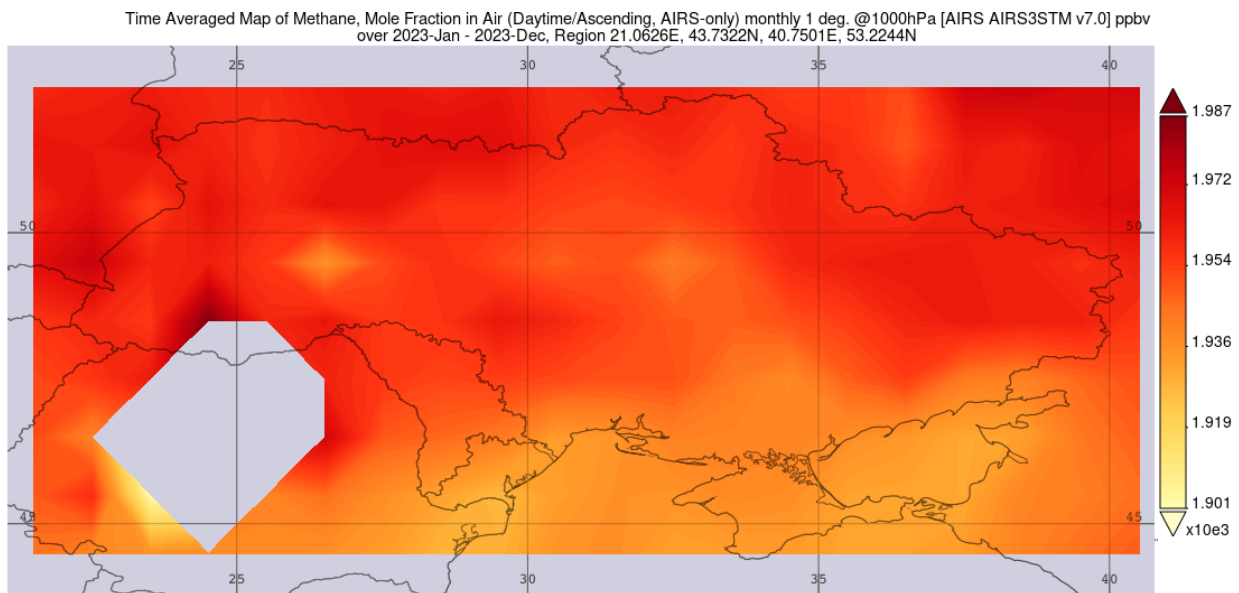


Рис. 3.12. Просторо-часовий розподіл концентрації метану [ppbV] над територією України за 2023 рік / день; за даними NASA Giovanni: Time Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Daytime/Ascending, AIRS-only), monthly.

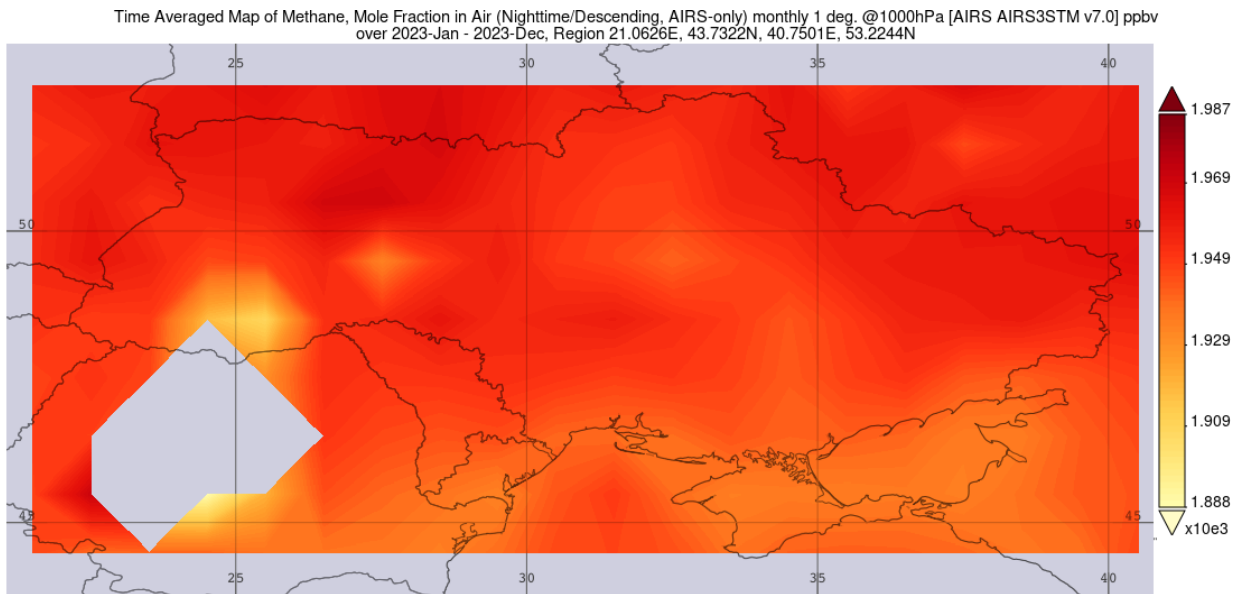


Рис. 3.13. Просторо-часовий розподіл концентрації метану [ppbV] над територією України за 2023 рік / ніч; за даними NASA Giovanni: *Time Averaged of Methane, Mole Fraction in Air (Nighttime/Ascending, AIRS-only), monthly*.

урбанізованими територіями, розташуванням природних комплексів та особливостями атмосферного переносу. Водночас у межах даної деталізації карти слід трактувати як усереднений «фон», де локальні джерела можуть бути згладжені масштабом сітки та ефектами переносу.

З метою ідентифікації регіональних областей із підвищеними/зниженими значеннями та уточнення просторових меж у роботі застосовано платформу Google Планета Земля. Шляхом перегляду в різних масштабах (рис.3.14 та рис.3.15) виконано візуальне зіставлення розподілу метану з елементами місцевості та визначено наближено регіональні межі.

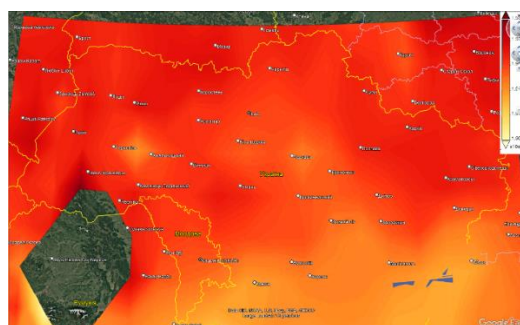


Рис.3.14. Геопросторовий розподіл концентрації метану [ppbV] над територією України за 2023 рік / день, візуалізація GOOGLE Планета Земля.

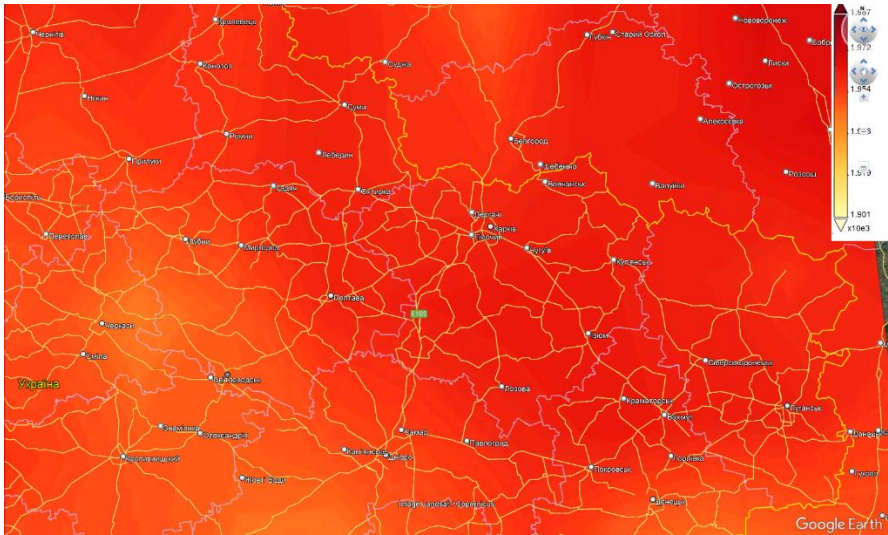


Рис.3.15. Регіональний геопросторовий розподіл концентрації метану [ppbV] за 2023 рік / день, візуалізація GOOGLE Планета Земля.

Визначені регіони з максимальними значеннями метану: Донецька область район Краматорськ, Черкаська область, Рівненська область, Львівська область, Івано-франківська область район Яремче, Вінницька та Волинська області.

В таблиці 3.7 наведені викиди метану Порівняння з даними Державної служби статистики викиди метану по регіонам, показало співпадіння по 5 областям.

Таблиця 3.7

Викиди метану в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів за регіонами у 2023 р. (за даними Державної служби статистики)

	Кількість викидів метану, тонн	Кількість підприємств, які мали викиди метану, одиниць
Дніпропетровська	137860	254
Донецька	95113	50
Львівська	29117	235
Одеська	21732	151
Черкаська	14012	280
Вінницька	9673	239
Київська	7794	226
Чернігівська	7670	196
Івано-Франківська	5683	104
Херсонська	5230	13

Полтавська	3792	292
Сумська	3141	174
Харківська	2730	240
Тернопільська	2041	169
Хмельницька	1809	160
Миколаївська	1696	159
Житомирська	1633	150
Кіровоградська	1411	134
Волинська	982	124
Закарпатська	973	62
Рівненська	296	112
м.Київ	250	169
Запорізька	147	70
Чернівецька	108	53
Луганська	0.2	1

Порівняння отриманих даних візуального розподілу та статистичних показало приблизно співпадіння по областях: Донецька, Львівська, Черкаська, Вінницька, Івано-Франківська.

В розділі отримано концентрації парникових газів над територією України виконано на основі даних платформи NASA Giovanni. За допомогою інструментів платформи сформовано річні часові ряди із просторовим усередненням. Розраховано середньорічні значення над Україною, які співставлені з еталонним глобальним значення від Всесвітньої метеорологічної організації. Проведено кореляційний аналіз описової моделі, результати співставлено зі значення CO₂ за даними Глобальної лабораторії моніторингу Національного управління океанічних та атмосферних досліджень (NOAA GLM).

Сформовано карти просторового розподілу CO₂ за 2020 та 2021 роки над територією України, значення CO₂ в межах регіонів змінюються в дуже вузьких межах. Такий малий розкид свідчить, що просторові відмінності CO₂ між областями в межах наведеної вибірки є переважно фоновими, а отже прямий статистичний зв'язок із регіональними емісіями може бути слабким або не проявлятися через вплив атмосферного перенесення та усереднення.

Проведено аналіз кількості підприємств та емісії CO₂ за регіонами, використовуючи дані Державної служби статистики України. Розподіл емісій є різко неоднорідним: найбільші значення характерні для промислових регіонів. Зв'язок між концентрацією CO₂ та емісіями є слабким і статистично невираженим, що пояснюється дуже малим просторовим розкидом CO₂ на фоні великого розкиду емісій.

Отримано вихідні дані для зміни концентрації метану за 2020-2025 року, побудовано просторовий розподіл метану 2023. На їх основі розраховані середньорічні значення вдень та вночі, які співставлено з глобальними середніми значеннями Всесвітньої метеорологічної організації за відповідний період та емісія метану в атмосферне повітря за даними Державної статистичної служби України. Розходження між денним і нічним рядами та їх відмінність від глобального фону доцільно інтерпретувати обережно, враховуючи вплив умов спостережень, атмосферного переносу та те, що річні значення є результатом усереднення сезонно змінного сигналу.

ВИСНОВКИ

В структурі глобальний моніторинг парникових газів сформовано багаторівневу мережу спостережень (атмосферні, наземні, океанічні, супутникові та модельні дані), а ключові міжнародні структури зближують методології, що спрощує порівняння результатів між країнами. Наземні довгострокові ряди залишаються «еталоном» трендів, оскільки забезпечують стабільність і дозволяють відокремлювати природну мінливість від антропогенного сигналу; супутникові місії доповнюють їх високою просторовою деталізацією та можливістю виявляти локальні «гарячі точки». Відкритість даних, стандартизація та координація, адже саме вони визначають здатність точно оцінювати масштаби змін клімату й контролювати результативність заходів зі скорочення антропогенних викидів.

За досліджений період над територією України отримано часові ряди даних та просторові карти розподілу для вуглекислого газу та метану інструментами платформи Giovanni. Просторовий аналіз показав наявність локальних епіцентрів підвищених концентрацій метану, регіони яких були ідентифіковано інструментами Google Earth.

Визначено середньорічні концентрації парникових газів, проведено статистичне порівняння з глобальними показниками від Всесвітньої метеорологічної організації та Глобальної лабораторії моніторингу Національного управління океанічними та атмосферними дослідженнями, викидами від Державної служби статистики України. Кореляція між концентраціями та викидами не є прямим доказом причинно-наслідкового зв'язку. Мольна фракція формується під впливом атмосферного переносу, циркуляції, вертикального перемішування, фотохімічних процесів окиснення та транскордонного фону, тоді як статистика відображає національні сумарні викиди й не враховує метеорологічно зумовлену змінність концентрацій. Тому результати кореляції доцільно інтерпретувати як перевірку узгодженості

напрямків міжрічних змін та як підґрунтя для подальших моделей із урахуванням метеорологічних показників і переносу.

Встановлено тренд на збільшення концентрації вуглекислого газу та метану на рівні країни, що узгоджується з загальним трендом глобальних фонових значень. В той самий час, спостерігається зменшення викидів вуглекислого газу та метану підприємствами країни.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання їх для освітнього процесу, регіональних природоохоронних стратегій, систем моніторингу атмосферного повітря та формування інструментів державної кліматичної політики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Loeb N. G., Johnson G. C., Thorsen T. J. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate. *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. Is.13. e2021GL093047.
2. Loeb N. G., Ham S. H., Allan R. P. та ін. Observational assessment of changes in Earth's energy imbalance since 2000. *Surveys in Geophysics*. 2024. Vol. 45. P. 1757–1783.
3. Jones R. N., Ricketts J. H. Regime Change in Top of the Atmosphere Radiation Fluxes: Implications for Understanding Earth's Energy Imbalance. *Climate*. 2025. Vol. 13, No. 6. Art. 107.
4. Hodnebrog Ø., Myhre G., Jouan C. та ін. Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance. *Communications Earth & Environment*. 2024. DOI: 10.1038/s43247-024-01324-8.
5. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021.
6. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K. E. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2020. Vol. 37. P. 137–142.
7. Schneider T., Kaul C. M., Pressel K. G. Possible Climate Transitions from Breakup of Stratocumulus Decks under Greenhouse Warming. *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. P. 163–167.
8. UNFCCC. National Inventory Submissions 2024. Bonn : UNFCCC Secretariat. URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024>.
9. Greenhouse gas. *Encyclopaedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas>.
10. Greenhouse effect. *Encyclopaedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-effect>.

11. Nunes L. J. R. The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. *Environments*. 2023. Vol. 10, No. 4.
12. Stavi I. Urgent reduction in greenhouse gas emissions. *Climate and Development*. 2023. *ALL EARTH*, 2023. V. 35, N. 1, 2178127.
13. World Meteorological Organization. *Greenhouse Gas Bulletin*. Geneva : WMO, 2021. URL: <https://public.wmo.int/en/resources/library/greenhouse-gas-bulletin>
14. Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schädel C. et al. Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. *Nature*. 2015. Vol. 520, No. 7546. P. 171–179.
15. Natali S. M., Hicks Pries C. E., Schuur E. A. G. et al. Large Loss of CO₂ in Winter Observed across the Northern Permafrost Region. *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 852–857.
16. World Meteorological Organization. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20 (concentrations through 2023). Geneva: WMO, 2024. URL: <https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-20>.
17. Saunois M. et al. Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17. Is.5– P. 1873–1958.
18. Lin X. et al. A Comparative Study of Anthropogenic Methane Emissions over China Based on TROPOMI and Bottom-Up Inventories. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. P. 1073–1088.
19. Тимощук О. А., Тимощук О. Б., Матвійчук Б. В. Викиди парникових газів від сільськогосподарської діяльності та їх динаміка протягом 1990–2020 років. *Український журнал природничих наук*. 2022. № 1. С. 174–186.
20. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Національний інвентаризаційний звіт України про антропогенні викиди із джерел та абсорбцію поглиначами парникових газів за 1990–2021 роки (NIR 2023)*. Київ, 2023.
21. Y. Wei, X. Yang, Y. Jia. Study of Atmospheric CH₄, CO₂ and N₂O at Waliguan WMO/GAW Global Station. *Atmospheric Environment*. 2025. V. 343. Art. 120994.
22. Y. Bennouna, H. J. Eskes, M. Kouyate, B. Langerock, I. Pison, M. Ramonet, A. Tsikerdekis, T. Warneke, Validation report for the EGG4 version 2 global

- reanalysis: 2003-2023, Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) report, CAMS2_82_2023SC2_D82.4.2.2-2024.pdf, May 2024. doi:10.24380/jcyt-ppgt
23. Bellouin N., Forster P. M., Gryspeerdt E. та ін. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. *Reviews of Geophysics*. 2020. Vol. 58. e2019RG000660. DOI: 10.1029/2019RG000660.
 24. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report (AR6). 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
 25. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report (AR6). 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
 26. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report (AR6 SYR). 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
 27. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
 28. IPCC. Global Warming of 1.5°C. IPCC Special Report (SR15). 2018. URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
 29. UNFCCC. National Inventory Submissions 2023 (GHG inventories of Annex I Parties). 2023. URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>.
 30. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
 31. UNFCCC. The Paris Agreement. 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
 32. EEA. Greenhouse gas – data viewer. 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
 33. EEA. Trends and projections in Europe 2024. 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2024>

34. Copernicus Climate Change Service (C3S); ECMWF. Climate Indicators: Greenhouse Gases. 2024. URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators>.
35. CAMS global inversion optimised greenhouse gas fluxes and concentrations. URL: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-greenhouse-gas-inversion>
36. European Space Agency. Sentinel-5P Mission Status Report 140 : Reference period 01–15 August 2023. 2023. URL: <https://sentiwiki.copernicus.eu/>
37. NASA Jet Propulsion Laboratory. Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3): Publications. URL: <https://ocov3.jpl.nasa.gov/science/publications/>
38. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). GOSAT Project (Greenhouse Gases Observation from Space). URL: <https://earth.jaxa.jp/en/research/projects/gosat/index.html>
39. NOAA Global Monitoring Laboratory. *Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆*. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
40. European Commission, Joint Research Centre (JRC). *EDGAR v7.0 Greenhouse Gas Emissions (dataset_ghg70)*. URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg70
41. World Bank. *About the Indicators API Documentation*. URL: <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/889392-about-the-indicators-api-documentation>
42. World Bank. *CO₂ emissions (kt) (EN.ATM.CO2E.KT): metadata glossary*. URL: <https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/EN.ATM.CO2E.KT>
43. World Bank. *Methane emissions (kt of CO₂ equivalent) (EN.ATM.METH.KT.CE): metadata glossary*. URL: <https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/EN.ATM.METH.KT.CE>
44. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M. W. та ін. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15. P. 5301–5369.

45. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. *Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022 : National Inventory Report*. Kyiv, 2024. 581 p.
46. Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища в Україні за 2023 рік. Київ, 2023.
47. Державна служба статистики України. Довкілля України. 2022 : статистичний збірник. Київ, 2023. 142 с.
48. Держстат України. Про затвердження Методики розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від використання палива на побутові потреби в домогосподарствах : наказ від 22.04.2011 № 98. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0670-11#Text>
49. Тимощук О. А., Тимощук О. Б., Матвійчук Б. В. Викиди парникових газів від сільськогосподарської діяльності та їх динаміка протягом 1990–2020 років. Український журнал природничих наук. 2022. № 1. С. 174–186.
50. Лялько В. І., Апостолов О. А., Єлістратова Л. О., Артеменко І. Г. Аналіз залежності між концентрацією CO₂ в атмосфері та температурою повітря для дослідження та прогнозування кліматичних змін в Україні. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2016. № 10. С. 17–20.
51. Лялько В. І. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки (Передмова, розділ 1). Український журнал дистанційного зондування Землі. 2014. № 3. С. 59–77.
52. Валерко Р. А. Тенденції викидів діоксиду вуглецю як чинника кліматичних змін в атмосферне повітря Житомирської області від стаціонарних джерел та прогнозування їх обсягів. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. № 3. С. 49–58.
53. Leshchenko I. Estimates of methane emissions in the oil-and-gas industry of Ukraine: problems and world experience in their solution. Science and Innovation. 2021. Vol. 17, No. 3. P. 37–48.

54. Лещенко І. Ч. Оцінка зниження викидів парникових газів вугільним сектором України для виконання міжнародних кліматичних угод. Проблеми загальної енергетики. 2022. Вип. 1–2 (68–69). С. 139–149.
55. Кривенко Г. М. Аналіз викидів парникових газів у атмосферне повітря об'єктами нафтогазового комплексу. Екологічна безпека та збалансоване природокористування. 2020. Т. 11, № 2(22). С. 48–57.
56. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V.146. Is.730. P. 1999-2045/
57. Bezyk Y. GIS-Based Approach to Spatio-Temporal Interpolation of Atmospheric CO₂ Concentration. Atmosphere. 2021. Vol. 12(3). 384.
58. Hoyer S., Hamman J. xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python. Journal of Open Research Software. 2017. Vol. 5(1). 10.
59. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
60. Google Earth Engine. Sentinel-5P OFFL CH₄ (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4). URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4.
61. Zhang J. et al. The Spatial and Temporal Distribution Patterns of XCH₄ in China: New Insights from TROPOMI Observations. Atmosphere. 2022. Vol. 13(2). 177.
62. Wunch D. et al. Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON. Atmospheric Measurement Techniques. 2017. Vol. 10. P. 2209–2238.
63. Lorente A. et al. Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V.14. Is.1. P. 665-684.
64. Balasus N. et al. A blended TROPOMI+GOSAT satellite data product for atmospheric methane using machine learning to correct retrieval biases. Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3787–3810.
65. Hirsch R. M., Slack J. R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. Water Resources Research. 1984. Vol. 20(6). P. 727–732.

66. Allen M. R., Shine K. P., Fuglestvedt J. S., Millar R. J., Cain M., Frame D. J., Macey A. H. A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2018. Vol. 1, no. 1. Art. 16.
67. Cain M., Lynch J., Allen M. R., Fuglestvedt J. S., Frame D. J., Macey A. H. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2019. Vol. 2. Art. 29.
68. Lynch J., Cain M., Pierrehumbert R., Allen M. Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants. *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15, no. 4. 044023.
69. Balcombe P., Speirs J. F., Brandon N. P., Hawkes A. D. Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2018. Vol. 20, no. 10. P. 1323–1339.
70. Megill L., Deck K., Grewe V. Alternative climate metrics to the Global Warming Potential are more suitable for assessing aviation non-CO₂ effects. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5, no. 1. Art. 249.
71. Zieger V., Lecompte T., He Y. Climate change metrics: bridging IPCC AR6 updates and dynamic life cycle assessments. *Earth System Dynamics Discussions (EGUsphere preprint)*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2442>
72. Hodnebrog Ø., Aamaas B., Fuglestvedt J. S. Updated Global Warming Potentials and Radiative Efficiencies of Halocarbons and Other Weak Atmospheric Absorbers. *Reviews of Geophysics*. 2020. Vol. 58, no. 3. e2019RG000691.
73. Mathew N., Somanathan A., Tirpude A., Arfin T. The impact of short-lived climate pollutants on the human health. *Environmental Pollution and Management*. 2024. Vol. 1. P. 1–14.
74. Hörtenhuber S., Seiringer M., Theurl M., Größbacher V., Piringer G., Kral I., Zollitsch W. Implementing an appropriate metric for the assessment of greenhouse gas emissions from livestock production: a national case study. *Animal*. 2022. Vol. 16, no. 10. Art. 100638.

75. Bong C. P. C., Lim L. Y., Ho W. S., Lim J. S., Klemeš J. J., Towprayoon S., Ho C. S., Lee C. T. A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 146. P. 149–157.
76. Zhang X., Xu X., Liu Y., Wang J., Xiong Z. Global warming potential and greenhouse gas intensity in rice agriculture driven by high yields and nitrogen use efficiency. *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13, no. 9. P. 2701–2714.
77. NASA GES DISC. Giovanni (The Bridge Between Data and Science). Greenbelt, MD : NASA. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
78. John P. O'Connor. Modeling of Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) Concentrations as a Function of Fossil-Fuel and Land-Use Change CO₂ Emissions Coupled with Oceanic and Terrestrial Sequestration. *Climate*. 2020. Vol. 8, No. 5. Art. 61. <https://doi.org/10.3390/cli8050061>
79. Lan, X., Tans, P. and K.W. Thoning: Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-12 <https://doi.org/10.15138/9n0h-zh07>
80. Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky: Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-12, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
81. Dlugokencky, E. J., L. P. Steele, P. M. Lang and K. A. Masarie. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research*, 1994. 99. D8. 17. doi:10.1029/94JD01245
82. Masarie, K. A., P. P. Tans. Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1995. 100, D6, 11593-11610.

АНОТАЦІЯ

В роботі досліджено просторово-часовий розподіл парникових газів над територією України та співставлено регіональні оцінки з глобальним фоном.

Узагальнено теоретичні основи енергетичного балансу Землі та парникового ефекту, проаналізовано міжнародні й національні ініціативи моніторингу та обґрунтовано джерельну базу для порівняння даних і перехресної верифікації результатів. Вихідні просторово-часові дані отримано та опрацьовано у NASA Giovanni: сформовано річні часові ряди зі просторовим усередненням у межах України і побудовано карти розподілу. Локальні зони підвищених значень уточнено за допомогою Google Earth. Глобальний тренд оцінено за даними NOAA Global Monitoring Laboratory; середньорічні значення над Україною співставлено з глобальними середніми показниками ВМО та зі статистикою викидів за даними Держстату України.

Сформовано часові ряди вуглекислого газу за 2016–2021 рр. і метану за 2020–2024 рр.; побудовано карти CO₂ за 2020–2021 рр. і CH₄ за 2023 р. Показано, що просторові відмінності вуглекислого газу між регіонами в межах вибірки є фоновими, зв'язок «концентрація—викиди» слабкий і статистично невиражений, що узгоджується з впливом атмосферного перенесення, перемішування та транскордонного фону. Для метану виявлено локальні «епіцентри» підвищених концентрацій; розбіжності денних і нічних річних значень інтерпретовано з урахуванням умов спостережень, сезонності та атмосферного перенесення.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання в освітньому процесі, для вдосконалення регіональних природоохоронних стратегій, розвитку систем моніторингу атмосферного повітря та формування інструментів державної кліматичної політики.

Ключові слова: парникові гази, вуглекислий газ, метан, Україна, просторовий аналіз, NASA Giovanni.

ABSTRACT

This study investigates the spatiotemporal distribution of greenhouse gases over Ukraine and compares regional estimates with the global background.

The theoretical foundations of the Earth's energy balance and the greenhouse effect are summarized; international and national monitoring initiatives are reviewed; and the information base is substantiated to enable data comparison and cross-verification of results. Primary spatiotemporal data were obtained and processed using the NASA Giovanni platform: annual time series with spatial averaging for Ukraine were generated, and distribution maps were produced. Local areas with elevated values were refined using Google Earth. The global trend was assessed based on data from the NOAA Global Monitoring Laboratory; annual mean values for Ukraine were compared with global mean indicators from the World Meteorological Organization (WMO) and with emissions statistics from the State Statistics Service of Ukraine.

Time series of carbon dioxide for 2016–2021 and methane for 2020–2024 were compiled; CO₂ maps for 2020–2021 and a CH₄ map for 2023 were produced. The results show that spatial differences in carbon dioxide concentrations among regions within the sample are predominantly at background levels; the “concentration–emissions” relationship is weak and not statistically significant, which is consistent with the effects of atmospheric transport, mixing, and the transboundary background. For methane, local “epicenters” of elevated concentrations were identified; differences between daytime and nighttime annual values were interpreted with regard to observation conditions, seasonality, and atmospheric transport.

The practical significance of the results lies in their potential use in education, in improving regional environmental protection strategies, in developing ambient air monitoring systems, and in shaping instruments of national climate policy.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, methane, Ukraine, spatial analysis, NASA Giovanni.