

ІНВЕРСІЙНІ МЕТОДИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ МЕТАНУ В УКРАЇНІ

А. О. Бараніченко¹, А. В. Колотій^{1,2}, А. Ю. Шелестов^{1,2}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України

Анотація

Найбільшою складністю в оцінці викидів метану в Україні є дискретність та неповнота даних інвентаризацій, що призводить до недооцінки регіональних та локальних джерел. У статті запропоновано підхід до інтегрованого інверсійного моделювання викидів метану на базі супутникових спостережень TROPOMI/Sentinel-5P та хмарної платформи Amazon Web Services із використанням моделі Integrated Methane Inversion. Проведено повноцінні інверсії для трьох етапів: довоєнного періоду, початку повномасштабної війни та періоду продовження воєнних дій у 2023 році по всій території України з роздільною здатністю $0,25^\circ \times 0,3125^\circ$, які дозволили виміряти як загальну кількість викидів, так і по секторам. Отримані апостеріорні оцінки виявилися в цілому вищими за офіційні дані подані Україною в Національному звіті інвентаризації викидів за Рамковою конвенцією ООН зі зміни клімату (UNFCCC), що може свідчити про систематичну недооцінку реальних викидів у традиційних методиках та підкреслює необхідність їх подальшої верифікації. Показано, що запропонований інверсійний підхід забезпечує високу просторову деталізацію та може стати ефективним інструментом для моніторингу та коригування національних інвентаризацій викидів метану.

Ключові слова: інверсійне моделювання, метан, супутникові дані, хмарні технології

Вступ

Оцінки викидів парникових газів мають великий вплив на глобальне потепління, а їх моніторинг стає основним питанням кліматичної політики. Україна, яка бере участь в різних міжнародних ініціативах, в тому числі і зі скорочення викидів, стикається з низкою викликів у точності оцінки. Інвентаризації викидів, побудовані на традиційних методах, переважно заснованих на підходах IPCC Tier 1, Tier 2, Tier 3 [1] та розрахункових формулах з узагальненими даними, часто не враховують регіональні особливості, через що офіційні звіти відрізняються від фактичних емісій. Залучення супутникового моніторингу та інверсійних алгоритмів відкриває можливості для більш точного вимірювання, але стикається з низкою технічних і методологічних викликів. У цій роботі розглядаються сучасні наукові підходи до оцінки метанових викидів, зосереджені на інтеграції супутникових даних та вдосконалених інверсійних моделей.

Метан (CH_4) є потужним парниковим газом із потенціалом глобального потепління у приблизно 30 разів вищим, ніж у вуглекислого газу (CO_2), за 100-річний період, попри його коротший час перебування в атмосфері – приблизно 10 років [2]. Скорочення викидів метану є критично важливим для пом'якшення змін клімату у короткостроковій перспективі. В Україні, де основними джерелами викидів є енер-

гетичний сектор, сільське господарство та сектор управління відходами [3], точна оцінка викидів метану необхідна для виконання міжнародних кліматичних зобов'язань, таких як Глобальна ініціатива зі скорочення викидів метану (Global Methane Pledge), яка ставить за мету скоротити викиди на 30% до 2030 року [1]. Незважаючи на важливість метану у глобальних кліматичних процесах, сучасні коливання його світового балансу залишаються недостатньо вивченими. Інверсійні моделі для оцінки потоків CH_4 на поверхні Землі можуть дати більш точні результати за умови поєднання розрідженої, але високоточної мережі наземних вимірювань із безперервними глобальними супутниковими спостереженнями, якщо останні відповідають вимогам точності.

1. Підходи до моніторингу викидів метану

У сучасній практиці моніторингу парникових газів поєднують два основні підходи: bottom-up («висхідний») та top-down («низхідний») інверсії. Перший базується на інвентаризації джерел і емпіричних коефіцієнтах викидів, проте має низку обмежень у вигляді розрідженості даних по регіонах, застарілої баз і нездатності врахувати спорадичні викиди. Зворотний підхід використовує спостереження за концентраціями метану в атмосфері, що дає змо-

гу оцінювати емісії на регіональному й навіть локальному рівнях незалежно від повноти первинної інформації.

Однією з найпоширеніших технологій низхідного підходу є інверсійне моделювання за даними супутникових спектрометрів (наприклад, TROPOMI на платформі Sentinel-5P) [4]. Дані спектрометри забезпечують щоденне глобальне покриття з просторовою роздільною здатністю порядку $5,5 \times 7 \text{ км}^2$, що дає змогу виявляти локальні осередки підвищених концентрацій метану. У міжнародній практиці для розв'язання зворотної задачі використовують як детерміновані алгоритми оптимальної оцінки, так і байєсівські статистичні методи [5].

Проте більшість опублікованих робіт стосуються глобальних чи континентальних масштабів [1]. Регулярні дослідження на рівні окремих країн, особливо з періодичністю в пару місяців, досі поодинокі. У випадку України лише кілька робіт частково використовували top-down інверсію для оцінки викидів, наприклад, для оксидів азоту (NO) [6].

Саме це й визначає мету теперішньої роботи: адаптувати та оцінити ефективність методу Integrated Methane Inversion (IMI) для детальної просторово-часової оцінки викидів метану в межах України. Головні завдання включають порівняння отриманих апостеріорних емісій із національними інвентарними даними та їх аналіз.

2. Integrated Methane Inversion

IMI розроблено як програмний інструмент з відкритим вихідним кодом для використання у хмарному середовищі або на локальних кластерах, що дозволяє оцінювати викиди метану за допомогою супутникових даних TROPOMI та хімічно-транспортної моделі GEOS-Chem [7], що виступає у ролі прямого (forward) моделювання атмосферного перенесення. Дані TROPOMI використовуються з останньої операційної версії, розміщеної на AWS (наразі версія v02.06.00). Дані фільтруються для видалення результатів зі значенням показника якості $QA \leq 0.5$ (даний параметр – це безрозмірне число від 0 до 1, яке відображає ступінь «придатності» даних: облік хмарності, орієнтації сонця, ефектів відбиття поверхні та алгоритмічних попереджень; зазвичай залишають тільки пікселі з $QA \geq 0.5$), «водяних» пікселів та пікселів, розташованих південніше від 60° південної широти.

GEOS-Chem – це глобальна тривимірна хімічно-транспортна модель, яка може працювати в регіональному режимі з роздільною здатністю до $0.25^\circ \times 0.3125^\circ$, використовуючи архівовані метеорологічні дані з NASA Goddard Earth Observing System – Fast Processing (GEOS-FP) та набору даних MERRA-2 [8, 9]. У IMI використовується класична версія GEOS-Chem (GEOS-Chem Classic) з паралелізацією на основі спільного доступу до пам'яті. Для забезпечення узгодженості між моделлю та спостереженнями TROPOMI у межах області інверсії використовуються «згладжені» поля TROPOMI як крайові

умови для GEOS-Chem [10, 11].

IMI проводить інверсійний аналіз викидів метану на вихідній сітці GEOS-FP роздільної здатності $0.25^\circ \times 0.3125^\circ$ (або, альтернативно, на сітці MERRA-2 з роздільною здатністю $0.5^\circ \times 0.625^\circ$) для періоду спостережень TROPOMI від травня 2018 року до сьогодення. Користувачі виконують інверсії, заповнюючи простий конфігураційний текстовий файл (у форматі YAML), де задають область та період дослідження. Область може бути визначена як прямокутна (за межами широти та довготи) або за допомогою «шейп-файлу» (shapefile) з довільною геометрією. Вектор стану, оптимізований за допомогою інверсії, складається з середніх часових викидів за період інтересу в окремих клітинках сітки викидів (включаючи викиди у відкритому морі), а також з додаткових буферних кластерів, що оточують досліджувану область з метою корекції крайових умов. Априорні оцінки для інверсії надходять із стандартної бібліотеки IMI, яка містить дані про викиди, розраховані за методом bottom-up («знизу вгору»), проте користувачу надається можливість підставити свої власні дані. Завдяки сумісності з хмарними технологіями, IMI дозволяє користувачам використовувати величезні обчислювальні ресурси AWS для проведення інверсій без необхідності організовувати локальний обчислювальний кластер. Система використовує дані, які вже знаходяться у хмарі, зокрема спостереження TROPOMI, згладжені поля TROPOMI, що застосовуються як крайові та початкові умови для інверсії, метеорологічні набори даних GEOS-FP і MERRA-2, а також дані про викиди, отримані за методом bottom-up.

IMI використовує метод баєсівської аналітичної інверсії для оптимізації вектору стану викидів x (двовимірні сіткові потоки) шляхом мінімізації функції витрат $J(x)$:

$$J(x) = (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + \gamma (y - Kx)^T S_o^{-1} (y - Kx),$$

де x_a – початкова оцінка викидів (prior), y – вектор спостережень, S_a – коваріаційна матриця похибок априорних оцінок, S_o – коваріаційна матриця похибок спостережень, K – матриця Якобі, що описує чутливість прямої моделі до змін у викидах, а $\gamma \in [0, 1]$ – параметр регуляризації для компенсації не врахованих коваріаційних похибок у системі спостережень. Оптимізовані викиди $\hat{x}$ (тобто, апостеріорна оцінка) отримуються шляхом аналітичного розв'язання мінімуму функції витрат, де $\delta J / \delta x = 0$:

$$\hat{x} = x_a + (\gamma K^T S_o^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} \gamma K^T S_o^{-1} (y - Kx_a).$$

Оскільки залежність між викидами та концентраціями є лінійною, матриця K повністю визначає пряму модель (forward model) для цілей інверсії. Вона формується по стовпцях шляхом запуску незалежно паралельних пертурбаційних симуляцій із застосуванням малих імпульсних змін у прямій моделі GEOS-Chem.

Однією з основних переваг аналітичного розв'язання є можливість отримання замкнутого виразу для

коваріаційної матриці похибок апостеріорної оцінки $\hat{S}$:

$$\hat{S} = (\gamma K^T S_o^{-1} K + S_a^{-1})^{-1}.$$

Матриця $\hat{S}$ характеризує похибку в $\hat{x}$, а порівняння її із S_a дозволяє оцінити інформаційний вклад спостережень у процесі інверсії. З матриці $\hat{S}$ формується також матриця середнього ядра (averaging kernel matrix) A , яка визначається як $A = d\hat{x}/dx = I - \hat{S}S_a^{-1}$. Вона характеризує чутливість інверсійного розв'язку до істинного стану. Сума діагональних елементів матриці A визначає кількість незалежних інформаційних компонентів, які спостереження можуть надати (DOFS – degrees of freedom for signal), а окремі діагональні елементи $a_{ii} = d\hat{x}_i/dx_i$, що знаходяться в межах $[0, 1]$, вимірюють, наскільки викид у відповідній клітинці сітки оптимізується за рахунок спостережень, а не попередньої оцінки (повністю, якщо $a_{ii} = 1$, і зовсім не оптимізується, якщо $a_{ii} = 0$).

Ще однією перевагою аналітичного розв'язку є те, що після побудови матриці K можна досить легко генерувати ансамблі інверсій для дослідження чутливості до різних параметрів інверсії. Для регіональних інверсій важливими є незміщені граничні умови, адже упередженість у крайових умовах може передаватися у оптимізовані викиди в межах області інверсії. У ІМІ зберігається глобальний тривимірний архів коригованих за упередженнями полів GEOS-Chem (так званих «згладжених» полів TROPOMI), які використовуються як незміщені крайові умови для будь-якої області або періоду інверсії TROPOMI. Архів формується шляхом корекції глобальної неперервної симуляції GEOS-Chem, виконаної з роздільною здатністю $4^\circ \times 5^\circ$, використовуючи згладжені концентрації TROPOMI (просторово $12^\circ \times 15^\circ$ та часово ± 15 днів) з подальшим застосуванням зональних середніх поправок над океанами. У ІМІ крайові умови додатково коригуються в процесі інверсії за допомогою буферних груп клітинок сітки, що оточують область інтересу.

ІМІ містить функцію попереднього перегляду (preview), яка дозволяє швидко оцінити інформаційний вміст та обчислювальні витрати запланованої інверсії перед тим, як інвестувати ресурси у повномасштабний розрахунок. Функція попереднього перегляду генерує карти середніх концентрацій TROPOMI, просторову щільність спостережень, апіорні оцінки викидів, оцінки чутливості матриці середнього ядра та значення SWIR (short-wavelength infrared) альбеда для обраного періоду та області інверсії, а також приблизну оцінку вартості розрахунків у хмарі (рис. 1). Оцінка чутливості матриці середнього ядра (a_{ii}) та $DOFS = \sum_i a_{ii}$ проводиться без виконання самої інверсії, за умови рівномірності спостережень та використання спрощеної схеми транспортування:

$$a_{ii} = \frac{\sigma_{a_i}^2}{\sigma_{a_i}^2 + \frac{(\sigma_o/k)^2}{m/n}},$$

де σ_a – стандартне відхилення похибки апіорної оцінки для елемента x_a , σ_o – стандартне відхилення

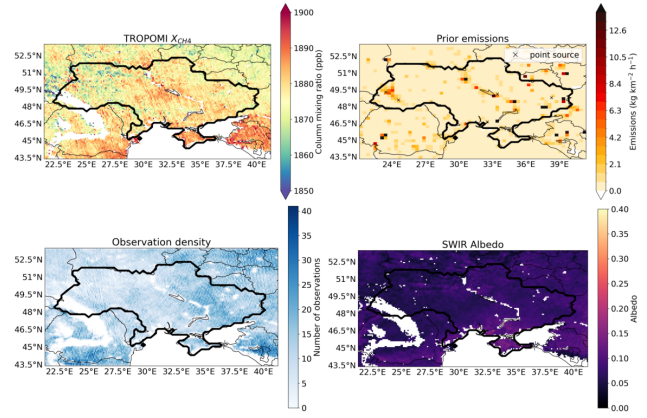


Рис. 1. Згенеровані карти в preview зі значенням $DOFS = 6.24814$

похибки спостереження, m – кількість супутникових спостережень у досліджуваній області, n – кількість елементів вектора стану, а k – коефіцієнт, що зв'язує CH_4 з локальними викидами за допомогою простого адвекційно-дифузійного формулювання. Отримане значення $DOFS$ дає змогу оцінити, наскільки обрана конфігурація інверсії здатна точно оцінити викиди, і дозволяє користувачам модифікувати область або період інверсії для покращення цієї здатності [12].

3. Аналіз результатів та їх порівняння

Застосування інверсійної моделі ІМІ для території України дозволило отримати просторово-часові оцінки викидів метану за різні сезони 2021-2023 років. Нижче представлено аналіз отриманих результатів, та порівняння апостеріорних оцінок з цифрами поданими Україною в офіційному Національному звіті інвентаризації викидів за Рамковою конвенцією ООН зі зміни клімату (UNFCCC) [13], а також інтерпретацію виявлених закономірностей.

Перед проведенням експериментів було вирішено розбити спостереження у часі на 3 етапи: довоєнний, початок повномасштабного вторгнення та продовження бойових дій, щоби дізнатись як вплинув конфлікт на викиди метану в Україні. Відповідно було прийнято рішення обрати різні сезони і місяці для цього. Вибір двомісячних інтервалів пояснюється з трьох причин. По-перше, компроміс між часовою деталізацією й надійністю статистики. За такий період у кожній клітинці TROPOMI накопичується достатня кількість якісних спостережень, що дозволяє згладити випадкові пропуски через хмарність чи технічні збої та отримати стабільне середнє колонкове значення метану. По-друге, обчислювальна вартість проведення інверсії зростає нелінійно із довжиною періоду, а двомісячний інтервал дозволяє зберегти баланс між роздільною здатністю й ресурсними витратами. По-третє, такий вибір забезпечує порівнянність зимових та літніх сезонів при мінімізації сезонних упереджень у спектроскопічних даних. Через недостатню кількість спостережень у грудні 2021 р.–січні 2022 р. було замінено цей інтервал на ве-

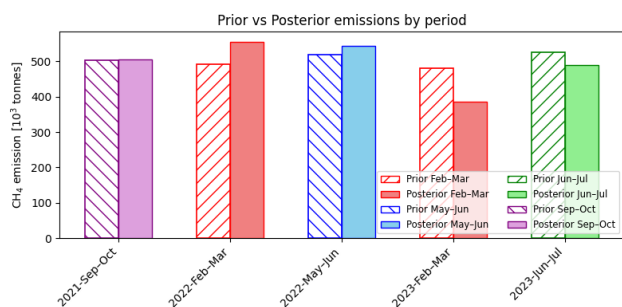


Рис. 2. Апріорні та апостеріорні оцінки

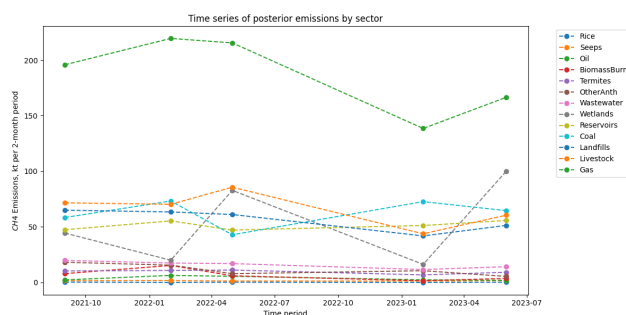


Рис. 3. Часовий ряд викидів по секторам

ресень–жовтень 2021 року. Крім того, було виділено двомісячні періоди лютий–березень та травень–червень 2022 року, щоб окремо оцінити перші місяці повномасштабної війни.

В ході досліджень було отримано загальні сезонні викиди (в $\text{кг} \times 10^3$) і з'ясовано їх апріорні (Prior) та апостеріорні (Posterior) оцінки.

В червні–липні 2021 року апріорна оцінка 532,7 тис. тонн була скоригована апостеріорно до 7,8 тис. тонн. Пояснення, такого падіння можна було б пояснити карантинними заходами під час пандемії COVID-19, однак навіть найжорсткіші локдауни не дали б змоги скоротити емісії настільки радикально, що скоріше свідчить про наявність артефактів, тому цей період в подальшому аналізі було відкинуто. У вересні–жовтні 2021 року апріорні 501,6 тис. тонн і апостеріорні 504,1 тис. тонн практично збіглися, що свідчить про стабільну роботу алгоритму при помірній хмарності. В перші місяці повномасштабного вторгнення (лютий–березень 2022) апостеріорні 555,2 тис. тонн перевищили апріорні 492,0 тис. тонн на 12,9%. Таке зростання свідчить не лише про систематичну недооцінку зимових викидів у звичайних методиках, а й про потужний вплив воєнного фактору: масове спалювання палива танками й бронетехнікою, інтенсивні логістичні колони та аварійні витоки з пошкоджених комунікацій підсилюють епізодичні емісії, які були відсутні в традиційних інвентаризаціях. Даний приклад демонструє, що лише інтегруючи у top-down моделі реалії бойових дій, можна отримати набагато точніший портрет справжніх зимових викидів метану. У травні–червні 2022 року апостеріорні 542,1 тис. тонн проти апріорних 518,7 тис. тонн (+4,6%) відобразили зростання викидів в активній фазі воєнного періоду. Для лютого–березня 2023 ро-

ку виявлено зниження апостеріорних оцінок до 384,8 тис. тонн (–19,9% від 480,6 тис. тонн), що корелює зі зменшенням промислової активності через триваючий конфлікт, а також активними ракетними ударами по українській енергетиці. Літо 2023 завершилося апостеріорною оцінкою 489,2 тис. тонн, що на 6,9% нижче апріорної 525,3 тис. тонн, відображаючи одночасний вплив сезонного спаду та економічних обмежень (рис. 2).

На розсіяному графіку співвідношення GEOS-Chem vs TROPOMI (рис. 4) коефіцієнт кореляції підвищився з 0,62 (Prior) до 0,67 (Posterior), середня систематична помилка змінилася з –3,45 ppb до +0,43 ppb, а RMSE зменшилася з 13,69 ppb до 12,55 ppb. Це підтверджує здатність інверсії зменшувати зміщення моделі щодо спостережень та підвищувати точність оцінок.

Секторний аналіз (рис. 3) виокремлює основні джерела емісій. Найбільший внесок робить видобувна галузь (Gas, Reservoirs, Coal) – у середньому 200–220 кт за двомісячний період у 2021–2022 роках із поступовим зниженням у 2023. Сільське господарство (Livestock) та природні джерела (Wetlands, Termites) забезпечують 40–80 кт, причому влітку 2023 спостерігається різке зростання викидів із боліт майже до 100 кт. Менші за масштабом, але суттєві спорадичні викиди від Wastewater і Oil реагують на оперативні технічні процеси й мають локальні максимуми у вересні–жовтні 2021 і лютий–березень 2022.

Показник DOFS (Degrees of Freedom for Signal) коливається від 8,6 до 12,4: найнижча ефективність інверсії (8,6) у лютому–березні 2023 обумовлена погіршенням покриття спостережень, а найвища (12,4) – у вересні–жовтні 2021 завдяки оптимальному співвідношенню кількості даних і змінності емісій.

У цілому, апостеріорні оцінки демонструють систематично вищі значення порівняно з офіційними даними UNFCCC, що вказує на недооцінку як зимових, так і літніх викидів у традиційних bottom-up підходах (табл. 1). Інверсійна модель ІМІ підтверджує свою придатність для деталізованого моніторингу, а виявлені розбіжності можуть слугувати основою для коригування національних інвентаризаційних методик.

Висновки

Проведене дослідження засвідчило, що традиційні «bottom-up» інвентаризації метанових викидів потребують суттєвого коригування з урахуванням місцевої специфіки: апостеріорні оцінки за допомогою Integrated Methane Inversion (IMI) виявили в середньому на 10–20% більші значення, ніж офіційні дані UNFCCC. Впровадження супутникового моніторингу TROPOMI у сполученні з моделлю GEOS-Chem дозволило виявити та усунути ці систематичні зсуви, підвищивши довіру до просторово-часових розподілів викидів.

Аналіз часового ряду викидів у період повномасштабного воєнного конфлікту продемонстрував помітний вплив бойових дій на екологічну ситуацію: у

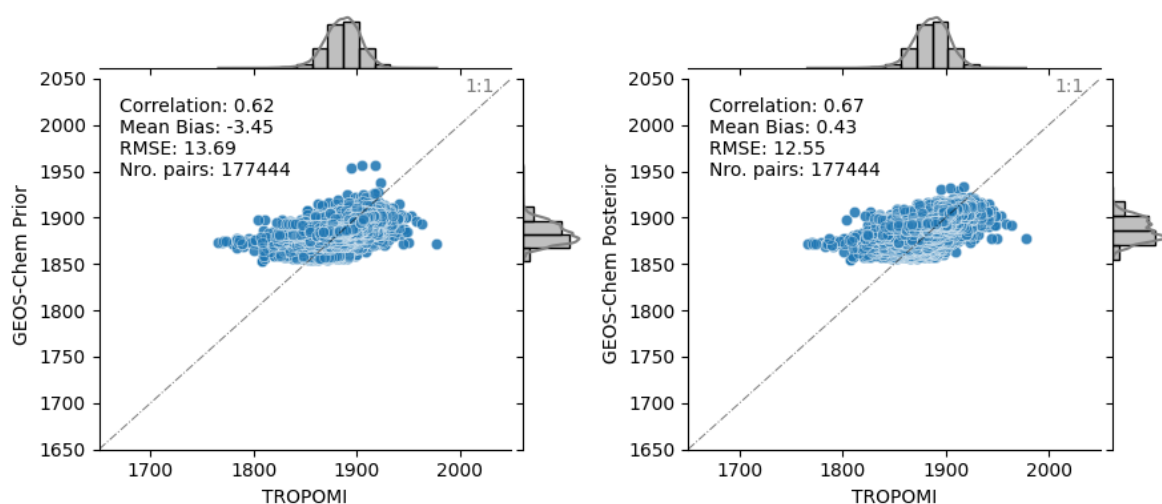


Рис. 4. Інверсія XCH_4 : TROPOMI vs GEOS-Chem

Таблиця 1. Апостеріорні оцінки викидів CH_4

Період спостережень	2021	2022	2023	2021	2022	2023
	тис. тонн (kt)			тис. тонн/рік (kt/y)		
Червень-Липень	N/A	N/A	489.204	N/A	N/A	2975.990
Вересень-Жовтень	504.063	N/A	N/A	3066.384	N/A	N/A
Лютий-Березень	N/A	555.237	384.755	N/A	3494.161	2421.305
Травень-Червень	N/A	542.140	N/A	N/A	3298.020	N/A
Avg (тис.тонн, kt)	504.063	548.688	436.980	3066.384	3396.091	2698.648
UNFCCC NIR (kt/y)	-	-	-	2 965.67	2390.62	2241.69

лютому–березні та травні–червні 2022 року апостеріорні викиди зросли відповідно на 12,9% та 4,6% порівняно з апіорними оцінками. Отримані дані підтверджують, що екстрені умови та аварійні викиди під час бойових дій відіграють неочевидну, але значну роль у загальному балансі CH_4 .

У розрізі секторів стало очевидно, що енергетичний сектор залишається домінантним джерелом метану, тоді як внесок інших галузей, зокрема сільського господарства та природних боліт, хоча й менший, суттєво зростає в літні місяці. Застосований підхід не лише підкреслює потребу в детальному картографуванні джерел, але й демонструє перевагу об'єднання розрідженої високоточної мережі наземних спостережень із безперервними супутниковими даними для досягнення оптимальної точності.

Загалом інтегрована інверсійна модель метану на базі хмарної платформи AWS показала високу ефективність у відновленні реальних потоків CH_4 і може стати ключовим інструментом для регулярного моніторингу викидів і коригування національних кліматичних звітів. Подальші дослідження варто спрямувати на вдосконалення граничних умов інверсії, розширення спектра супутникових джерел даних і застосування сучасних методів машинного навчання для швидшого оцінювання невизначеності.

Перелік використаних джерел

1. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press, 2023. — 2409 c.
2. *Vallero D. A.* Air Pollution Calculations: Quantifying Pollutant Formation, Transport, Transformation, Fate and Risks. — Elsevier, 03.05.2019. — 568 c. — ISBN 9780128149348. — URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128149348/air-pollution-calculations>.
3. *Leshchenko I. C.* Estimates of methane emissions in the oil-and-gas industry of Ukraine: problems and world experience in their solution // Science and Innovation. — 2021. — Т. 17, № 3. — С. 37—48. — DOI: [10.15407/scine17.03.037](https://doi.org/10.15407/scine17.03.037). — URL: <https://doi.org/10.15407/scine17.03.037>.
4. *TROPOMI Mission Performance Center, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)*. TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI): Observing Our Future. — 2025. — URL: <https://www.tropomi.eu/> (дата зверн. 12.05.2025) ; Accessed 12 May 2025.

5. Mallet V., Sportisse B. Air quality modeling: From deterministic to stochastic approaches // *Computers & Mathematics with Applications*. — 2008. — Т. 55, № 10. — С. 2329—2337. — DOI: [10.1016/j.camwa.2007.11.004](https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.004). — URL: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2007.11.004>.
6. Satellites reveal a 28% drop in Ukraine's Nitrogen oxides emissions during the Russia-Ukraine war in 2022 / Y. Mao, W. Ju, H. Wang, L. Liu, H. Wang, S. Feng, M. Jia, F. Jiang // *EGUsphere*. — 2025. — DOI: [10.5194/egusphere-2024-3672](https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3672). — URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3672> ; [preprint].
7. Implementation and evaluation of the GEOS-Chem chemistry module version 13.1.2 within the Community Earth System Model v2.1 / T. M. Fritz, S. D. Eastham, L. K. Emmons, H. Lin, E. W. Lundgren, S. Goldhaber, S. R. H. Barrett, D. J. Jacob // *Geoscientific Model Development*. — 2022. — Т. 15. — С. 8669—8704. — DOI: [10.5194/gmd-15-8669-2022](https://doi.org/10.5194/gmd-15-8669-2022). — URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8669-2022> ; Received: 19 Apr 2022; Discussion started: 29 Apr 2022; Revised: 22 Aug 2022; Accepted: 13 Oct 2022; Published: 30 Nov 2022.
8. *NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)*. GMAO Mission. — 14.04.2022. — URL: https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao_mission/ (дата зверн. 12.05.2025) ; Accessed 12 May 2025.
9. *NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)*. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). — 12.10.2015. — URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/> (дата зверн. 12.05.2025) ; Accessed 12 May 2025.
10. Mapping of North American methane emissions with high spatial resolution by inversion of SCIAMACHY satellite data / K. J. Wecht, D. J. Jacob, C. Frankenberg, Z. Jiang, D. R. Blake // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2014. — Т. 119. — С. 7741—7756. — DOI: [10.1029/2014JD021551](https://doi.org/10.1029/2014JD021551). — URL: <https://doi.org/10.1029/2014JD021551>.
11. Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations / L. Shen [та ін.] // *Remote Sensing of Environment*. — 2021. — Т. 260. — С. 112461. — DOI: [10.1016/j.rse.2021.112461](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112461). — URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112461>.
12. Integrated Methane Inversion (IMI) 2.0: an improved research and stakeholder tool for monitoring total methane emissions with high resolution worldwide using TROPOMI satellite observations / L. A. Estrada [та ін.] // *EGUsphere*. — 2024. — DOI: [10.5194/egusphere-2024-2700](https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2700). — URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2700> ; [preprint].
13. *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. National Inventory Submissions 2025. — 2025. — URL: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2025> (дата зверн. 12.05.2025) ; Accessed 12 May 2025.