

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МАРІУПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКО-ПРАВОВИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

До захисту допустити:
Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

**«ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИНАМІКА ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ
НАД УКРАЇНОЮ (2019-2024)»**

Кваліфікаційна робота
здобувачки вищої освіти першого бакалаврського рівня вищої освіти
освітньо-професійної програми
«Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване
природокористування»

Олександра Володимирівна Тяжельникова

Науковий керівник:

Олена Миколаївна Пастернак

Рецензент:

Володимир Іванович Мокрий,

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

Кваліфікаційна робота захищена

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____

«__» 20__ р.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В АТМОСФЕРУ	
1.1. Фізико-хімічні властивості сполук нітрогену (NO_x , NH_3) та їхня роль у забрудненні атмосфери	9
1.2. Основні антропогенні та природні джерела емісії сполук нітрогену в Україні	14
1.3. Статистичний облік, методи оцінювання та нормативно-правове регулювання викидів сполук нітрогену в атмосферу в Україні та Європейському Союзі	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В УКРАЇНІ У 2019–2021 РР.	
2.1. Стан викидів у 2019 році як базовий рівень для порівняльного аналізу... 24	
2.2. Динаміка викидів сполук нітрогену у 2020–2021 рр. в умовах пандемії COVID-19	27
2.3. Просторовий розподіл викидів за регіонами України у 2019-2021 рр.	29
РОЗДІЛ 3. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В УКРАЇНІ У 2022–2024 РР.	
3.1. Динаміка загальних обсягів викидів сполук нітрогену.....	35
3.2. Зміна регіональної структури викидів у 2022-2024 рр.....	40
3.3. Екологічна інтерпретація результатів	45
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

Анотація

Тяжельникова О. В. Просторово-часова динаміка викидів сполук нітрогену над Україною (2019-2024 рр.). Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за ОПП «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». – Маріупольський державний університет, 2026.

Кваліфікаційна робота розкриває комплексне оцінювання просторово-часової динаміки та трансформацій структурних характеристик емісії сполук нітрогену (оксиду нітрогену NO_2 та амоніаку NH_3) в атмосферне повітря України зі стаціонарних джерел за період 2019-2024 років. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю аналізу техногенного та мілітарного навантаження на повітряний басейн в умовах поєднання пандемічних обмежень (2020-2021 рр.) та руйнівних факторів повномасштабного воєнного вторгнення (2022-2024 рр.).

Метою роботи є оцінювання просторово-часових трендів емісії сполук нітрогену в атмосферу України протягом 2019-2024 років для виявлення структурних зрушень у забрудненні повітря під впливом соціально-економічних факторів.

Об'єкт дослідження – процеси надходження, поширення та просторово-часового розподілу сполук нітрогену (NO_2 та NH_3) в атмосферному повітрі України.

Предмет дослідження – динаміка обсягів, географічна структура стаціонарних джерел викидів сполук нітрогену та методи їх верифікації в умовах макроекономічних і воєнних шоків.

У першому розділі здійснено теоретичне узагальнення екологічної ролі сполук нітрогену у біосфері, проаналізовано їхній вплив на здоров'я людини, процеси закислення ґрунтів та евтрофікації водойм. Розглянуто нормативно-правову базу регулювання моніторингу атмосферного повітря в Україні та стандартах ЄС. Особливу увагу приділено методології супутникового

моніторингу атмосфери за допомогою даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

У другому розділі проведено детальний розрахунок та поглиблений аналіз динаміки валових викидів NO_2 та NH_3 у розрізі областей України за 2019-2024 роки. Досліджено трансформацію промислового сектору та виявлено закономірності формування емісій аграрного комплексу, зокрема географічну концентрацію птахівництва та тваринництва.

У третьому розділі оцінено безпосередній екологічний збиток повітряному середовищу внаслідок воєнних дій. Проаналізовано екологічні наслідки руйнування великих промислових гігантів Сходу та зафіксовано аномальні тренди забруднення у тилкових регіонах (зокрема енергетичну кризу та «генераторний бум»). Обґрунтовано алгоритм незалежної верифікації офіційної статистики за допомогою супутникових знімків приладу TROPOMI супутника Sentinel-5P.

У роботі встановлено, що загальні обсяги викидів зазнали суттєвого спаду після 2022 року: валові емісії амоніаку скоротилися на 25.8%, а викиди нітроген(IV) оксиду впали майже на 60% порівняно з 2019 роком. Зафіксовано деформацію просторово-географічної структури забруднення: вимушене екологічне «розвантаження» та деіндустріалізацію Східного макрорегіону на тлі збереження високих обсягів викидів у Придніпров'ї та на Заході. Виявлено аномальні тренди, зокрема зростання емісій NO_2 у Столичному регіоні внаслідок масового використання автономних генераторів під час енергетичної кризи. В аграрному секторі доведено формування моноцентричної структури емісій NH_3 з домінуванням Черкаської області та стійким фоном Вінниччини й Чернігівщини.

Окреслено методологічні обмеження використання державної статистики в умовах війни та обґрунтовано необхідність залучення супутникових даних дистанційного зондування Землі для незалежної верифікації стану атмосфери.

Ключові слова: *атмосферне повітря, сполуки нітрогену, діоксид нітрогену, амоніак, просторово-часова динаміка, воєнний стан, евтрофікація.*

Abstract

Tiazhelnykova O. V. Spatiotemporal dynamics of nitrogen compound emissions over Ukraine (2019–2024). Qualification work for a for the Bachelor's degree in the Educational and Professional Program "Ecology, Environmental Protection and Sustainable Use of Nature."– Mariupol State University, 2026.

The qualification paper is devoted to a comprehensive assessment of the spatial-temporal dynamics and transformations of the structural characteristics of nitrogen compound emissions (nitrogen dioxide NO_2 and ammonia NH_3) into the atmospheric air of Ukraine from stationary sources for the period of 2019-2024. The relevance of the study is driven by the need to analyze the anthropogenic and military pressures on the air basin under the combined effects of pandemic restrictions (2020-2021) and the destructive factors of the full-scale military invasion (2022-2024).

The aim of the study is to evaluate the spatial-temporal trends of nitrogen compound emissions into the atmosphere of Ukraine during 2019-2024 to identify structural shifts in air pollution under the influence of socio-economic factors.

The object of the study is the processes of influx, dispersion, and spatial-temporal distribution of nitrogen compounds (NO_2 and NH_3) in the atmospheric air of Ukraine.

The subject of the study is the dynamics of volumes, the geographic structure of stationary sources of nitrogen compound emissions, and the methods for their verification under macroeconomic and wartime shocks.

The first chapter provides a theoretical generalization of the ecological role of nitrogen compounds in the biosphere, analyzing their impact on human health, soil acidification, and eutrophication of water bodies. The regulatory and legal framework governing atmospheric air monitoring in Ukraine and EU standards is reviewed. Special attention is paid to the methodology of satellite atmospheric monitoring using remote sensing data.

The second chapter provides a detailed calculation and an in-depth analysis of the dynamics of gross NO_2 and NH_3 emissions across the regions of Ukraine for 2019-2024. The transformation of the industrial sector is investigated, and the patterns of emission formation in the agricultural complex are identified, specifically the geographic concentration of poultry and livestock farming.

The third chapter assesses the direct ecological damage to the air environment resulting from military actions. The environmental consequences of the destruction of major industrial giants in the East are analyzed, and anomalous pollution trends in the rear regions are captured (specifically the energy crisis and the "generator boom"). An algorithm for the independent verification of official statistics using satellite imagery from the TROPOMI instrument onboard the Sentinel-5P satellite is substantiated.

The study establishes that the total volumes of emissions suffered a significant decline after 2022: gross ammonia emissions decreased by 25.8%, while nitrogen(IV) oxide emissions dropped by almost 60% compared to the 2019 baseline. A profound deformation of the spatial-geographic structure of pollution was captured, revealing an involuntary ecological "relief" and deindustrialization of the Eastern macro-region against the backdrop of sustained high emission levels in the Prydniprovya and Western regions. Anomalous trends were identified, notably a surge in NO_2 emissions within the Capital region caused by the widespread use of autonomous power generators during the energy crisis. In the agricultural sector, the formation of a monocentric structure of NH_3 emissions was proven, characterized by the absolute dominance of the Cherkasy region and a steady background level in the Vinnytsia and Chernihiv regions. The paper outlines the methodological limitations of relying solely on state statistics under wartime conditions and substantiates the necessity of incorporating satellite remote sensing data for the independent verification of atmospheric conditions.

Keywords: *atmospheric air, nitrogen compounds, nitrogen dioxide, ammonia, spatial-temporal dynamics, martial law, eutrophication.*

ВСТУП

Забруднення атмосферного повітря є важливою екологічною проблемою, що впливає на стан екосистем і якість життя населення. Значну роль у формуванні антропогенного навантаження відіграють сполуки нітрогену: оксиди нітрогену (NO_x), амоніак (NH_3) і нітратна кислота (HNO_3). Сполуки беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, вторинних аерозолів і кислотних опадів, можуть спричиняти евтрофікацію екосистем та впливати на кліматичні процеси.

Основними антропогенними джерелами викидів сполук нітрогену є промисловість, теплоенергетика, спалювання палива, транспорт і сільське господарство. Структура джерел залежить від конкретної речовини: оксиди нітрогену переважно утворюються під час високотемпературного згоряння палива, а амоніак значною мірою пов'язаний з аграрним сектором. У роботі основну увагу зосереджено на статистично облікованих викидах зі стаціонарних джерел, що дає змогу простежити їх часові та регіональні зміни в Україні.

Актуальність дослідження визначається необхідністю оцінити, як змінювалися обсяги та просторова структура викидів сполук нітрогену в Україні протягом 2019-2024 рр. Обраний період є показовим, оскільки охоплює кілька суттєво відмінних етапів соціально-економічного розвитку країни. У таких умовах аналіз офіційних статистичних даних набуває особливого значення. Він дає змогу визначити загальну тенденцію зміни викидів, простежити трансформацію внеску окремих областей і виявити регіони, які зберігають найбільше значення у структурі статистично облікованих викидів.

Метою роботи є оцінювання просторово-часової динаміки викидів сполук нітрогену зі стаціонарних джерел в Україні у 2019-2024 рр. на основі офіційних статистичних даних і визначення основних змін регіональної структури викидів у довоєнний та воєнний періоди.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розглянути теоретичну базу дослідження: фізико-хімічні властивості сполук нітрогену та їхню роль у забрудненні атмосферного повітря; основні

природні й антропогенні джерела емісії сполук нітрогену; особливості статистичного обліку, методи оцінювання та нормативно-правове регулювання викидів сполук нітрогену в Україні;

- проаналізувати обсяги викидів сполук нітрогену зі стаціонарних джерел у 2019-2024 році в умовах соціально-економічних змін: базовий період; в умовах пандемії COVID-19; після початку військових дій;

- проаналізувати зміни регіональної структури викидів;
- провести порівняльний аналіз просторового розподілу викидів у період воєнних трансформацій;

- узагальнити виявлені тенденції та визначити обмеження використання статистичних даних для оцінювання екологічного стану територій.

Об'єктом дослідження є викиди сполук нітрогену в атмосферне повітря зі стаціонарних джерел в Україні.

Предметом дослідження є просторово-часова динаміка обсягів і регіональної структури викидів сполук нітрогену зі стаціонарних джерел в Україні у 2019-2024 рр.

Для виконання поставлених завдань використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів дослідження. Метод аналізу та узагальнення наукових джерел, статистичний метод, порівняльний метод, графічний метод, системний підхід використано для інтерпретації отриманих результатів. Інформаційну базу дослідження становлять офіційні статистичні дані Державної служби статистики України щодо викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря зі стаціонарних джерел за регіонами України у 2019-2024 рр.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, дев'яти підрозділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 55 сторінок. Кількість використаних джерел – 60. Кількість таблиць - 4, кількість рисунків – 11.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В АТМОСФЕРУ

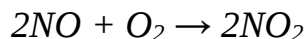
1.1. Фізико-хімічні властивості сполук нітрогену (NO_x , NH_3) та їхня роль у забрудненні атмосфери

Дослідження просторово-часової динаміки антропогенного навантаження на атмосферне повітря потребує детального аналізу теоретичних засад поведінки забруднювальних речовин у газовій фазі та їхніх хімічних трансформацій. Серед широкого спектра інгредієнтів-забруднювачів особливе місце посідають сполуки нітрогену, які в екологічній хімії атмосфери класифікують на дві основні групи: окиснені (сукупність оксидів азоту, що позначається як NO_x) та відновлені (газоподібний амоніак NH_3). Фізико-хімічна специфіка цих газів визначає час їхнього існування в тропосфері, здатність до транскордонного перенесення та механізми негативного впливу на біоту і кліматичну систему [1].

Група оксидів нітрогену (NO_x) у реальних атмосферних умовах переважно представлена двома газами: монооксидом азоту (NO) та діоксидом азоту (NO_2). Фізичні властивості цих сполук суттєво відрізняються. Монооксид азоту є безбарвним газом, що погано розчиняється у воді і має високу хімічну активність за наявності радикалів [2].

Водночас діоксид азоту (NO_2) - це червоно-бурий газ із гострим запахом, який є більш токсичним і характеризується високою реакційною здатністю. Основним джерелом надходження NO у нижні шари атмосфери є високотемпературні процеси горіння палива на теплоелектростанціях та у двигунах внутрішнього згорання. Фізико-хімічний механізм генерації так званих «термічних» оксидів азоту полягає в окисненні молекулярного азоту повітря за температур понад 1200-1500°C, тоді як «паливні» оксиди утворюються внаслідок розщеплення азотовмісних органічних сполук, що входять до складу вугілля чи мазуту [2].

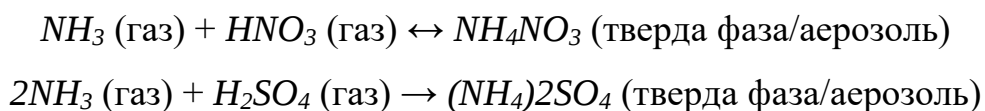
Потрапляючи в приземний шар тропосфери, монооксид азоту зазнає швидкого фотохімічного окиснення під дією атмосферного кисню, озону або пероксидних радикалів, перетворюючись на стабільніший діоксид азоту:



Сукупність цих газів бере участь у складних циклах фотодисоціації. Під впливом сонячної радіації (особливо у світлу пору доби) молекула NO_2 розпадається на монооксид азоту та атомарний кисень, який негайно взаємодіє з молекулярним киснем, призводячи до утворення приземного (тропосферного) озону (O_3) [3]. Саме ця реакція є ключовою ланкою у формуванні фотохімічного смогу в урбанізованих регіонах, де спостерігається висока щільність автотранспорту [3]. Подальша хімічна еволюція NO_2 у вологій атмосфері пов'язана з його взаємодією з гідроксильними радикалами ($OH\bullet$), внаслідок чого утворюється азотна кислота (HNO_3). Цей процес є одним із головних чинників формування явища кислотних дощів, що зумовлюють деградацію лісових екосистем та закислення поверхневих водойм [1].

На відміну від окиснених форм, відновлена сполука нітрогену - амоніак (NH_3) - має кардинальн інші фізико-хімічні властивості та географічний профіль емісії. Амоніак є безбарвним газом із різким характерним запахом, який надзвичайно добре розчиняється у воді з утворенням слабкої лужної основи (гідроксиду амонію). У глобальному вимірі основним джерелом емісії NH_3 є аграрний сектор (тваринництво, використання мінеральних азотних добрив) та біогенні процеси розкладу органіки [5].

У хімії атмосфери амоніак відіграє унікальну роль, оскільки він є фактично єдиним поширеним у тропосфері газом, що має виражені лужні властивості [6]. Завдяки цьому газоподібний NH_3 виступає головним нейтралізатором кислотних сполук (насамперед азотної HNO_3 та сірчаної H_2SO_4 кислот, які утворюються в результаті трансформації NO_x та SO_2). Хімічна взаємодія в системі «газ-частинка» описується такими основними рівняннями:



Результатом цих реакцій є утворення вторинних солей - нітрату амонію та сульфату амонію, які конденсуються у вигляді дрібнодисперсних аерозольних частинок [5]. Ці сполуки складають значну частку (до 30-50%) у загальній масі твердих зважених частинок фракції $PM_{2.5}$ у повітрі над Європейським континентом [7]. Фізико-хімічна небезпека формування таких вторинних аерозолів полягає в тому, що час їхнього перебування в атмосфері значно довший, ніж у вихідних газів, і може становити від кількох діб до тижнів. Це створює умови для їхнього транскордонного перенесення повітряними масами на відстані в сотні й тисячі кілометрів від первинного локального вогнища емісії [5].

Роль сполук нітрогену в забрудненні навколишнього середовища не обмежується лише прямим токсичним впливом на дихальну систему людини через подразнення слизових оболонок. Концепція «азотного каскаду» (Nitrogen Cascade) в екологічній науці демонструє, як одна молекула реактивного азоту (N_r), змінюючи свої хімічні форми, послідовно зумовлює низку екологічних проблем [8]. Після вимивання з атмосфери шляхом сухого та вологого осадження сполуки амонію та нітратів потрапляють у ґрунти та гідросферу. Це призводить до евтрофікації водних об'єктів (бурхливого розмноження водоростей через надлишок поживних речовин і подальшого дефіциту кисню), а також спричиняє хронічне закислення бідних на кальцій ґрунтів [8].

Таким чином, методологія дослідження просторово-часової динаміки викидів сполук нітрогену над Україною має базуватися на комплексному врахуванні хімізму взаємодії NO_x та NH_3 . Динаміка їхніх концентрацій у досліджуваній період (2019-2024 рр.) безпосередньо залежала як від зміни обсягів промислового виробництва й інтенсивності використання транспорту, так і від трансформацій в аграрному секторі, що вимагає застосування сучасних геоінформаційних методів моделювання та супутникового моніторингу тропосферних колон цих газів.

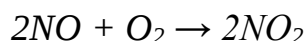
Дослідження просторово-часової динаміки антропогенного навантаження на атмосферне повітря потребує детального аналізу теоретичних засад поведінки забруднювальних речовин у газовій фазі та їхніх хімічних трансформацій. Серед

широкого спектра інгредієнтів-забруднювачів особливе місце посідають сполуки нітрогену, які в екологічній хімії атмосфери класифікують на дві основні групи: окиснені (сукупність оксидів азоту, що позначається як NO_x) та відновлені (газоподібний амоніак NH_3). Фізико-хімічна специфіка цих газів визначає час їхнього існування в тропосфері, здатність до транскордонного перенесення та механізми негативного впливу на біоту і кліматичну систему [36].

Група оксидів нітрогену (NO_x) у реальних атмосферних умовах переважно представлена двома газами: монооксидом азоту (NO) та діоксидом азоту (NO_2). Фізичні властивості цих сполук суттєво відрізняються. Монооксид азоту є безбарвним газом, що погано розчиняється у воді і має високу хімічну активність за наявності радикалів [37].

Діоксид азоту (NO_2) - це червоно-бурий газ із гострим запахом, який є більш токсичним і характеризується високою реакційною здатністю. Основним джерелом надходження NO_2 у нижні шари атмосфери є високотемпературні процеси горіння палива на теплоелектростанціях та у двигунах внутрішнього згоряння. Фізико-хімічний механізм генерації так званих «термічних» оксидів азоту полягає в окисненні молекулярного азоту повітря за температур понад $1200-1500^\circ C$, тоді як «паливні» оксиди утворюються внаслідок розщеплення азотовмісних органічних сполук, що входять до складу вугілля чи мазуту [37].

Потрапляючи в приземний шар тропосфери, монооксид азоту зазнає швидкого фотохімічного окиснення під дією атмосферного кисню, озону або пероксидних радикалів, перетворюючись на стабільніший діоксид азоту:



Сукупність цих газів бере участь у складних циклах фотодисоціації. Під впливом сонячної радіації (особливо у світлу пору доби) молекула NO_2 розпадається на монооксид азоту та атомарний кисень, який негайно взаємодіє з молекулярним киснем, призводячи до утворення приземного (тропосферного) озону (O_3) [38]. Саме ця реакція є ключовою ланкою у формуванні фотохімічного смогу в урбанізованих регіонах, де спостерігається висока щільність автотранспорту [38]. Подальша хімічна еволюція NO_2 у вологій атмосфері пов'язана з його взаємодією з гідроксильними радикалами ($OH\bullet$), внаслідок чого

утворюється азотна кислота (HNO_3). Цей процес є одним із головних чинників формування явища кислотних дощів, що зумовлюють деградацію лісових екосистем та закислення поверхневих водойм [36].

На відміну від окиснених форм, відновлена сполука нітрогену - амоніак (NH_3) - має кардинально інші фізико-хімічні властивості та географічний профіль емісії. Амоніак є безбарвним газом із різким характерним запахом, який надзвичайно добре розчиняється у воді з утворенням слабкої лужної основи (амоній гідроксиду). У глобальному вимірі основним джерелом емісії NH_3 є аграрний сектор (тваринництво, використання мінеральних азотних добрив) та біогенні процеси розкладу органіки [40]. У хімії атмосфери амоніак відіграє унікальну роль, оскільки він є фактично єдиним поширеним у тропосфері газом, що має виражені лужні властивості [41]. Завдяки цьому газоподібний NH_3 виступає головним нейтралізатором кислотних сполук (насамперед азотної HNO_3 та сірчаної H_2SO_4 кислот, які утворюються в результаті трансформації NO_x та SO_2). Хімічна взаємодія в системі «газ-частинка» описується такими основними рівняннями:



Результатом цих реакцій є утворення вторинних солей - нітрату амонію та сульфату амонію, які конденсуються у вигляді дрібнодисперсних аерозольних частинок [40]. Ці сполуки складають значну частку (до 30-50%) у загальній масі твердих зважених частинок фракції $PM_{2.5}$ у повітрі над Європейським континентом [42]. Фізико-хімічна небезпека формування таких вторинних аерозолів полягає в тому, що час їхнього перебування в атмосфері значно довший, ніж у вихідних газів, і може становити від кількох діб до тижнів.

Це створює умови для їхнього транскордонного перенесення повітряними масами на відстані в сотні й тисячі кілометрів від первинного локального вогнища емісії [40]. Роль сполук нітрогену в забрудненні навколишнього середовища не обмежується лише прямим токсичним впливом на дихальну систему людини через подразнення слизових оболонок. Концепція «азотного каскаду» в екологічній науці демонструє, як одна молекула реактивного азоту

(Nr), змінюючи свої хімічні форми, послідовно зумовлює низку екологічних проблем [43]. Після вимивання з атмосфери шляхом сухого та вологого осадження сполуки амонію та нітратів потрапляють у ґрунти та гідросферу. Це призводить до евтрофікації водних об'єктів (бурхливого розмноження водоростей через надлишок поживних речовин і подальшого дефіциту кисню), а також спричиняє хронічне закислення бідних на кальцій ґрунтів [43]. Таким чином, методологія дослідження просторово-часової динаміки викидів сполук нітрогену над Україною має базуватися на комплексному врахуванні хімізму взаємодії NO_x та NH_3 . Динаміка їхніх концентрацій у досліджуваний період (2019-2024 рр.) безпосередньо залежала як від зміни обсягів промислового виробництва й інтенсивності використання транспорту, так і від трансформацій в аграрному секторі, що вимагає застосування сучасних геоінформаційних методів моделювання та супутникового моніторингу тропосферних колекцій цих газів.

1.2. Основні антропогенні та природні джерела емісії сполук нітрогену в Україні

Оцінка просторово-часової динаміки забруднення атмосферного повітря потребує чіткої диференціації та інвентаризації джерел надходження екотоксикантів. Для території України в період 2019-2024 років структура емісії сполук нітрогену (NO_x та NH_3) зазнала трансформацій, зумовлених як глобальними чинниками (пандемія COVID-19), так і локальними факторами катастрофічного характеру - повномасштабними військовими діями та пов'язаною з ними руйнацією промислово-економічного потенціалу [9; 10].

Усі джерела надходження зазначених речовин традиційно поділяють на два макрокласи: антропогенні (техногенні) та природні (біогенні).

Серед антропогенних джерел емісії окиснених сполук нітрогену (NO_x) в Україні історично ключову роль відігравали три сектори: промисловість (переважно металургійна та хімічна), паливно-енергетичний комплекс (теплові електростанції та теплоелектроцентралі) і транспортна інфраструктура [11, с. 240]. За даними офіційної статистики, до 2022 року в промислових регіонах

Сходу та Центру України стаціонарні джерела (передусім спалювання вугілля на ТЕС) забезпечували стабільний високотемпературний синтез «термічних» оксидів азоту [11]. Проте супутникові спостереження датчика TROPOMI (супутник Sentinel-5P) зафіксували, що з початком повномасштабного вторгнення у 2022 році відбулося кардинальне падіння промислових викидів NO_x - у середньому на 34% по всій країні, а в Донецькій, Луганській та Запорізькій областях цей показник скоротився на 29-34% через зупинку та руйнування таких гігантів, як «Азовсталь» та ММК ім. Ілліча [9; 10].

Транспортний сектор (пересувні джерела) є іншим потужним генератором NO_x , що локалізується переважно у великих урбанізованих агломераціях (Київ, Харків, Одеса, Львів, Дніпро). Автотранспорт викидає оксиди азоту безпосередньо у приземний шар атмосфери, що погіршує умови розсіювання [1]. Динаміка емісії від транспорту в період 2020-2021 рр. демонструвала помірне зниження під час ковідних локдаунів, проте вже у 2022–2024 рр. вектор географічного розподілу змістився: у східних областях викиди транспорту впали через міграцію населення та паливну кризу, тоді як у західних регіонах України зафіксовано локальне зростання концентрацій NO_2 у повітряних колонах, зумовлене суттєвим збільшенням логістичного навантаження та транзитного потоку [9].

Основним антропогенним джерелом відновленого нітрогену - амоніаку (NH_3) - в Україні виступає аграрний сектор. Викиди формуються внаслідок розкладу карбаміду та екскрементів у тваринництві, а також через випаровування при внесенні в ґрунт мінеральних азотних добрив (аміачної селітри, карбамідно-аміачної суміші) [7]. На відміну від стабільних тенденцій у країнах ЄС, де емісія NH_3 жорстко регулюється екологічними стандартами, в Україні в період 2019-2021 рр. спостерігалися флуктуації, пов'язані з інтенсифікацією рослинництва [12]. З 2022 року відбулося вимушене скорочення використання добрив через дефіцит коштів в аграріїв та окупацію значних площ сільськогосподарських угідь на Півдні та Сході, що автоматично знизило фонове надходження аміаку в атмосферу цих регіонів [13].

Окремим, специфічним для аналізованого періоду (2022-2024 рр.) антропогенним деструктивним джерелом емісії стали військові дії. Детонація тисяч тон вибухових речовин (основою яких є нітросполуки, такі як тротил або гексоген) призводить до моментального викиду в атмосферу колосальних об'ємів оксидів азоту, чадного газу та сажі [12]. За оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, обсяги сукупних викидів у перші роки війни у багато разів перевищили стандартні річні показники мирного часу [12]. Інверсійне моделювання показало, що воєнні емісії (ураження нафтобаз, пожежі на промислових об'єктах, вибухи боєприпасів) частково компенсували загальне падіння промислових викидів, нівелювавши очікуване екологічне «полегшення» від зупинки заводів приблизно на 8-10% [9; 10].

До природних (біогенних) джерел емісії сполук нітрогену в Україні належать процеси життєдіяльності мікроорганізмів у ґрунтах та природні пожежі екосистем. Біогенна емісія NO та NH_3 з поверхні ґрунту контролюється процесами нітрифікації та денітрифікації, які безпосередньо залежать від температурного режиму, вологості ґрунту та вмісту в ньому органіки й залишків азотних добрив [14]. Протягом літніх місяців (червень-серпень) у степовій та лісостеповій зонах України природне виділення NO з ґрунту досягає свого піку, що фіксується супутниками у вигляді сезонних коливань фонових забруднень.

Особливе значення у 2019-2024 рр. мали природні пожежі, які в умовах кліматичних змін та ведення війни набули катастрофічних масштабів. Термічні аномалії, викликані літніми посухами та артилерійськими обстрілами лісових масивів (зокрема на Чернігівщині, Луганщині, Харківщині), призвели до вигорання десятків тисяч гектарів лісу та трави [15]. Під час горіння біомаси за високих температур відбувається масштабний викид диму, сажі та оксидів азоту, концентрації яких у періоди активних пожеж (наприклад, наприкінці літа 2024 року) перевищували середні фонові значення в кілька разів, створюючи шлейфи забруднення, що поширювалися на сотні кілометрів [15].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що архітектура джерел емісії сполук нітрогену в Україні за період 2019-2024 рр. зазнала глибокої структурної перебудови. Домінування класичних промислово-транспортних джерел

змістилося у бік мілітарних факторів та масштабних екосистемних пожеж, що вимагає гнучких методологічних підходів при просторово-часовому аналізі супутникових даних у наступних розділах роботи.

Оцінка просторово-часової динаміки забруднення атмосферного повітря потребує чіткої диференціації та інвентаризації джерел надходження екотоксикантів. Для території України в період 2019-2024 років структура емісії сполук нітрогену (NO_x та NH_3) зазнала безпрецедентних трансформацій, зумовлених як глобальними чинниками (пандемія COVID-19), так і локальними факторами катастрофічного характеру - повномасштабними військовими діями та пов'язаною з ними руйнацією промислово-економічного потенціалу [44; 45].

Динаміка емісії від транспорту в період 2020-2021 рр. демонструвала помірне зниження під час ковідних локдаунів, проте вже у 2022-2024 рр. вектор географічного розподілу змістився: у східних областях викиди транспорту впали через міграцію населення та паливну кризу, тоді як у західних регіонах України зафіксовано локальне зростання концентрацій NO_2 у повітряних колонах, зумовлене суттєвим збільшенням логістичного навантаження та транзитного потоку [44]. Основним антропогенним джерелом відновленого нітрогену - амоніаку (NH_3) - в Україні виступає аграрний сектор. Викиди формуються внаслідок розкладу карбаміду та екскрементів у тваринництві, а також через випаровування при внесенні в ґрунт мінеральних азотних добрив (аміачної селітри, карбамідно-аміачної суміші) [40]. На відміну від стабільних тенденцій у країнах ЄС, де емісія NH_3 жорстко регулюється екологічними стандартами, в Україні в період 2019-2021 рр. спостерігалися флуктуації, пов'язані з інтенсифікацією рослинництва [47].

З 2022 року відбулося вимушене скорочення використання добрив через дефіцит коштів в аграріїв та окупацію значних площ сільськогосподарських угідь на Півдні та Сході, що автоматично знизило фонове надходження аміаку в атмосферу цих регіонів [48]. Окремим, специфічним для аналізованого періоду (2022-2024 рр.) антропогенно-деструктивним джерелом емісії стали військові дії. Детонація тисяч тонн вибухових речовин (основою яких є нітросполуки, такі як

тротил або гексоген) призводить до моментального викиду в атмосферу колосальних об'ємів оксидів азоту, чадного газу та сажі [47].

За оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, обсяги сукупних викидів у перші роки війни у багато разів перевищили стандартні річні показники мирного часу [47]. Інверсійне моделювання показало, що воєнні емісії (ураження нафтобаз, пожежі на промислових об'єктах, вибухи боєприпасів) частково компенсували загальне падіння промислових викидів, нівелювавши очікуване екологічне «полегшення» від зупинки заводів приблизно на 8-10% [44; 45].

До природних (біогенних) джерел емісії сполук нітрогену в Україні належать процеси життєдіяльності мікроорганізмів у ґрунтах та природні пожежі екосистем. Біогенна емісія NO та NH_3 з поверхні ґрунту контролюється процесами нітрифікації та денітрифікації, які безпосередньо залежать від температурного режиму, вологості ґрунту та вмісту в ньому органіки й залишків азотних добрив [49]. Протягом літніх місяців (червень-серпень) у степовій та лісостеповій зонах України природне виділення NO з ґрунту досягає свого піку, що фіксується супутниками у вигляді сезонних коливань фонових забруднень.

Особливе значення у 2019-2024 рр. мали природні пожежі, які в умовах кліматичних змін та ведення війни набули катастрофічних масштабів. Термічні аномалії, викликані літніми посухами та артилерійськими обстрілами лісових масивів (зокрема на Чернігівщині, Луганщині, Харківщині), призвели до вигорання десятків тисяч гектарів лісу та трави [50]. Під час горіння біомаси за високих температур відбувається масштабний викид диму, сажі та оксидів азоту, концентрації яких у періоди активних пожеж (наприклад, наприкінці літа 2024 року) перевищували середні фонові значення в кілька разів, створюючи шлейфи забруднення, що поширювалися на сотні кілометрів [50].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що архітектура джерел емісії сполук нітрогену в Україні за період 2019-2024 рр. зазнала глибокої структурної перебудови. Домінування класичних промислово-транспортних джерел змістилося у бік мілітарних факторів та масштабних екосистемних пожеж, що

вимагає гнучких методологічних підходів при просторово-часовому аналізі супутникових даних у наступних розділах роботи.

1.3. Статистичний облік, методи оцінювання та нормативно-правове регулювання викидів сполук нітрогену в атмосферу в Україні та Європейському Союзі

Моніторинг, статистичний облік та правове регулювання антропогенних викидів сполук нітрогену (насамперед оксидів нітрогену NO_x та амоніаку NH_3) є ключовими елементами стратегій екологічної безпеки як в Україні, так і в Європейському Союзі. Оскільки ці сполуки мають різний спектр екологічного впливу, який включає транскордонне підкислення, евтрофікацію та утворення приземного озону, підходи до їхнього нормативного контролю постійно вдосконалюються та гармонізуються в межах євроінтеграційних процесів.

Законодавство Європейського Союзу у сфері контролю нітрогенвмісних емісій сьогодні базується на засадах Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та Стратегії нульового забруднення (Zero Pollution Action Plan). Головним нормативно-правовим актом на рівні ЄС є Директива про національні зобов'язання щодо скорочення викидів (Директива NEC - (EU) 2016/2284) [18]. Цей документ встановлює жорсткі національні цільові показники скорочення щорічних викидів для головних забруднювачів, серед яких NO_x та NH_3 , визначаючи для кожної країни-члена індивідуальні відсоткові ліміти скорочення порівняно з базовим 2005 роком. Додатково великі промислові об'єкти регулюються Директивою про промислові викиди (IED -2010/75/EU), яка вимагає впровадження найкращих доступних технологій та методів керування (НДТМ), а новий Регламент (EU) 2024/1244 забезпечує функціонування публічного Європейського порталу промислових викидів (Industrial Emissions Portal), де накопичуються дані про емісії кожного великого підприємства.

Українська система екологічного регулювання наразі перебуває на етапі глибокої трансформації та адаптації до європейських стандартів. Базовим національним документом у цій сфері є Закон України «Про охорону

атмосферного повітря» [16]. Згідно з ним, викиди забруднювальних речовин стаціонарними джерелами можуть здійснюватися лише на підставі спеціальних дозволів, які видаються суб'єктам господарювання, а контроль забезпечується через встановлення нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ). У межах виконання Угоди про асоціацію з ЄС в Україні було прийнято Закон України «Про Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів» (РВПЗ) [17]. Цей крок дозволив створити цифрову базу даних, повністю гармонізовану з європейським промисловим порталом, що значно спростило статистичний облік сполук нітрогену від великих промислових джерел.

Для безпосереднього розрахунку та верифікації обсягів емісії сполук нітрогену в ЄС та Україні використовується уніфікований методологічний фундамент - Керівництво з інвентаризації викидів забруднювальних речовин ЕМЕР/ЕЕА (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook) [7; 19]. Відповідно до цієї методології, оцінювання кількості викидів розділене на три рівні складності:

- Рівень 1: базовий метод, що базується на застосуванні усереднених міжнародних коефіцієнтів викидів (Emission Factors) до загальних статистичних даних про діяльність сектору (наприклад, маси спаленого палива чи кількості внесених азотних добрив) [19].
- Рівень 2: більш точний підхід, де використовуються специфічні для конкретної країни або технології коефіцієнти викидів, які враховують тип спалювальної установки або конкретні види азотних добрив і типи ґрунтів.
- Рівень 3: найвищий рівень точності, що базується на результатах безпосередніх інструментальних вимірювань (автоматизовані системи моніторингу на димових трубах ТЕС) або на складних динамічних математичних моделях колообігу азоту в окремих господарствах.

Специфіка статистичного обліку в межах номенклатури звітності (NFR) чітко розділяє оксиди нітрогену (NO_x), які обліковуються переважно в секторах енергетики та автодорожнього транспорту, та амоніак (NH_3), облік якого майже

повністю зосереджений у секторі сільського господарства (використання гною та внесення добрив у ґрунти) [19].

Головна відмінність між системами України та ЄС наразі полягає в рівні автоматизації та деталізації вихідних даних. Якщо в країнах ЄС інвентаризація емісії здійснюється за точними методами Рівня 2 та 3 з прив'язкою до географічної сітки координат, то в Україні тривалий час домінував підхід Рівня 1, заснований на узагальненій державній статистиці.

Особливим викликом для статистичного обліку в Україні після 2022 року стало руйнування багатьох наземних постів спостереження, втрата доступу до даних на тимчасово окупованих територіях та різка зміна динаміки емісій через бойові дії. За таких умов, відповідно до рекомендацій Керівництва ЕМЕР/ЕЕА, критичного значення набувають альтернативні методи оцінювання [19]. Використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема супутникового моніторингу за допомогою приладу TROPOMI (супутник Sentinel-5P), дозволяє здійснювати незалежну верифікацію наземних звітів, фіксувати транскордонні перенесення та оцінювати реальну просторово-часову динаміку забруднення атмосфери сполуками нітрогену в умовах воєнного стану [9].

Додатковим інструментом для подолання кризових явищ в інформаційному забезпеченні моніторингу стало впровадження інтегрованих математичних моделей хімічного транспорту, які верифікуються на основі порівняння модельних розрахунків із супутниковими даними [54]. Процеси європейської інтеграції України вимагають не лише формального перенесення норм Директив ЄС у національне поле, а й докорінної модернізації технологічної бази промислових об'єктів для досягнення цільових показників зниження емісій [51; 52]. Отже, поєднання існуючих класичних методів статистичного звіту з новітніми геоінформаційними технологіями та незалежним супутниковим трекінгом є єдиним надійним шляхом побудови об'єктивної системи моніторингу атмосфери в сучасних реаліях [56; 57].

Таким чином, узагальнення теоретико-методологічних основ свідчить, що дослідження просторово-часової динаміки емісій NO_x та NH_3 в умовах системних

макроекономічних і воєнних шоків не може обмежуватися виключно стандартними інструментами державної статистики. Необхідність мінімізації методологічних похибок інвентаризації [53] та заповнення інформаційних прогалин зумовлює доцільність залучення супутникового інструментарію TROPOMI/Sentinel-5P як незалежного та високоточного джерела даних, що і буде детально реалізовано в наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В УКРАЇНІ У 2019–2021 РР.

Аналіз просторово-часової динаміки емісії сполук нітрогену в атмосферне повітря України протягом 2019-2021 років є базовим та критично важливим етапом дослідження. Цей часовий інтервал відображає стан довкілля у відносно мирний період еколого-економічного розвитку держави, що дозволяє сформувати так звану «точку відліку» - фоновий рівень забруднення, порівняно з яким оцінюються масштабні техногенні та мілітарні деструкції наступного воєнного періоду 2022-2024 років [3]. Комплексний розгляд цього трирічного періоду дає змогу відстежити, як класична структура антропогенного навантаження трансформувалася під впливом масштабних глобальних зсувів.

Для детального вивчення зазначених процесів матеріал другого розділу структуровано за трьома послідовними аналітичними напрямками. Перший напрям присвячено встановленню базового рівня екологічного навантаження на прикладі 2019 року. Цей період відображає роботу промисловості, паливно-енергетичного комплексу та транспорту в умовах максимальної та стабільної активності [6]. Фіксація обсягів емісії оксидів нітрогену (NO_x) та амоніаку (NH_3) за 2019 рік є необхідною для подальшого розрахунку індексів падіння чи зростання концентрацій цих газів.

Другий напрям дослідження охоплює 2020-2021 роки та фокусується на оцінці динаміки викидів в умовах пандемії COVID-19. Упровадження жорстких протиепідемічних локдаунів супроводжувалося обмеженням внутрішніх перевезень, падінням інтенсивності автомобільного трафіку та зупинкою окремих виробництв. Це спричинило унікальне для новітньої історії зниження антропогенного тиску на міські повітряні басейни, що чітко зафіксували як наземні статистичні звіти, так і супутникові системи дистанційного зондування Землі [9; 11]. Водночас цей період відзначався стабільним розвитком агросектору, що зумовило специфічні, відмінні від промисловості тенденції емісії амоніаку [12].

Третій напрям узагальнює отримані дані через призму просторового розподілу викидів за регіонами України. Поєднання офіційної відомчої статистики [6; 14] із супутниковими картами приладу TROPOMI (космічний апарат Sentinel-5P) [1] дозволяє візуалізувати конкретні географічні ареали забруднення. Такий підхід дає змогу чітко розмежувати території України на промислово-урбанізовані домени (з хронічно високим вмістом NO_2) та аграрно-територіальні домени (з вираженими сезонними максимумами NH_3).

Таким чином, комплексна реалізація визначеної структури розділу дозволить сформувати цілісну фактологічну базу щодо поведінки та розподілу сполук нітрогену в тропосфері України до 2022 року, що є обов'язковою умовою для виконання порівняльного аналізу в наступних розділах дипломної роботи.

2.1. Стан викидів у 2019 році як базовий рівень для порівняльного аналізу

Для об'єктивної оцінки просторово-часової динаміки будь-яких екологічних деструкцій у науковій практиці обов'язковим є встановлення базового рівня - стабільного фонового стану системи до моменту зміни зовнішніх умов. У межах цього дослідження як базовий орієнтир обрано 2019 рік. Цей період відображає кінцеву фазу стабільного еколого-економічного розвитку України перед початком глобальних пандемічних локдаунів 2020-2021 років та подальших руйнівних мілітарних факторів 2022-2024 років [3]. Статистичні та супутникові дані за 2019 рік дають змогу зафіксувати класичну структуру антропогенної емісії сполук нітрогену від традиційних секторів економіки країни.

Оцінку динаміки надходження забруднювальних речовин від промисловості та енергетики традиційно проводять на основі аналізу офіційних звітів державної статистичної звітності. Базові тренди емісії нітроген діоксиду від стаціонарних джерел у досліджуваній період узагальнено в таблиці 2.1.

Викиди нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України (2019-2021 рр.).

	2019	2020	2021
Україна	205067.1	181259.334	174027.632
Вінницька	9710.4	6825.015	7223.538
Волинська	517.6	513.700	702.840
Дніпропетровська	28298.8	27041.940	26558.257
Донецька	42535.8	37047.584	35042.653
Житомирська	1561.2	1443.290	1456.511
Закарпатська	936.9	643.969	734.049
Запорізька	28136.8	24919.255	22595.132
Івано-Франківська	15162.1	11203.005	13936.399
Київська	8704.0	6495.071	5516.844
Кіровоградська	1029.8	891.293	856.863
Луганська	5034.8	4921.000	4886.286
Львівська	5675.1	5529.729	5609.238
Миколаївська	2494.1	2469.261	2480.729
Одеська	1252.8	1441.409	1528.505
Полтавська	9799.4	8433.269	8988.404
Рівненська	3260.7	4143.513	3387.415
Сумська	3186.0	2197.446	1650.702
Тернопільська	965.0	878.686	734.401
Харківська	10198.3	10122.765	7615.833
Херсонська	307.7	352.739	387.234
Хмельницька	5394.8	5160.197	5217.278
Черкаська	10158.0	8654.633	8268.456
Чернівецька	255.0	242.737	234.195
Чернігівська	3019.4	2297.144	2378.255
м.Київ	7472.6	7390.684	6037.615

Аналізуючи показники базового 2019 року, наведені в таблиці 2.1, можна констатувати, що інтегральні обсяги викидів нітроген діоксиду від стаціонарних джерел забруднення в Україні складали 205067.1 т [6]. Основним генератором цих емісій виступав паливно-енергетичний комплекс, а саме теплові електростанції (ТЕС) та теплоелектроцентралі (ТЕЦ), що працювали переважно на твердому паливі (кам'яному та бурому вугіллі). Через застаріле пиловугільне обладнання та відсутність на більшості вітчизняних енергоблоків

високоєфективних систем денітрифікації димових газів спалювання вугілля супроводжувалося масивним синтезом оксидів азоту за високих температур [2].

Специфіка емісії 2019 року, що чітко простежується за регіональним розподілом у таблиці, полягала в її жорсткій прив'язці до великих енергетичних вузлів та промислових центрів. Абсолютними лідерами за обсягами викидів NO_2 виступали Донецька область (42 535.8 т), Дніпропетровська область (28 298.8 т) та Запорізька область (28 136.8 т) [6]. Ця «велика трійка» сумарно формувала майже половину (48.2%) усіх стаціонарних викидів нітроген діоксиду в країні, що пояснюється надвисокою концентрацією металургійних комбінатів, коксохімічних заводів та потужних ТЕС (Криворізька, Придніпровська, Запорізька, Курахівська). Також виділялася Івано-Франківська область (15 162.1 т), високий показник якої майже повністю забезпечувався роботою Бурштинської ТЕС [11]. На противагу їм, Чернівецька (255.0 т) та Херсонська (307.7 т) області мали мінімальний техногенний внесок.

Паралельно з промисловістю вагомим джерелом NO_x у 2019 році був автотранспорт (пересувні джерела). Його частка у великих містах-мільйонниках (зокрема в м. Києві, де стаціонарні джерела давали 7 472.6 т) досягала 70-80% від загального обсягу міських нітрогенвмісних емісій [12]. Стан автомобільного парку України у 2019 році характеризувався великою кількістю вживаних автомобілів із низькими екологічними стандартами (Євро-3, Євро-4), що зумовлювало високі питомі коефіцієнти викидів. Супутникові дані приладу TROPOMI за 2019 рік чітко візуалізували стійкі локальні максимуми концентрацій NO_2 над ключовими транспортними вузлами, формуючи виразні антропогенні куполи над мегаполісами [1].

Що стосується амоніаку (NH_3), то базовий 2019 рік демонстрував стабільно високі показники емісії в аграрному секторі (в межах 140-150 тис. т сумарно по країні) [14]. Близько 80% від цієї кількості припадало на процеси внесення мінеральних азотних добрив під урожай (селітра аміачна, карбамід), а решта - на біогенне випаровування з поверхонь великих тваринницьких комплексів [5].

Параметри 2019 року, що поєднували високу промислову активність та інтенсивне сільське господарство, є еталоном нормального техногенного

навантаження. Самі ці дані будуть використані у наступному підрозділі для аналізу аномальних зсувів емісії.

2.2. Динаміка викидів сполук нітрогену у 2020–2021 рр. в умовах пандемії COVID-19

Період 2020-2021 років увійшов в історію екологічних спостережень як час проведення унікального глобального експерименту, викликаного пандемією COVID-19. Запровадження жорстких протиепідемічних заходів, тривалих локдаунів, зупинка пасажирського сполучення та переведення значної частини працівників на дистанційну форму роботи радикально змінили динаміку антропогенних емісій у всьому світі, і Україна не стала винятком [11]. Аналіз даних таблиці 2.1 дозволяє чітко простежити та математично підтвердити ефект «екологічного перепочинку» повітряного басейну.

Згідно з офіційною статистикою, вже у перший рік пандемії (2020 рік) загальний обсяг викидів нітроген діоксиду в Україні стрімко впав до 181 259.334 т, що становить падіння на 11.6% порівняно з базовим 2019 роком. У 2021 році, попри часткове відновлення економіки, тренд на зниження промислових емісій зберігся, досягнувши позначки 174 027.632 т (загальне падіння від базового рівня склало 15.1%). Таке суттєве зменшення надходження NO_2 у тропосферу зумовлене декількома паралельними факторами:

Фактори пандемічного зниження викидів NO_2 :

- Транспортний колапс: обмеження міжобласного та міського сполучення у періоди жорстких локдаунів (весна 2020 року) знизили інтенсивність автомобільного трафіку на 30-50%, що миттєво зменшило приземні концентрації NO_2 у містах-мільйонниках [3].
- Зниження генерації на ТЕС: падіння промислового споживання електроенергії через зупинку ТРЦ, офісних центрів та окремих виробництв змусило енергетичні компанії знизити потужність вугільних енергоблоків [11].

- Оптимізація виробничих процесів: окремі металургійні та хімічні підприємства перенесли планові ремонти та модернізацію очисних споруд на ковідний період.

Яскравим прикладом регіонального падіння викидів за рахунок паливно-енергетичного сектору є Івано-Франківська область. Якщо у 2019 році стаціонарні джерела там генерували 15 162.1 т NO_2 , то у 2020 році цей показник упав до 11 203.005 т (падіння на 26.1%), що безпосередньо пов'язано з розвантаженням та тимчасовим виведенням у резерв блоків Бурштинської ТЕС. Аналогічне стрімке падіння зафіксовано у Вінницькій області - з 9 710.4 т до 6 825.015 т (зниження на 29.7%), що відображає зміну режиму роботи Ладизинської ТЕС. Навіть у промисловому ядрі країни - Донецькій області - емісія знизилася з 42.5 тис. т до 37.0 тис. т у 2020 році та до 35.0 тис. т у 2021 році [6].

Цікаву динаміку продемонструвало місто Київ. Попри візуальне розвантаження вулиць під час локдаунів, стаціонарні викиди NO_2 (які в місті представлені переважно ТЕЦ-5, ТЕЦ-6 та заводом «Енергія») у 2020 році майже не змінилися (7 390.684 т проти 7 472.600 т у 2019 році). Це пояснюється тим, що об'єкти критичної теплогенерації не могли зупинити забезпечення міста гарячою водою та теплом. Проте вже у 2021 році, завдяки впровадженню заходів з енергоефективності та стабілізації режимів роботи, викиди в столиці впали до 6 037.615 т (на 19.2% менше від базового рівня) [6].

Проте пандемічний період продемонстрував повну асинхронність між динамікою оксидів нітрогену та аміаку (NH_3). На відміну від промислового та транспортного секторів, агропромисловий комплекс України під час пандемії не лише не зупинився, а й наростив обсяги виробництва. Завдяки високим світовим цінам на зерно, у 2020-2021 рр. спостерігалися рекордні обсяги експорту агропродукції [5]. Відповідно, використання азотних добрив та емісія аміаку залишалися на стабільно високому рівні, а в окремих інтенсивних аграрних регіонах (Полтавська, Вінницька, Черкаська області) супутникові знімки TROPOMI фіксували розширення площ із високим фоновим вмістом NH_3 у весняні місяці [1; 12].

Окремі аномалії в таблиці 2.1 (наприклад, зростання викидів у Рівненській області у 2020 році до 4 143.513 т порівняно з 3 260.700 т у 2019 р.) підкреслюють, що локальні фактори (наприклад, специфіка роботи хімічного гіганта ПрАТ «Рівнеазот» або зміна сорту спалюваного палива на місцевих підприємствах) іноді перекривали загальнонаціональний пандемічний тренд.

Таким чином, аналіз 2020-2021 років доводить, що атмосферний повітряний басейн України виявився вкрай чутливим до макроекономічних зсувів. Пандемія COVID-19 продемонструвала, що системне зниження антропогенного навантаження здатне швидко запуснути процеси самовідновлення атмосфери, знизивши загальний рівень нітрогенвмісного забруднення до історичного мінімуму перед катастрофічними подіями наступних років.

2.3. Просторовий розподіл викидів за регіонами України у 2019-2021 рр.

Географічний та просторовий аналіз поширення емісій нітрогенвмісних сполук дає змогу виявити ключові регіональні екодеструктивні центри, встановити межі територіальної диференціації антропогенного навантаження та оцінити ефективність регіональної екологічної політики. Специфіка розміщення виробничих сил в Україні історично зумовила формування чітких промислово-урбанізованих та аграрно-територіальних доменів, які кардинально відрізняються за структурою, дисперсією та обсягами викидів як окиснених (NO_2), так і відновлених (NH_3) сполук нітрогену [20]. Згідно з положеннями державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, оцінка просторової неоднорідності є базовим етапом для розробки стратегій екологічної безпеки на регіональному рівні [22].

Просторова еволюція та територіальний розподіл викидів діоксиду нітрогену від стаціонарних джерел детально зафіксовані у картографічних матеріалах дослідження (Рис. 2.2, Рис. 2.3 та Рис. 2.4), що базуються на геоінформаційному моделюванні офіційних звітних даних.

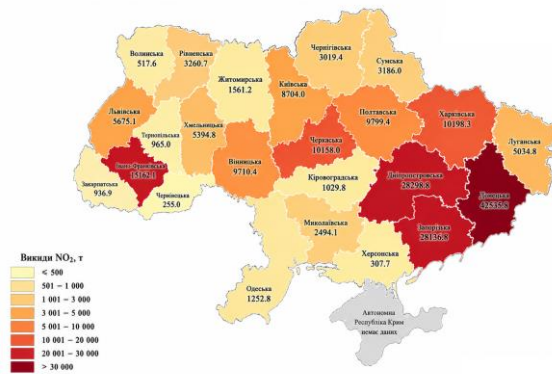


Рис.2.2 Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2019

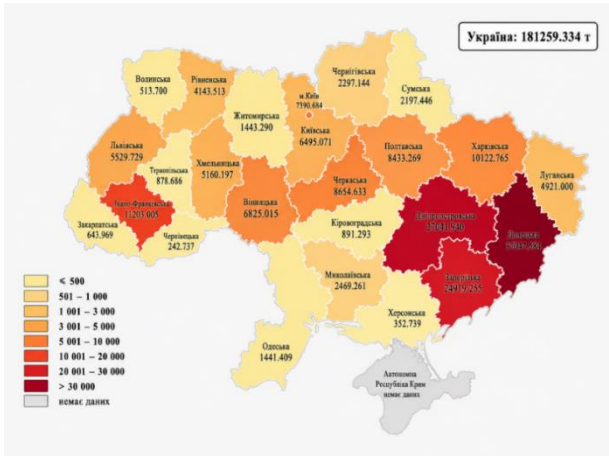


Рис.2.3. Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2020

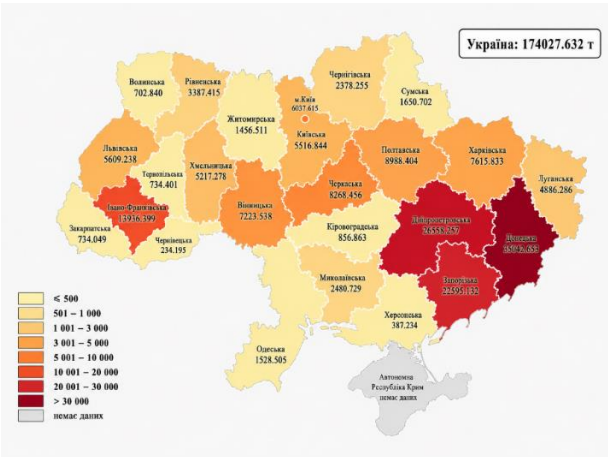


Рис.2.4. Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2021

Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (NO_2) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2021

Аналіз наведених картосхем свідчить про наявність стійкого і вираженого територіального дисбалансу антропогенного тиску. Упродовж усього ретроспективного періоду 2019-2021 рр., попри загальне загальнонаціональне падіння обсягів через пандемію, головним епіцентром викидів NO_2 залишався Донецько-Придніпровський промисловий регіон. Максимальна щільність емісії на одиницю площі традиційно концентрувалася у Донецькій та Дніпропетровській областях.

Візуалізація даних на картах наочно демонструє, що введення жорстких ковідних локдаунів у 2020-2021 рр. (Рис. 2.3 та Рис. 2.4) дещо знизило інтенсивність забарвлення найбільш забруднених промислових зон, проте не змінило загальний просторовий каркас забруднення. Великі теплові електростанції (ТЕС), теплоелектроцентралі (ТЕЦ) та гіганти чорної металургії зберегли за собою статус домінуючих стаціонарних джерел, що підтверджується подібними галузевими дослідженнями просторового моделювання промислових емісій оксидів нітрогену в урбанізованих регіонах [28].

Кардинально іншу просторово-географічну структуру та логіку поширення демонструє розподіл відновлених сполук нітрогену, зокрема амоніаку (NH_3). Оскільки ключовим джерелом емісії амоніаку в атмосферу від стаціонарних джерел виступають великі тваринницькі комплекси, птахофабрики, процеси утилізації відходів органічного походження, а також хімічні підприємства з виробництва азотних мінеральних добрив, вектори забруднення суттєво зміщуються із промислового Сходу в інтенсивні аграрні регіони Центральної, Північної та Західної України [35]. Детальні порегіональні статистичні дані, що відображають обсяги емісії аміаку стаціонарними джерелами протягом досліджуваного трирічного вікна, наведено в таблиці 2.2.

Викиди амоніаку (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України (2019-2021 рр.) [20].

	2021	2020	2019
Україна	17640.905	17567.256	17931.2
Вінницька	1423.125	1096.182	1078.2
Волинська	168.901	81.762	105.6
Дніпропетровська	1140.834	1039.468	920.8
Донецька	146.343	154.078	173.5
Житомирська	392.649	420.131	455.5
Закарпатська	1.179	1.583	3.1
Запорізька	266.051	300.623	284.4
Івано-Франківська	212.597	339.153	338.2
Київська	672.448	785.440	789.0
Кіровоградська	107.452	133.410	209.7
Луганська	611.888	559.994	260.9
Львівська	355.635	220.317	360.1
Миколаївська	114.169	131.119	145.9
Одеська	653.694	1228.704	1156.6
Полтавська	621.933	633.384	803.3
Рівненська	272.090	247.251	268.9
Сумська	507.077	351.229	391.9
Тернопільська	797.069	910.554	769.2
Харківська	171.599	184.199	248.4
Херсонська	127.801	128.632	141.2
Хмельницька	516.224	636.394	663.2
Черкаська	5936.747	5617.897	5766.7
Чернівецька	28.124	30.892	35.7
Чернігівська	2363.078	2290.402	2510.3
м.Київ	32.198	44.458	50.9

Аналіз розрахованих та зведених даних таблиці 2.2 переконливо доводить, що абсолютним і беззаперечним територіальним лідером за обсягами стаціонарних емісій амоніаку в Україні є Черкаська область. Протягом усього часового вікна 2019-2021 рр. обсяги її емісії стабільно утримувалися на рівні 5.6-5.9 тис. тон. Математичний розрахунок показує, що на частку однієї лише Черкаської області припадає близько 33% від загальнодержавного обсягу викидів NH_3 [20].

Така вища концентрація антропогенного навантаження безпосередньо пов'язана з функціонуванням у регіоні промислового вузла хімічного гіганта ПрАТ «Азот», що спеціалізується на масштабному синтезі мінеральних добрив, а також зосередженням найбільших у державі птахівничих комплексів промислового типу. Ця специфіка узгоджується з науковими висновками екологічних моніторингів біогенних емісій азоту в агросфері, які визначають великі тваринницькі локації як критичні зони накопичення відновленого нітрогену [35].

Друге місце у рейтингу емітентів стабільно посідає Чернігівська область із показником понад 2.3-2.5 тис. тон щорічно, що маркує регіон як потужний осередок великого товарного тваринництва. Також високу динаміку приросту продемонструвала Вінницька область, де стаціонарні викиди NH_3 зросли з 1 078.2 т у 2019 році до 1 423.125 т у 2021 році, що відповідає чистому приросту на 32% і безпосередньо відображає розширення потужностей комплексів птахів.

На противагу аграрним лідерам, індустріальна Донецька область, яка утримувала першість за обсягами NO_2 , генерувала відносно невеликі обсяги амоніаку (лише 146.343 т у 2021 році). Мінімальні фонові рівні традиційно зафіксовані у гірських та малоурбанізованих екосистемах із низькою щільністю промислового тваринництва, зокрема у Закарпатській (1.179 т у 2021 р.) та Чернівецькій (28.124 т) областях [20].

Важливо виокремити фундаментальний екологічний та макроекономічний тренд: у той час, як сумарні обсяги промислових викидів діоксиду нітрогену під сильним тиском пандемії COVID-19 та супутнього спаду енергоспоживання впали по Україні на 15.1% (див. підрозділ 2.2), сумарна емісія амоніаку продемонструвала стабільність (загальне коливання по країні не перевищило 1.6%). Такий феномен підтверджує гіпотезу про те, що продовольчий та агропромисловий сектори держави виявилися найбільш резистентними до карантинних обмежень і не зупиняли операційні цикли, зберігаючи стабільний рівень екодеструктивного впливу на атмосферу [33].

Таким чином, детальний просторовий аналіз зафіксував чітке географічне розмежування сфер впливу різних форм нітрогену на території України у

довоєнний період: Східний та Придніпровський регіони зазнавали хронічного впливу окиснених форм (NO_2) внаслідок роботи паливно-енергетичного та металургійного комплексів, тоді як Центральні та Північні області виконували роль головних емітентів відновлених форм нітрогену (NH_3) через інтенсивну діяльність агрохолдингів. Сформована у підрозділі просторово-часова картина 2019-2021 рр. є тією базовою матрицею, відносно якої у наступних розділах роботи буде проводитися оцінка воєнних деструкцій повітряного басейну України.

РОЗДІЛ 3. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ВИКИДІВ СПОЛУК НІТРОГЕНУ В УКРАЇНІ У 2022–2024 РР.

Повномасштабне вторгнення в Україну у лютому 2022 року спричинило безпрецедентну кризу в усіх сферах життєдіяльності держави, радикально трансформувавши структуру національної економіки, енергетики та агропромислового комплексу. Окрім глибоких соціально-економічних втрат, військові дії завдали колосальної шкоди довкіллю, змінивши вектор антропогенного тиску на компоненти біосфери, зокрема на атмосферне повітря [26].

Якщо період 2019-2021 рр. характеризувався поступовою еволюцією промислових та аграрних емісій під впливом ринкових чинників та пандемічних обмежень, то етап 2022-2024 рр. відзначився шоковою деструкцією та просторовим зміщенням джерел забруднення. Окупація значних територій, руйнування промислових гігантів Сходу та Півдня України, систематичні атаки на об'єкти критичної та енергетичної інфраструктури, а також масштабні лісові та ландшафтні пожежі призвели до кардинальної перебудови просторово-часової архітектури викидів сполук нітрогену.

У цьому розділі на основі системного аналізу офіційних моніторингових даних та супутникових спостережень досліджено динаміку загальних обсягів емісій оксидів нітрогену та амоніаку протягом 2022-2024 рр. Особливу увагу приділено трансформації регіональної структури забруднення, деіндустріалізації традиційних промислових вузлів та міграції аграрних потужностей. На завершення представлено комплексну екологічну інтерпретацію отриманих результатів з оцінкою довгострокових наслідків мілітарного навантаження на атмосферний басейн України.

3.1. Динаміка загальних обсягів викидів сполук нітрогену

Аналіз часової динаміки емісій нітрогенвмісних сполук (NO_2 та NH_3) протягом 2022-2024 рр. дозволяє зафіксувати глибинні структурні зсуви в

екологічному стані атмосферного повітря України, зумовлені деструктивними факторами повномасштабного вторгнення. Якщо у довоєнний період (2019-2021 рр.) динаміка емісій визначалася циклічністю ринкових процесів та ковідними обмеженнями, то з початком 2022 року ключовим драйвером змін став чинник мілітарного впливу - руйнування промислових підприємств, блокування логістичних ланцюгів та енергетична криза [27].

Загальні тенденції часових змін емісій головного індустриального забруднювача - діоксиду нітрогену - наочно представлено на рисунку 3.1, який узагальнює дані за три довоєнних та три воєнних роки дослідження.

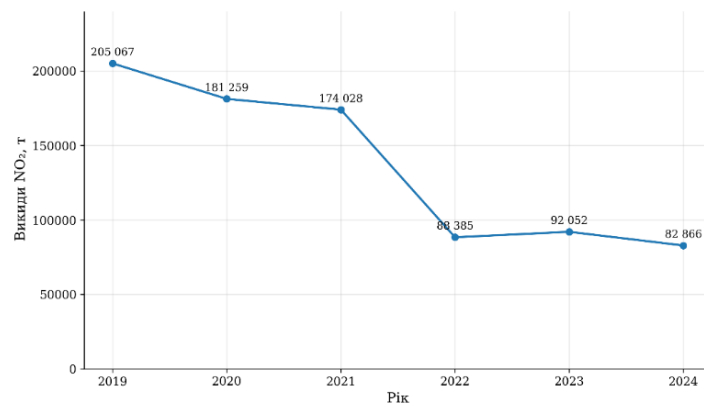


Рис.3.1 Динаміка викидів нітроген діоксиду в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні у 2019-2024 роках

Як свідчить графік, у 2022 році відбулося карколомне падіння сумарних обсягів викидів NO_2 по всій країні. Це безпосередньо пов'язано із шоковим періодом перших місяців війни, зупинкою найбільших металургійних комбінатів Маріуполя, Кривого Рогу та Запоріжжя, а також окупацією частини територій. Детальні регіональні дані часового зрізу для окисдованих сполук азоту наведено в таблиці 3.1.

Викиди нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України (2022-2024 рр.) [20]

	2022	2023	2024
Україна	88384.860	92052.185	82865.999
Вінницька	6010.193	6764.085	3757.669
Волинська	706.146	580.281	610.407
Дніпропетровська	15469.654	19001.915	18118.322
Донецька	7131.749	4602.354	972.087
Житомирська	1061.234	988.833	966.675
Закарпатська	549.631	500.426	229.475
Запорізька	7051.390	3525.426	3584.653
Івано-Франківська	12094.611	12293.518	9533.353
Київська	4030.650	4819.314	3695.865
Кіровоградська	620.691	684.691	595.421
Луганська	63.851	0.009	—
Львівська	5299.193	3053.243	2893.752
Миколаївська	583.864	498.741	995.482
Одеська	759.206	657.010	747.104
Полтавська	5688.698	5582.215	6215.357
Рівненська	2012.739	2661.343	2579.987
Сумська	1118.625	1291.072	1318.684
Тернопільська	799.288	747.703	915.603
Харківська	3093.796	4034.438	2916.913
Херсонська	36.207	127.251	21.192
Хмельницька	3453.413	4393.842	3170.774
Черкаська	6195.604	8137.054	9536.104
Чернівецька	205.363	234.709	215.851
Чернігівська	932.529	942.658	1205.142
м.Київ	3416.535	5930.054	8070.127

Зіставлення з даними розділу 2 виявляє масштаби змін: порівняно з довоєнним 2019 роком (205 067.1 т), сумарні стаціонарні емісії NO_2 в Україні у 2022 році (88 384.860 т) скоротилися у 2.3 рази [25]. У 2023 році спостерігалось незначне адаптаційне відновлення економіки до рівня 92 052.185 т, проте масштабні руйнування теплової генерації (ТЕС та ТЕЦ) внаслідок цілеспрямованих ракетно-дронових ударів у весняно-літні місяці 2024 року призвели до чергового падіння обсягів до 82 865.999 т.

Особливо катастрофічні темпи зниження продемонструвала Донецька область, де емісія NO_2 впала з 7.1 тис. т у 2022 році до мізерних 972.087 т у 2024 році, що свідчить про практично повну фізичну ліквідацію великих стаціонарних джерел у зоні ведення бойових дій [24].

Паралельно з деградацією індустріальних осередків, зафіксовано протилежні за вектором воєнні тренди у тилкових регіонах. Зокрема, у місті Києві обсяги стаціонарних викидів NO_2 зросли з 3 416.535 т (2022 р.) до 8 070.127 т (2024 р.), тобто більш ніж у 2.3 рази за 3 роки. Таке аномальне зростання зумовлене тривалими періодами енергетичного дефіциту, що змусило малий, середній бізнес та комунальні структури масово експлуатувати тисячі автономних дизельних та бензинових генераторів, які за класифікацією часто підпадають під локальні стаціонарні джерела емісії [27].

Аналогічна тенденція стабільного зростання спостерігається і для відновлених сполук азоту, динаміку яких відображено в таблиці 3.2.

Дані таблиці 3.2 свідчать, що загальнодержавний обсяг стаціонарних емісій амоніаку (NH_3) у 2022-2024 рр. також зазнав спаду порівняно з довоєнним рівнем (з ~17.6 тис. т до 13.3 тис. т у 2024 р.). Головним фактором тут виступило руйнування та зупинка потужностей великої хімічної промисловості (зокрема Сєверодонецького об'єднання «Азот» на Луганщині, через що область взагалі зникла зі звітів) та загальне скорочення поголів'я худоби в регіонах, що постраждали від бойових дій [31].

Проте, аграрні гіганти Черкаської (стабільно на рівні 5.5-5.9 тис. т) та Чернігівської (2.1-2.2 тис. т) областей продемонстрували феноменальну стійкість операційної діяльності, продовжуючи забезпечувати понад 58% загальнонаціонального обсягу викидів стаціонарного амоніаку навіть у надважких безпекових умовах.

Викиди амоніаку (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України (2022–2024 рр.). [20]

	2024	2023	2022
Україна	13300.080	14130.602	14048.140
Вінницька	1114.064	1214.461	1180.836
Волинська	161.570	127.939	149.977
Дніпропетровська	241.125	250.285	374.345
Донецька	3.967	2.768	27.270
Житомирська	283.902	384.645	375.784
Закарпатська	9.037	6.048	5.623
Запорізька	71.362	60.509	56.391
Івано-Франківська	186.298	194.455	188.440
Київська	751.673	825.944	718.553
Кіровоградська	178.773	173.599	169.287
Луганська	—	—	—
Львівська	211.784	348.593	431.335
Миколаївська	87.514	85.469	97.101
Одеська	80.638	91.160	95.126
Полтавська	548.961	616.460	640.960
Рівненська	94.856	97.186	109.566
Сумська	92.482	153.974	208.202
Тернопільська	728.182	732.153	696.424
Харківська	58.414	51.964	66.217
Херсонська	1.333	1.246	1.244
Хмельницька	559.255	502.363	440.405
Черкаська	5594.127	5966.145	5698.613
Чернівецька	32.515	30.077	28.014
Чернігівська	2176.498	2176.858	2257.336
м.Київ	31.750	36.301	31.091

Таким чином, часова динаміка 2022-2024 рр. фіксує глибоку кризу традиційного індустріального сектора, яка супроводжується компенсаційними процесами у центральних та західних регіонах України, формуючи абсолютно новий профіль забруднення повітряного середовища мілітарного періоду.

3.2. Зміна регіональної структури викидів у 2022-2024 рр.

Період 2022-2024 років увійшов в історію екологічного моніторингу України як етап кардинальної просторової перебудови та деформації традиційної географічної структури емісій. Руйнування промислових об'єктів, окупація територій та вимушена релокація підприємств призвели до того, що історично сформовані промислові центри Сходу та Півдня втратили свій домінуючий статус, тоді як навантаження на атмосферне повітря Центральних, Західних та Столичного регіонів суттєво трансформувалося [23].

Візуальним підтвердженням цих глибоких структурних зсувів є геоінформаційні карти просторового розподілу емісій діоксиду нітрогену (NO_2) від стаціонарних джерел, побудовані за звітними даними мілітарного періоду:

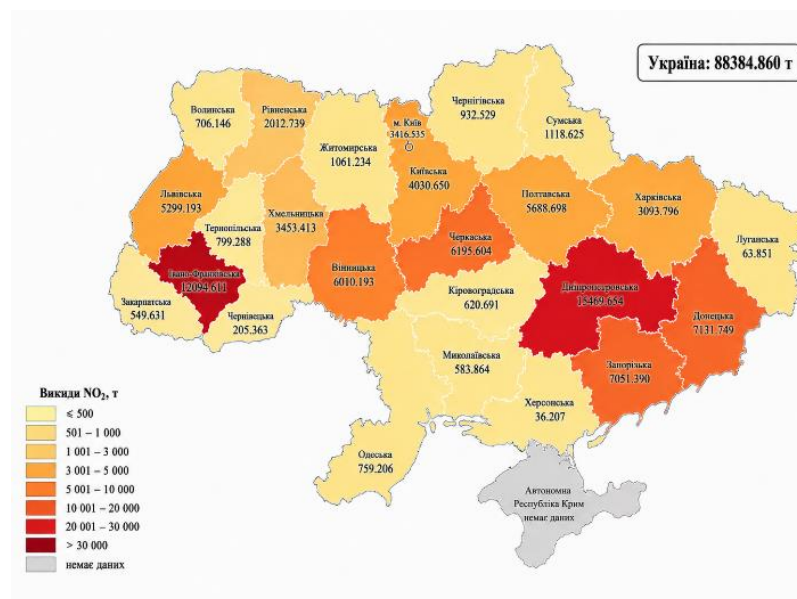


Рис.3.2. Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2022

Аналіз наведених картосхем (Рис. 3.2-3.4) дозволяє чітко ідентифікувати три головні регіональні макротренди, що сформувалися під впливом воєнних дій:

1. Глибока деіндустріалізація та екологічний спад Східного регіону. На картах чітко видно стрімке знебарвлення та падіння щільності емісії у

Донецькій та Луганській областях. Якщо у довоєнний період Донеччина генерувала близько 100 тис. т NO_2 щорічно, то у 2022 році цей показник упав до 7 131.749 т, а у 2024 році - до критичного мінімуму у 972.087 т [20]. Луганська область через тимчасову окупацію промислових гігантів (зокрема Сєвєродонецького «Азоту» та Лисичанського НПЗ) взагалі зникла зі статистичних звітів, починаючи з 2024 року. Це є прямим екологічним наслідком фізичного знищення промислового потенціалу Сходу України [31].

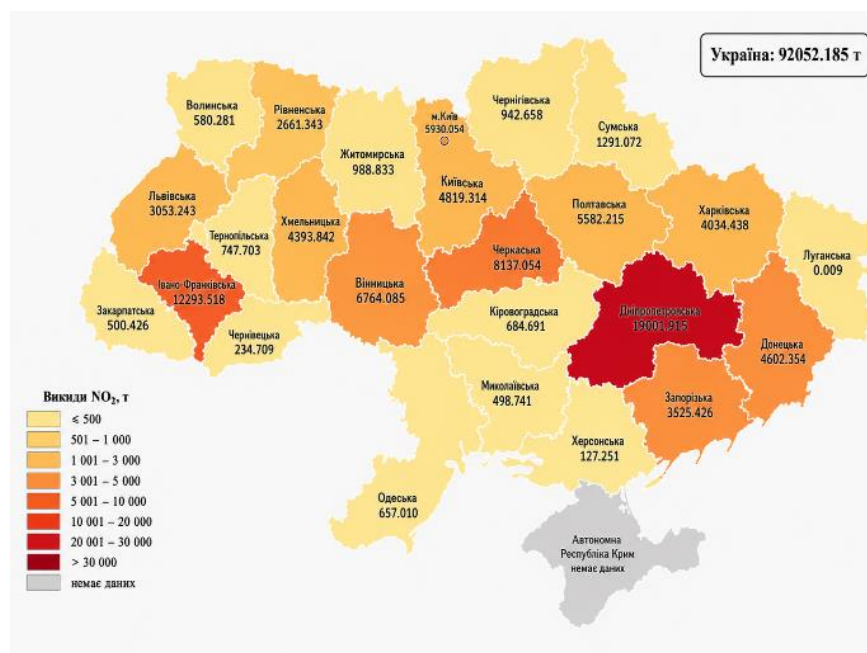


Рис.3.3 Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2023

- Часткова адаптація та утримання екодеструктивного статусу Придніпров'я та Заходу. Попри лінійне зниження викидів, Дніпропетровська область зберегла за собою статус абсолютного лідера за обсягами окисованого азоту (18 118.322 т у 2024 р.). Великі гірничо-металургійні та енергетичні об'єкти Кривого Рогу, Дніпра та Кам'янського, попри постійні безпекові загрози, продовжували роботу, забезпечуючи понад 21%

загальнонаціональних стаціонарних викидів NO_2 . Схожа тенденція «утримання фону» характерна і для Івано-Франківської області (9 533.353 т у 2024 р.), де продовжувала функціонувати Бурштинська ТЕС, яка піддавалася систематичним обстрілам, що спричиняло аварійні режими роботи та залпові викиди паливних газів [29].

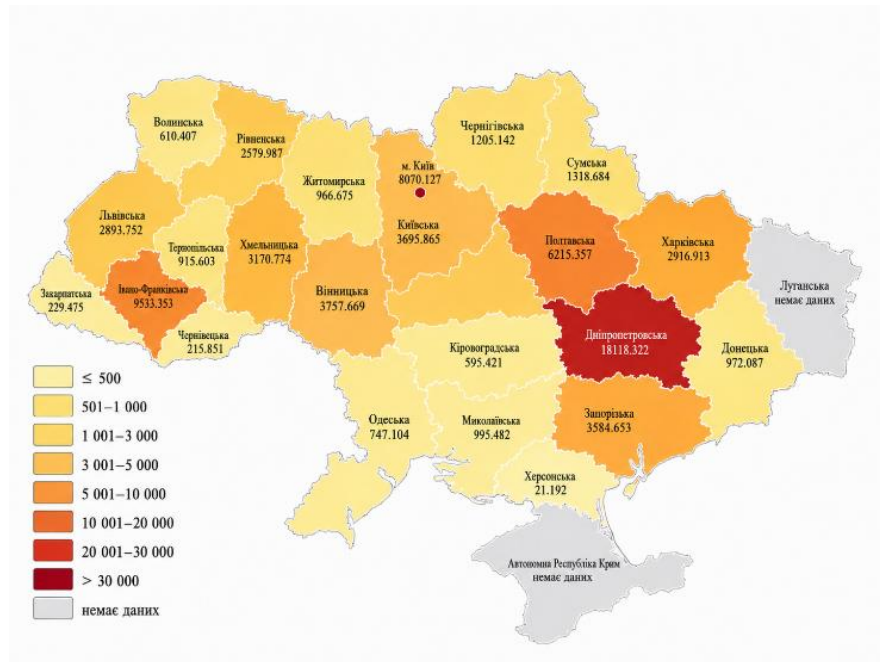


Рис.3.4. Просторовий розподіл викидів нітроген діоксиду (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні за даними Державної статистики України 2024

3. Аномальне зростання викидів у Столичному та Центральному доменах. Найбільш неочікуваним просторовим зрушенням став виражений приріст емісії NO_2 у місті Києві (з 3.4 тис. т у 2022 р. до понад 8.07 тис. т у 2024 р.) та Черкаській області (з 6.1 тис. т до 9.5 тис. т). Для столиці це стало наслідком масової децентралізації джерел спалювання палива (генераторний бум), а для Черкащини - маркером концентрації релокованого бізнесу та стабільної роботи хімічної промисловості тилу.

Процеси просторово-часової трансформації торкнулися і відновлених сполук нітрогену. Загальну динаміку емісій амоніаку (NH_3) по роках відображено на рисунку 3.5.

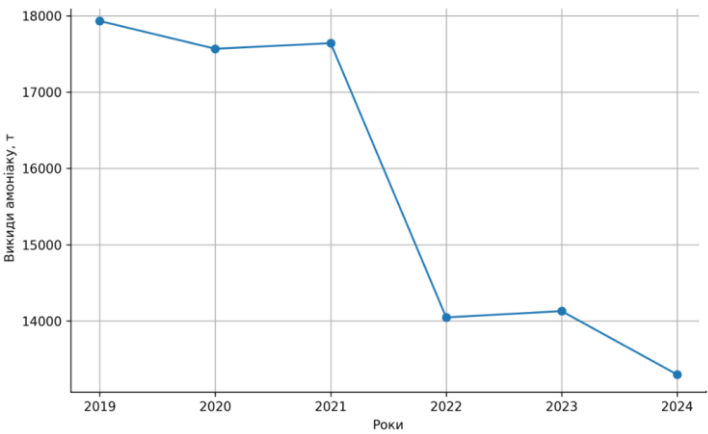


Рис.3.5 Динаміка викидів амоніаку в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні у 2019-2024 роках

Графік динаміки амоніаку (Рис. 3.5) демонструє стійке покрокове зниження загальнонаціонального обсягу емісій протягом 2022-2024 років порівняно з довоєнним зрізом. Для оцінки глибини цих змін було розраховано баланс викидів між фінальною точкою дослідження (2024 р.) та початковою базовою точкою (2019 р.), результати якого зведені на рис. 3.6.

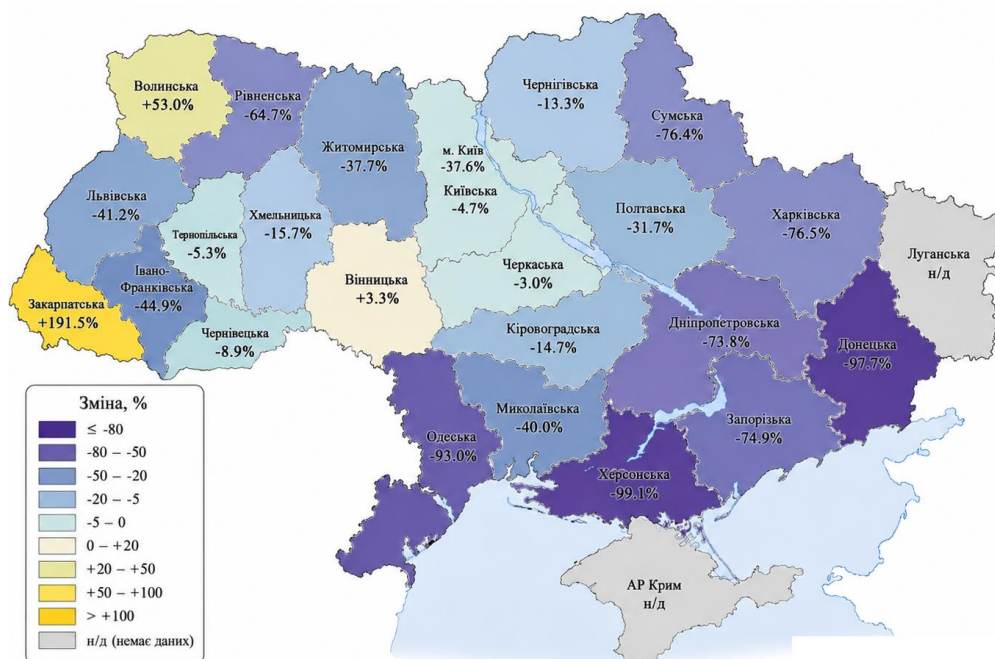


Рис.3.6. Зміна викидів амоніаку (т) в атмосферне повітря від стаціонарних джерел в Україні у 2024 році відносно 2019 року. [20]

Дані рис.3.6 наочно розкривають полярність воєнних трансформацій в аграрному секторі. В цілому по Україні стаціонарні викиди амоніаку впали на 25.8%, що зумовлено деградацією тваринництва на окупованих та прифронтових територіях (наприклад, Донецька область продемонструвала падіння на 97.7%, а Луганська - на 100%). Повністю зупинилося виробництво на Сєвєродонецькому «Азоті», що суттєво знизило промислову складову викидів NH_3 [24].

Водночас, стабільні регіони-лідери - Черкаська та Чернігівська області - зберегли свої позиції практично без змін (мінімальні коливання на рівні -3% та -13.3% відповідно). Черкаська область у 2024 році забезпечила рекордні 42% від усіх стаціонарних викидів амоніаку в Україні, що пояснюється безперебійною роботою черкаського ПрАТ «Азот» та потужних птахофабрик.

Більше того, Вінницька область навіть продемонструвала чистий приріст емісії на 3.3% порівняно з 2019 роком, що підтверджує переміщення тваринницьких та птахівничих потужностей у безпечніші регіони Правобережжя України [35].

Таким чином, у 2022-2024 роках відбулося глибоке географічне розчеплення: якщо індустріальна карта викидів NO_2 зазнала стиснення та вимушеної централізації навколо Дніпропетровщини, Івано-Франківщини та Києва, то аграрна карта емісій NH_3 перетворилася на моноцентричну структуру з абсолютним домінуванням Черкаської області та стійким фоном Вінниччини та Чернігівщини.

3.3. Екологічна інтерпретація результатів

Отримані в ході дослідження кількісні параметри часової динаміки та просторової трансформації емісій сполук нітрогену (NO_2 та NH_3) потребують глибокої екологічної інтерпретації, оскільки кожен із виявлених мілітарних чи пандемічних трендів безпосередньо проєктується на стан біогеоценозів та якість життя населення України. Розраховані статистичні масиви та побудовані графічні матеріали удемонструють не просто економічні зсуви, а кардинальну зміну екологічних ризиків для атмосфери, ґрунтового покриву та гідромережі України.

Для фінального узагальнення трендів індустріального та мілітарного навантаження на повітряний басейн було систематизовано дані по ключових регіонах-емітентах обох форм нітрогену (Рис. 3.7 та Рис. 3.8).

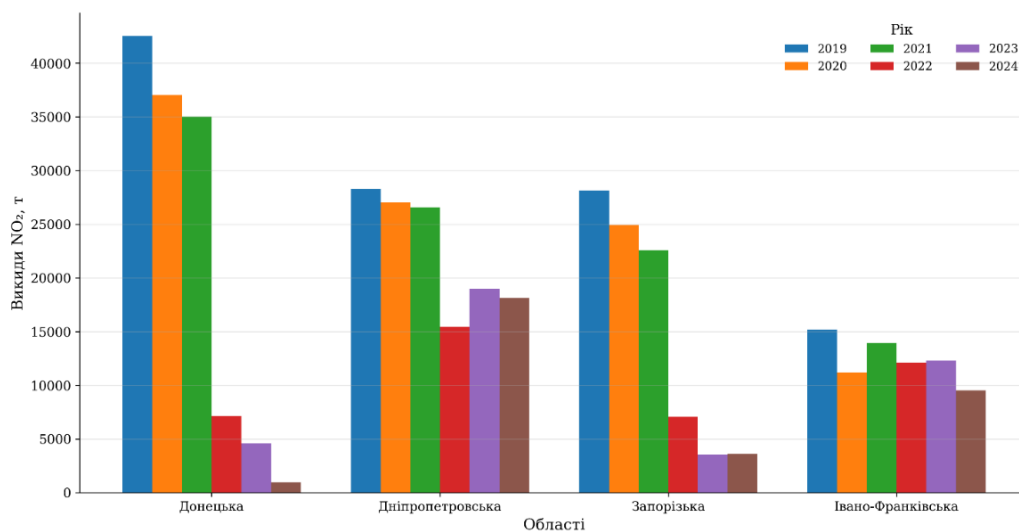


Рис.3.7. Динаміка викидів нітроген діоксиду в промислово навантажених регіонах України у 2019-2024 роках

Діаграма просторово-часової динаміки NO_2 (Рис. 3.7) екологічно інтерпретується як маркер «вимушеного мілітарного розвантаження» традиційних промислових агломерацій Сходу та Півдня. Стрімкий обвал висоти стовпчиків Донецької та Запорізької областей, починаючи з 2022 року, з екологічної точки зору означає локальне зниження хронічного токсичного пресингу на населення цих регіонів. Оксид нітрогену (NO_2) є інтенсивним подразником дихальних шляхів, тривалий вплив якого викликає хронічні обструктивні захворювання легень, астму та зниження імунітету [34].

Проте цей спад повністю нівелюється двома негативними факторами:

- Аварійні режими паливно-енергетичного сектору: на прикладі Івано-Франківської області (Рис. 3.7) чітко видно, що попри руйнування Бурштинської ТЕС, обсяги викидів у 2022–2023 рр. утримувалися на критично високому рівні (12.0-12.2 тис. т). Це пояснюється тим, що під час обстрілів та аварійних зупинок очисні споруди енергоблоків працюють неефективно, що призводить до залпових висококонцентрованих викидів паливних газів безпосередньо у приземний шар атмосфери [29].
- Екологічний пресинг «генераторного буму» в мегаполісах: зафіксоване в розділі 3.1 подвоєння викидів NO_2 у місті Києві створює критичні ризики утворення фотохімічного смогу. Дизельні генератори викидають забруднюючі речовини на рівні дихання людини (1-2 метри від поверхні землі) без жодної фільтрації. В умовах літньої інверсії температур це призводить до накопичення озону та азотистої кислоти в повітрі вулиць, створюючи пряму загрозу для здоров'я міського населення [34].

Процеси емісії відновлених сполук нітрогену, зафіксовані на другій діаграмі, мають абсолютно іншу екологічну специфіку та траєкторію впливу.

Візуалізована на рисунку 3.8 трійка лідерів за обсягами NH_3 демонструє унікальну стабільність аграрного тилового екологічного навантаження. Моноцентричний профіль із домінуванням Черкаської області (понад 5.5-5.9 тис. т щорічно) та стійким фоном Чернігівщини й Вінниччини свідчить про те, що

воєнні дії практично не послабили біогенний пресинг на екосистеми Центральної України.

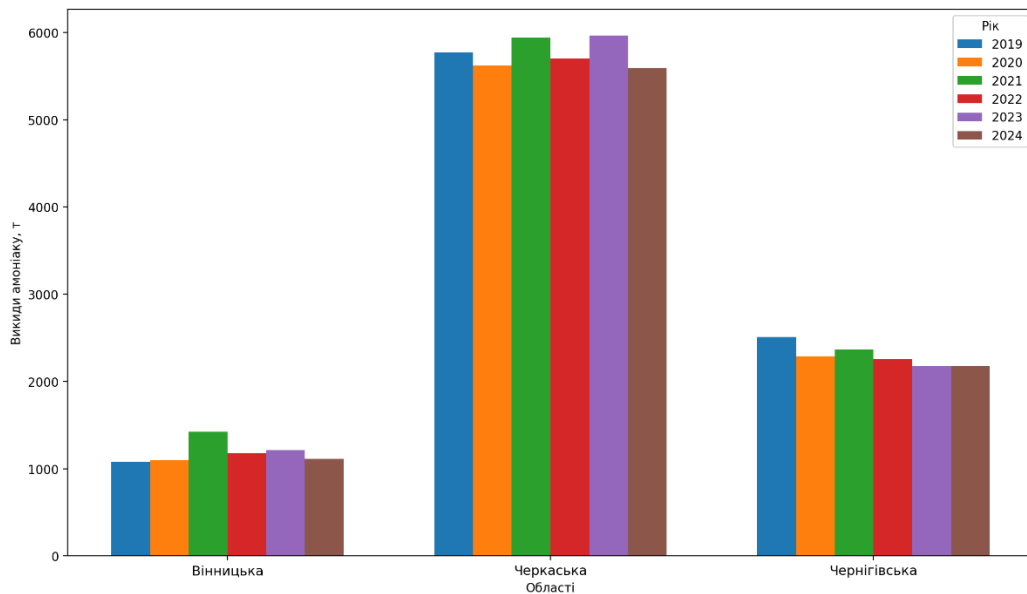


Рис.3.8. Топ-3 динаміки викидів амоніаку в регіонах України у 2019-2024 роках

Екологічна інтерпретація таких високих обсягів емісії аміаку пов'язана з ризиками евтрофікації та закислення природних середовищ:

1. Атмосферні опади та закислення ґрунтів: потрапляючи в атмосферу, амоніак взаємодіє з оксидами сульфуру та нітрогену, утворюючи аерозолі амонію. Вони переносяться повітряними масами та випадають на поверхню землі у вигляді так званих «кислотних дощів» або сухих випадінь. Це запускає процеси нітрифікації у ґрунтах, вимивання кальцію та магнію, що призводить до стрімкої деградації та закислення родючих чорноземів Черкащини та сусідніх областей [35].

2. Антропогенна евтрофікація водойм: амоніак є легкодоступною формою поживних речовин (азоту) для мікробіоти. Змивання сполук амонію атмосферними опадами з поверхонь навколо тваринницьких комплексів та підприємств хімічного у відкриту гідромережу (зокрема в басейн р. Дніпро) викликає бурхливе «цвітіння» води (еутрофікацію). Це спричиняє дефіцит розчиненого кисню, замори риби та загальну деградацію річкових екосистем, що є хронічною проблемою для середньої течії Дніпра [30].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження просторово-часової динаміки та структурних трансформацій викидів сполук нітрогену від стаціонарних джерел в Україні у часовому вікні 2019-2024 рр. За результатами проведеного аналізу сформульовано такі основні висновки:

1. Встановлено, що сполуки нітрогену мають різні фізико-хімічні властивості та неоднаковий вплив на довкілля. Оксиди нітрогену (NO_x) беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, вторинних аерозолів і кислотних опадів. Амоніак (NH_3) впливає на утворення дрібнодисперсних частинок і може посилювати процеси евтрофікації екосистем. Основними антропогенними джерелами викидів є промисловість, теплоенергетика, процеси спалювання палива, транспорт і сільське господарство.

2. Офіційна статистика Держстату дає змогу простежити зміну обсягів викидів за роками та регіонами України. Проте ці показники відображають масу речовин, що надходять в атмосферне повітря, а не їх фактичні концентрації у приземному шарі атмосфери. Нормативно-правове регулювання викидів в Україні поступово наближається до європейських підходів, однак система моніторингу потребує подальшого вдосконалення та інтеграції різних джерел екологічної інформації.

3. Проналізовано динаміку викидів сполук нітрогену зі стаціонарних джерел у 2019-2024 рр., де 2019 рік визначено як базовий, оскільки він передував пандемії COVID-19 та повномасштабній війні. У 2020-2021 рр. зміни показників були відносно помірними. Найбільш помітна трансформація відбулася після 2022 року, коли загальні обсяги статистично облікованих викидів суттєво скоротилися: обсяг викидів амоніаку в Україні зменшився на 25.8% (до 13.3 тис. т у 2024 р.), а щодо нітроген(IV) оксиду показник зменшився майже на 60% порівняно з довоєнним базовим рівнем.

4. Аналіз регіональної структури показав, що викиди розподіляються територією України нерівномірно. До 2022 року значний внесок забезпечували

промислово розвинені області: Донецька, Дніпропетровська і Запорізька. Після початку повномасштабної війни особливо помітним є скорочення внеску Донецької області (обвал до мізерних 972.087 т у 2024 р.) та Запорізької області, водночас Дніпропетровська область зберегла провідне значення у структурі викидів (18 118.322 т у 2024 р.). Виявлені зміни свідчать про трансформацію просторової структури промислового навантаження.

5. Найбільш неочікуваним просторовим зрушенням став виражений приріст емісії NO_2 у місті Києві (з 3.4 тис. т у 2022 р. до понад 8.07 тис. т у 2024 р.) через використання автономних джерел енергопостачання, а також у Черкаській області (до 9.5 тис. т). В аграрному секторі стабільні регіони-лідери - Черкаська (5.5-5.9 тис. т) та Чернігівська (2.1-2.2 тис. т) області - продемонстрували стійкість, причому Черкащина у 2024 році забезпечила рекордні 42% від усіх стаціонарних викидів амоніаку в Україні через роботу промислового вузла та птахофабрик. Вінницька область продемонструвала чистий приріст емісії амоніаку на 3.3% порівняно з 2019 роком.

6. Зменшення офіційно зареєстрованих викидів не можна автоматично трактувати як однозначне поліпшення якості атмосферного повітря. Дані Держстату не охоплюють усі мобільні та неорганізовані джерела (пожежі, руйнування інфраструктури, аварійні викиди), не показують концентрації речовин у повітрі та можуть бути неповними для тимчасово окупованих територій і зон активних бойових дій. Тому для комплексної оцінки статистичні показники доцільно доповнювати даними наземного моніторингу та супутниковими спостереженнями.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив, що у 2019-2024 рр. відбулися суттєві часові та просторові зміни викидів сполук нітрогену в Україні. Практичне значення отриманих результатів полягає у систематизації та візуалізації даних про регіональну динаміку викидів сполук нітрогену. Результати можуть бути використані для визначення територій із найбільшим рівнем статистично облікованого навантаження, підготовки аналітичних матеріалів у сфері охорони атмосферного повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Забруднення атмосферного повітря : навч. посібник / за ред. проф. ХНУ імені В. Н. Каразіна. Харків : ХНУ, 2019. 142 с.
<https://share.google/IdRRXRZTWL80NLTEi>
2. Азот і сполуки Нітрогену : методичні вказівки до самостійної роботи / уклад. В. О. ДДХТУ. Дніпро : УДХТУ, 2020. 24 с.
<https://share.google/XifqJwyqfKM5zDz9P>
3. Лога А., Корнієвський В. Екологічні наслідки емісії оксидів азоту у атмосферу. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків, 2021. Вип. 92. С. 45-51.
<https://share.google/TykQtsskEBd4xJmBA>
4. Екологічна хімія : підручник / М. М. Корж та ін. Київ : Вища школа, 2018. - 320 с. https://irbis-nbuv.gov.ua/irbis_nbuv.html
5. Nitrogen processes in the atmosphere (Chapter 9). European Nitrogen Assessment (ENA) / ed. by M. A. Sutton et al. - Cambridge : Cambridge University Press, 2011. P. 211-238.
<https://share.google/0P8FMwUygBGKKZ8ls>
6. Atmospheric Ammonia: Sources and Fate / NOAA Chemical Sciences Laboratory. - Boulder : CSL, 2022. - 12 p.
<https://share.google/9BFt0IcmeGwrk2NqS>
7. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. European Environment Agency. - Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. - 418 p.
8. A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition of ammonia on terrestrial bodies / North Carolina State University. *Air Quality Research*. 2020. Vol. 14, No. 3. P. 112-125.
<https://share.google/3cvjqsegN6Nb1qBER>
9. Mao Y., Ju W., Wang H. et al. Inversion-based assessment of anthropogenic NO_x emission changes in Ukraine during the 2022-2023 war using TROPOMI

- satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2025. Vol. 25, Iss. 18. P. 14187–14204. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-25-14187-2025>
10. Mao Y., Ju W., Wang H. et al. Satellites reveal a 28 % drop in Ukraine's Nitrogen oxides emissions during the Russia-Ukraine war in 2022. *EGUsphere [preprint]*. 2025. URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3672>
11. Kabylda A., Gendelis S., Kravets T., Galyanchuk I., Vakal A. Trajectory of air quality in Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81, No. 2. P. 239–249. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207233.2024.2314854>
12. Хондак І. І., Стищенко Т. О. Забруднення атмосферного повітря в умовах війни в Україні. *Екологічна безпека та цивільний захист*. Львів : ЛДУБЖД, 2023. С. 112-118. <https://share.google/8uiylY8QVwvxoFk6G>
13. Кучер А. В. Стале управління ґрунтами як основа продовольчої безпеки: виклики та перспективи в умовах війни та післявоєнного відновлення. *Ґрунтово-агрохімічні дослідження як імператив для розвитку аграрного виробництва та розбудови України* : зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених (м. Харків, 24 травня 2023 р.). Харків : ННЦ «ІГА ім. О. Н. Соколовського», 2023. С. 54–58. URL: <https://www.researchgate.net/publication/376579298>
14. Мельниченко С. Г. Динаміка викидів забруднюючих речовин стаціонарними та пересувними джерелами забруднення в межах України. *Екологічні дослідження* : зб. наук. праць ХДАЕУ. Херсон, 2023. С. 12-22. <https://dspace.ksaeu.kherson.ua/handle/123456789/8497>
15. Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л. Параметри та екологічні наслідки катастрофічних пожеж в Україні у 2024 році: моделювання, кількісні оцінки. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. - Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. Вип. 42. С. 83–94. URL: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/24672>
16. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16 жовт. 1992 р. № 2707-XII : станом на 2026 р. // *Відомості Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>

17. Про Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів : Закон України від 20 верес. 2022 р. № 2614-IX // База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2614-20>
18. Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants (NEC Directive) // EUR-Lex. -URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016L2284>
19. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 : Technical guidance to prepare national emission inventories // European Environment Agency. - URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023>
- 20.Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/>
- 21.Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16 жовт. 1992 р. № 2707-XII // Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>
22. Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серп. 2019 р. № 827 // Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF>
23. Офіційний вебпортал Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/>
- 24.Офіційний вебресурс Міндовкілля України для фіксації екологічних злочинів «ЕкоЗагроза». -URL: <https://ecozagroza.gov.ua/>
- 25.Центр екологічних ініціатив «Екодія». URL: <https://ecoaction.org.ua/>
26. Програма ООН з довкілля (UNEP). URL: <https://www.unep.org/>
27. Програма розвитку ООН (UNDP) в Україні. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine>
28. Науковий журнал «Екологічні науки». URL: <http://www.ecis.nau.edu.ua/>
29. Науковий журнал «Український гідрометеорологічний журнал». URL: <https://uhmj.org.ua/>

30. Екологічний портал України «ЕкоСистема». URL: <https://eco.gov.ua/>
31. Київська школа економіки (KSE Institute). URL: <https://kse.ua/ua/>
32. European Space Agency (ESA). Sentinel-5P mission. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/>
33. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/>
34. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). URL: <https://www.who.int/>
35. Науково-теоретичний журнал «Вісник аграрної науки». URL: <https://agrovisnyk.com/>
36. Науковий журнал «Екологічні науки». URL: <http://www.ecis.nau.edu.ua/>
37. Науковий журнал «Український гідрометеорологічний журнал». URL: <https://uhmj.org/>
38. Науковий журнал «Atmosphere» (MDPI). URL: <https://www.mdpi.com/journal/atmosphere>
39. Міжнародна наукова платформа ScienceDirect (Elsevier). URL: <https://www.sciencedirect.com/>
40. Науковий журнал «Remote Sensing» (MDPI). URL: <https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>
41. Науковий журнал «Український географічний журнал». URL: <https://ukrgeojournal.org.ua/>
42. Міжнародна наукова платформа SpringerLink. URL: <https://link.springer.com/>
43. Наукове видавництво Copernicus Publications (Atmospheric Measurement Techniques). URL: <https://publications.copernicus.org/>
44. Офіційний вебресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України для фіксації екологічних злочинів «ЕкоЗагроза». URL: <https://ecozagroza.gov.ua/>
45. Центр екологічних ініціатив «Екодія». URL: <https://ecoaction.org.ua/>
46. Науковий журнал «Український географічний журнал». URL: <https://ukrgeojournal.org.ua/>

47. Офіційний вебпортал Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/>
48. Програма розвитку ООН (UNDP) в Україні. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine>
49. Програма ООН з довкілля (UNEP). URL: <https://www.unep.org/>
50. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16 жовт. 1992 р. № 2707-XII // Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>
51. Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants (NEC Directive) // Official Journal of the European Union. – URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG
52. Закон України «Про Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів» від 20 верес. 2022 р. № 2614-IX // Законодавство України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2614-20>
53. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Technical guidance to prepare national emission inventories / European Environment Agency (EEA). URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023>
54. Atmospheric Environment : International Journal. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/atmospheric-environment>
55. Environmental Science & Policy : International Journal. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/environmental-science-and-policy>
56. Air Quality, Atmosphere & Health : International Journal. URL: <https://link.springer.com/journal/11869>
57. Науковий журнал «Космічна наука і технологія». – URL: <https://space-scitechjournal.org.ua/>
58. Мітюшкіна, К.С., Петрик, І.В., та Сердюк, С.А. Забруднення повітря території в Україні та його зв'язок з регіональним економічним розвитком. *Науковий вісник Львівського національного університету*

ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія Економічні науки. 2025. №, 27 (106). С. 63-69. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-e10611>

59. Мітюшкіна Х., Пастернак О., Іванова В. та Петрик І. (2024). Екологічна безпека в умовах сталого розвитку: кол. монографія. Київ. МДУ, 206. URL: <http://repository.mu.edu.ua/jspui/handle/123456789/8940> .
60. Мітюшкіна, Х., Пастернак, О., Іванова, В., та Петрик, І. (2024). Екологічна безпека в системі національної безпеки: Україна [3.1]. Трансформації, виклики та безпека: колективна монографія / ред. Ж. Сіманавічене; Університет Миколаса Ромеріса. Вільнюс, 184–210. URL: <https://cris.mruni.eu/server/api/core/bitstreams/be28eb0f-7311-436a-a996-577e50aef553/content> .