

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ АГРОТЕХНОЛОГІЙ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ ТА ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ**

Допускається до захисту
«_____» _____ 2025 р.

Зав. кафедри _____
(підпис)

к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ
наук. ступ., вч. зв.(ім'я та прізвище)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Магістр

(рівень вищої освіти)

**на тему: «Екологічна оцінка впливу пилових викидів на навколишнє
середовище в зонах хімічних і переробних виробництв та розробка
рекомендацій для зниження техногенного навантаження»**

Виконав: студент групи Еко-62

спеціальності 101 «Екологія»

ДЯЧЕНКО Павло Валерійович

Львів 2025

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет природокористування
Факультет агротехнологій та екології
Кафедра екології
Рівень вищої освіти «Магістр»
Галузь знань 10 «Природничі науки»
Спеціальність 101 «Екологія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри _____
к.б.н., доцент Петро ХІРІВСЬКИЙ
«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Дяченку Павлу Валерійовичу

1. Тема роботи: «Екологічна оцінка впливу пилових викидів на навколишнє середовище в зонах хімічних і переробних виробництв та розробка рекомендацій для зниження техногенного навантаження»

Затверджена наказом по університету № 906/к-с від 31 грудня 2024 р.

2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи 05 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані для кваліфікаційної роботи: літературні джерела, нормативні документи, методики виконання досліджень, законодавча база України.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які необхідно розробити)

Вступ

1 Огляд літератури

- 1.1 Типологія пилових аерозолів і механізми їх формування в технологічних процесах хімічної та переробної промисловості
- 1.2 Комплексна оцінка токсичності пилових викидів та пов'язаних газових домішок у зонах впливу промислових підприємств
- 1.3 Міжнародні та національні підходи до нормування пилу в атмосферному повітрі
- 1.4 Нормативно-правові вимоги до ПрАТ «Азот» та ТОВ «Карпатнафтохім» як великих пилогенеруючих джерел

2 Об'єкт, умови та методика досліджень

- 2.1 Природно-кліматичні та урбаністичні умови об'єктів дослідження
- 2.2 Джерела формування пилових викидів на підприємствах хімічної і нафтохімічної промисловості
- 2.3 Методичні підходи до екологічної оцінки впливу пилових викидів

3 Результати дослідження

- 3.1 Екологічна оцінка техногенного навантаження хімічного кластера на якість атмосферного повітря м. Черкаси
- 3.2 Екологічна оцінка сумарного впливу промислових і вторинних джерел пилу в Калуському промвузлі та роль ТОВ «Карпатнафтохім» у формуванні аерогенного ризику

3.3 Оцінка просторово-часових особливостей забруднення повітря за даними державного моніторингу та відкритих платформ

3.4 Оцінка канцерогенних та неканцерогенних ризиків від впливу важких металів у складі аерозолів

3.5 Екологічні ризики, пов'язані з трансформацією аерозольних частинок у хімічних промвузлах

3.6 Розробка комплексу природоохоронних заходів для зниження техногенного навантаження

4 Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

4.1 Аналіз стану промислової безпеки та гігієни праці на підприємствах хімічного комплексу

4.2 Комплексні заходи з мінімізації впливу пилового фактора та забезпечення пожежної безпеки

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Висновки

Бібліографічний список

5. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Бальковський В.В., доцент кафедри екології			
4	Гордійчук Л.М., доцент кафедри інженерної механіки			

7. Дата видачі завдання 22 вересня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту	При-мітка
1	Написання вступу та розділу «Огляд літератури»	22.09.24 р.– 31.12.24 р.	
2	Написання розділу «Об'єкт, умови та методика дослідження»	01.01.25 р.– 01.03.25 р.	
3	Написання розділу «Результати досліджень»	02.03.25 р.– 30.09.25 р.	
4	Написання розділу «Охорона праці та захист населення в умовах надзвичайних ситуацій», формулювання висновків, оформлення списку використаних літературних джерел	01.10.25 р.– 30.11.25 р.	

Студент _____ Павло ДЯЧЕНКО
(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Володимир БАЛЬКОВСЬКИЙ
(підпис)

УДК 504.3.054:621.928:66:504.062

Екологічна оцінка впливу пилових викидів на навколишнє середовище в зонах хімічних і переробних виробництв та розробка рекомендацій для зниження техногенного навантаження. Дяченко Павло Валерійович. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології та захисту довкілля. Львів, ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького, 2025. 81 с.

81 ст. текст. част., 16 табл., 13 рис., 47 джерел

У роботі проаналізовано та комплексно оцінено вплив пилових викидів хімічних і переробних виробництв на стан атмосферного повітря, екосистем та здоров'я населення в умовах урбанізованих промислових агломерацій України. Актуальність дослідження зумовлена зростанням техногенного навантаження на урбанізовані території та високою небезпекою дрібнодисперсних частинок PM_{10} і $PM_{2.5}$ відповідно до настанов ВООЗ. Досліджено фізико-хімічні властивості промислових аерозолів, механізми формування первинного й вторинного пилу, а також органічних полімерних аерозолів. Встановлено, що у зонах впливу хімічних підприємств пил виступає не лише механічним забруднювачем, а й ефективним носієм токсичних домішок – важких металів, летких органічних сполук та поліциклічних ароматичних вуглеводнів.

На прикладі ПрАТ «Азот» (м. Черкаси) та ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш) з'ясовано специфіку формування аерозольного забруднення, обумовлену технологічними процесами та природно-кліматичними умовами. Для Черкас виявлено домінування вторинних аерозолів нітрату амонію, формування яких посилюється підвищеною вологістю повітря в зоні впливу Кременчуцького водосховища. За даними регіонального та дистанційного моніторингу, у зимовий період 2024 року середні концентрації $PM_{2.5}$ досягали 45–60 мкг/м³, що у 3–4 рази перевищує рекомендації ВООЗ.

Для Калуша встановлено переважання первинних органічних та вуглецевих аерозолів, зокрема полімерного ПВХ-пилу та сажі. Орографічна замкненість Передкарпатської улоговини сприяє частим температурним інверсіям і накопиченню забруднювачів; у періоди штилю концентрації PM_{10} сягали 70–90 мкг/м³, що свідчить про підвищений ризик для населення навіть за помірних валових обсягів викидів.

Обґрунтовано комплекс практичних рекомендацій щодо зниження техногенного навантаження, зокрема впровадження найкращих доступних технологій очищення газопилових потоків, герметизації вузлів пересипки, модернізації факельних систем, створення фітобар'єрів та розвитку автоматизованого моніторингу аерозольних прекурсорів.

Проаналізовано питання охорони праці та захист населення.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1 Типологія пилових аерозолів і механізми їх формування в технологічних процесах хімічної та переробної промисловості	8
1.2 Комплексна оцінка токсичності пилових викидів та пов'язаних газових домішок у зонах впливу промислових підприємств	12
1.3 Міжнародні та національні підходи до нормування пилу в атмосферному повітрі (ВООЗ, ЄС, Україна)	14
1.4 Нормативно-правові вимоги до ПрАТ «Азот» та ТОВ «Карпатнафтохім» як великих пилогенеруючих джерел .	17
2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
2.1 Природно-кліматичні та урбаністичні умови об'єктів дослідження	19
2.1.1 Вплив акваторії та рівнинного ландшафту на трансфер аерозолів у місті Черкаси	20
2.1.2 Роль Передкарпатської улоговини у формуванні несприятливих мікрокліматичних умов міста Калуш	23
2.2 Джерела формування пилових викидів на підприємствах хімічної і нафтохімічної промисловості	26
2.2.1 ПрАТ «Азот» як джерело аерозольного забруднення	26
2.2.2 ТОВ «Карпатнафтохім» як джерело емісії специфічних аерозолів	31
2.3 Методичні підходи до екологічної оцінки впливу пилових викидів	35
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
3.1 Екологічна оцінка техногенного навантаження хімічного кластера на якість атмосферного повітря м. Черкаси	40
3.2 Екологічна оцінка сумарного впливу промислових і вторинних джерел пилу в Калуському промвузлі та роль ТОВ «Карпатнафтохім» у формуванні аерогенного ризику	50

3.3	Оцінка просторово-часових особливостей забруднення повітря за даними державного моніторингу та відкритих платформ	58
3.4	Оцінка канцерогенних та неканцерогенних ризиків від впливу важких металів у складі аерозолів	61
3.5	Екологічні ризики, пов'язані з трансформацією аерозольних частинок у хімічних промвузлах	64
3.6	Розробка комплексу природоохоронних заходів для зниження техногенного навантаження	67
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	70
4.1	Аналіз стану промислової безпеки та гігієни праці на підприємствах хімічного комплексу	70
4.2	Комплексні заходи з мінімізації впливу пилового фактора та забезпечення пожежної безпеки	72
4.3	Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій	74
	ВИСНОВКИ.....	76
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	78

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднення атмосферного повітря сьогодні вважається одним із найсерйозніших екологічних ризиків для здоров'я населення. За оцінками міжнародних організацій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я та Програми ООН з довкілля, погіршення якості повітря щороку спричиняє мільйони випадків передчасної смертності, а також значні втрати років здорового життя. Особливо небезпечними є дрібнодисперсні тверді частинки розміром до 2,5 мкм, які належать до найпоширеніших антропогенних повітряних поллютантів і характеризуються високою токсичністю. Їхня шкідливість зумовлена здатністю проникати глибоко в дихальні шляхи, долати альвеолярний бар'єр та потрапляти у системний кровотік, провокуючи кардіореспіраторні, онкологічні та метаболічні захворювання [37, 46].

Проблематика пилового забруднення, зокрема частинками $PM_{2.5}$ є найбільш актуальною для великих міст та урбанізованих промислових агломерацій. Саме в таких регіонах поєднується вплив різних джерел викидів – промислових підприємств, енергетичних об'єктів, транспортних потоків, котелень, а також побутового сектору. Комплексний вплив цих джерел формує довготривалу загрозу для здоров'я населення, посилює кліматичні ризики та погіршує екологічну стійкість урбанізованих екосистем.

Тверді частинки фракцій PM_{10} , $PM_{2.5}$ є ключовим компонентом антропогенного забруднення атмосферного повітря, що має прямі і опосередковані наслідки для здоров'я людей, стану екосистем (грунти, поверхневі води, рослинність) та довкілля загалом.

Особливу групу становлять пилові викиди хімічних та переробних виробництв. У цих зонах тверді частинки, окрім типових мінеральних фракцій, можуть містити важкі метали, леткі органічні сполуки, поліароматичні вуглеводні, залишкові мономері та інші токсиканти. Наявність таких інгредієнтів значно підвищує екотоксичність пилу та поглиблює ризики для здоров'я населення, особливо в санітарно-захисних

зонах промислових підприємств. Крім того, деякі види пилу (наприклад, полімернийпил ПВХ або мікрогранулят) класифікуються як мікропластик – глобальний пріоритет для сучасних екологічних політик, що перебуває у фокусі Глобальної угоди ООН щодо пластмас

Таким чином, контроль, моніторинг і зменшення пилового навантаження є ключовими чинниками екологічної безпеки сучасних урбанізованих територій. Їхнє значення особливо зростає у зонах з високою концентрацією промислових підприємств хімічного профілю, де пилові викиди є не лише кількісно значними, а й якісно небезпечними у зв'язку з їх специфічним хімічним складом.

Метою даної роботи було дослідити, проаналізувати та оцінити вплив пилових викидів хімічних і переробних виробництв на довкілля, а також запропонувати заходи щодо їх мінімізації.

Для досягнення поставленої мети було виконано ряд **завдань**:

- проаналізувати фізико-хімічні характеристики промислових пилових викидів та їхню токсикологічну небезпеку;
- проаналізувати сучасні міжнародні та національні регуляторні вимоги щодо якості атмосферного повітря та контролю промислових викидів;
- охарактеризувати особливості функціонування хімічних і переробних виробництв (на прикладі ПрАТ «Азот», ТОВ «Карпатнафтохім») як джерел пилових викидів та проаналізувати їх внесок у загальну структуру забруднення атмосферного повітря;
- оцінити просторово-часові закономірності формування концентрацій пилу (PM_{10} , $PM_{2.5}$) та супутніх домішок у зонах впливу обраних підприємств на основі даних моніторингу та результатів дистанційних (NASA, Copernicus);
- розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо зниження техногенного пилового навантаження в зонах хімічних і переробних виробництв з урахуванням принципів найкращих доступних технологій та підходів циркулярної економіки.

Об'єкт дослідження: техногенне навантаження на навколишнє середовище в зоні впливу хімічних та переробних виробництв.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Типологія пилових аерозолів і механізми їх формування в технологічних процесах хімічної та переробної промисловості

До категорії пріоритетних антропогенних поллютантів, що становлять суттєву загрозу для здоров'я населення, належать дрібнодисперсні частки з аеродинамічним діаметром менше 10 та 2,5 мікрона (PM_{10} та $PM_{2.5}$) [27, 28, 32, 38, 46]. У науковій літературі під терміном *particulate matter* (PM) розуміють складну суміш мікроскопічних твердих частинок та рідких крапель, які перебувають у зваженому стані в атмосферному повітрі, формуючи стійкі аерозольні системи.

У сучасній екології та гігієні довкілля пилові викиди розглядаються як одна з ключових форм аерозольного забруднення атмосферного повітря урбанізованих і промислових територій. Термін *тверді частинки* (particulate matter, PM) охоплює широкий спектр твердих і рідких частинок у повітрі, що відрізняються розмірами, хімічним складом, походженням і токсичністю. З позицій екологічного нормування та ризик-орієнтованої гігієнічної оцінки найбільш важливими є такі класи розміру:

- TSP (total suspended particles) – загальні зважені частинки; як правило, це фракція із аеродинамічним діаметром <100 мкм, що характеризує сумарну запиленість повітря;

- PM_{10} – інгаляційна фракція твердих частинок з аеродинамічним діаметром <10 мкм, які проникають у нижні відділи дихальних шляхів;

- $PM_{2.5}$ – дрібнодисперсні частинки з діаметром $<2,5$ мкм, які досягають альвеол, частково потрапляють у системний кровотік і мають найвищу медико-біологічну значущість;

- $PM_{0.1}$ – ультрадисперсні (наночастинки) тверді частинки, які здатні проникати через альвеолярно-капілярний бар'єр у кров [46].

Ключовим критерієм для оцінки розмірних характеристик зважених речовин виступає аеродинамічний діаметр. Цей параметр визначається як діаметр ідеальної сферичної частинки зі щільністю 1 г/см^3 , яка в ідентичних умовах демонструє таку ж швидкість гравітаційного осадження (або руху в газовому потоці), як і досліджувана реальна частка [27, 46].

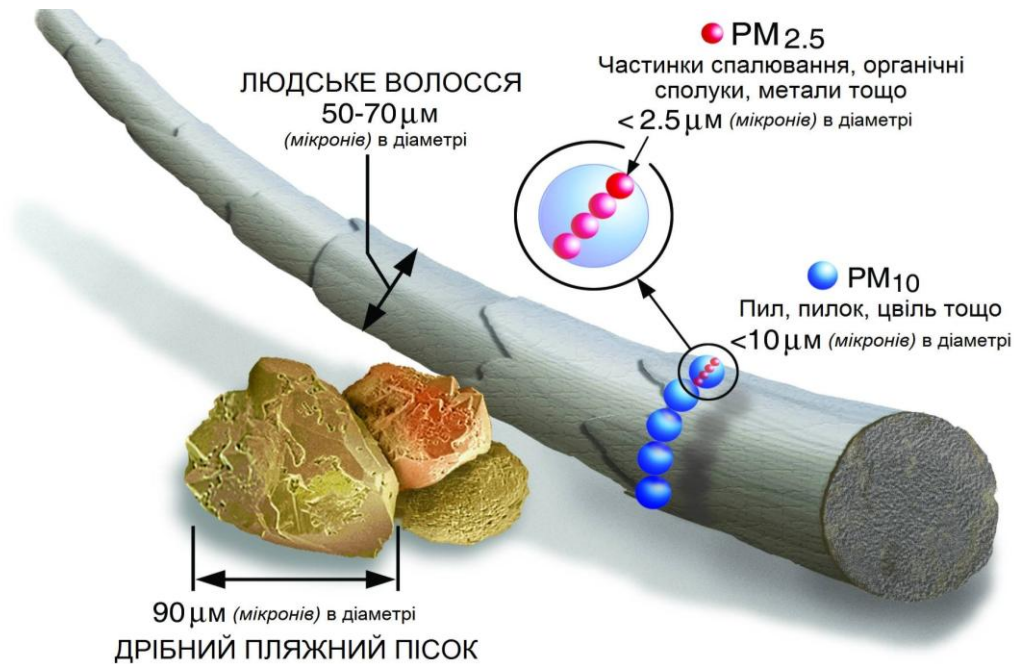


Рисунок 1.1 – Порівняльні розміри пилових частинок PM_{2.5} і PM₁₀, характерних для хімічних та переробних виробництв

Рис. 1.2 візуалізує узагальнену схему класифікації пилових частинок, що базується на комплексі їхніх основних властивостей.



Рисунок 1.2 – Класифікація пилу [28]

За генезисом виділяють:

- первинні частинки – утворюються безпосередньо в джерелі викиду (процеси спалювання палива, механічне подрібнення, транспортування й перевантаження сировини, дроблення, сушіння, упаковка порошкоподібних продуктів);
- вторинні аерозолі – утворюються вже в атмосфері в результаті газ–аерозольних перетворень оксидів сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), аміаку (NH_3), летких органічних сполук з формуванням сульфатів, нітратів, амонійних солей, органічних аерозолів.

Для хімічної та переробної промисловості характерні як “класичні” пилові викиди мінеральної природи, так і складні аерозолі хімічного походження:

- у виробництві азотних і комплексних мінеральних добрив пил утворюється під час дроблення, грануляції, сушіння та фасування продукції (аміачна селітра, карбамід, NPK-добрива). Частинки часто містять сульфати, нітрати, фосфати, амонійні солі, домішки важких металів, технологічні добавки;
- у петрохімії та нафтохімії джерелами пилу є операції з каталізаторами (флюїд-каталітичний крекінг), коксування, спалювання відходів, транспортування насипної сировини (сірка, кокс, полімерні грануляти);
- у виробництві полімерів, пластмас, гумотехнічних виробів – пил полімерних гранул, мікропластик, наповнювачі (сажа, силіка, крейда);
- у харчовій та переробній промисловості – органічний пил (борошно, цукор, крохмаль, комбікорми), який може поєднуватися з неорганічними частинками з систем опалення й сушіння;
- допоміжні процеси (склади сипучої сировини, відкриті відвали, транспортні галереї, автодороги на території підприємств) формують додаткове джерело ресуспензії пилу TSP і PM_{10} .

Важливою фізико-хімічною характеристикою аерозолів є їх адгезійна здатність, яка визначає інтенсивність процесів агрегації [28]. Процес

злипання реалізується через механізми аутогезії (взаємодія частинок усередині пилової хмари) та адгезії (налипання частинок на тверді поверхні обладнання) [27]. В якості основного індикатора злипання у розрахунках використовують величину розривної міцності шару пилу (P , Па). Відповідно до значень цього показника, промисловий пил поділяють на чотири категорії за ступенем злипання, які наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Здатність дисперсних частинок до злипання

Група злипання	Міцність шару пилу на розрив P , Па	Деякі види пилу даної групи
I	Не злипається, $P < 60$	Доломітовий, сухий шлаковий, кварцевий пил; сухий глиняний пил
II	Слабо злипається, $P = 60-300$	Коксовий та магнезитовий сухий пил; апатитовий сухий, доменний пил; колашнікова летюча зола, яка містить багато неспалених продуктів; сланцева зола
III	Середньо злипається, $P = 300-600$	Торф'яний, вологий магнезитовий пил; металевий, що містить колчедан, оксиди свинцю, цинку та олова; сухий цемент; летюча зола без недоспалювання; торф'яна зола; сажа, сухе молоко; борошно, тирса
IV	Сильно злипається, $P > 600$	Цементний пил; пил виділений з вологого повітря; гіпсовий і алебастровий пил; пил, що містить нітрофоск, подвійний суперфосфат, клінкер, солі натрію; волокнистий пил (азбест, бавовна, шерсть); всі пилу з частинками розміром не більше 10 мкм

IPCC у Шостій оцінювальній доповіді (AR6, Група I, глава 6) відносить аерозолі (сульфатні, нітратні, амонійні, вуглецеві, мінеральний пил тощо) до короткоживучих кліматичних чинників (short-lived climate forcings), які одночасно є повітряними забруднювачами й впливають як на кліматичну систему, так і на здоров'я населення [29].

Підходи ВООЗ, IPCC, UNEP демонструють, що розмір і хімічний склад частинок значно важливіші, ніж загальна маса пилу. Саме тому сучасне нормування й моніторинг у ЄС і за рекомендаціями ВООЗ ґрунтуються на індикаторах $PM_{2.5}$ та PM_{10} , тоді як традиційний показник «завислі речовини» використовується дедалі рідше як самостійний критерій якості повітря.

1.2 Комплексна оцінка токсичності пилових викидів та пов'язаних газових домішок у зонах впливу промислових підприємств

З точки зору токсикології й гігієни дрібнодисперсний пил хімічного походження являє собою комплексний сумішевий фактор, де небезпеку формують як сама тверда фаза (розмір, форма, розчинність), так і адсорбовані або хімічно пов'язані домішки – газоподібні забруднювачі (NO_2 , SO_2), метали, органічні сполуки.

За даними ВООЗ, забруднення повітря (як амбієнтне, так і в приміщеннях) є найбільшим окремим екологічним ризиком для здоров'я, спричиняючи близько 7 млн передчасних смертей щороку; 99 % населення світу дихає повітрям, яке перевищує рекомендовані рівні якості [31, 46]. UNEP підтверджує подібні оцінки: у блоці Pollution and Health наголошується, що понад 6,7 млн смертей щороку пов'язані саме з забрудненням повітря, а загальний “тягар” забруднення довкілля сягає близько 9 млн смертей на рік [37].

У зонах хімічних і переробних виробництв пилові частинки часто:

- збагачені сульфатами й нітратами (результат конверсії SO_2 та NO_x , які є типовими викидами енергетичних і хімічних установок);
- містять амонійні солі (NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), характерні для регіонів з інтенсивним використанням аміаку й азотних добрив;
- містять важкі метали (Pb, Cd, Ni, Cr, Zn, Cu) – як домішки сировини, каталізаторів, корозійних продуктів обладнання;
- адсорбують леткі органічні сполуки, поверхнево-активні речовини та інші органічні токсиканти, що надходять від спалювання палива, факельного спалювання, витоків технологічних газів.

ВООЗ у глобальних настановах [46] наводить конкретні рекомендовані рівні для $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} , виходячи із дозо-ефектних залежностей захворюваності й смертності: $\text{PM}_{2.5}$: 5 мкг/м^3 (річне середнє) і 15 мкг/м^3 (24-годинне середнє); PM_{10} : 15 мкг/м^3 (річне) і 45 мкг/м^3 (24-годинне) [19].

Таблиця 1.2 – Гранично допустимі концентрації TSP, PM₁₀, PM_{2.5} в атмосферному повітрі в Україні, США, ЄС і за рекомендаціями ВООЗ

Речовина	Час усереднення	Україна, мг/м ³	ВООЗ, мг/м ³	США, мг/м ³	ЄС, мг/м ³
Завислі речовини (TSP)	20 хв.	0,50	–	–	–
	24 год.	0,15	–	0,26	–
	1 рік	–	–	0,075	–
Завислі речовини PM ₁₀	20 хв.	–	–	–	–
	24 год.	–	0,050	0,150 (концентрація не повинна бути перевищена більше 1 разу за 3 роки)	0,050 (концентрація не повинна бути перевищена більш 35 разів протягом року)
	1 рік	–	0,020	–	0,040
Завислі речовини PM _{2.5}	20 хв.	–	–	–	–
	24 год.	–	0,025	0,035 (98% за 3 роки)	–
	1 рік	–	0,010	0,015 (середня за 3 роки)	0,025

Втім, навіть рівні, нижчі за ці пороги, не гарантують повної відсутності ризику. ВООЗ та провідні епідеміологічні дослідження підкреслюють лінійний або квазі-лінійний характер залежності “доза–відповідь” без чіткого порогу безпечної дії – тобто будь-яке додаткове зниження концентрацій PM_{2.5} призводить до зменшення ризику [19, 27, 37].

До пилоподібних викидів хімічних і переробних виробництв завжди додається фонові присутність NO₂ та SO₂. Вони:

- є газоподібними токсикантами, що спричиняють подразнення дихальних шляхів, бронхоконстрикцію, посилення проявів астми;
- виступають прекурсорами вторинних частинок (сульфати, нітрати) і тропосферного озону;
- класифікуються ВООЗ та ІРСС як короткоживучі кліматичні чинники

– тобто їх скорочення приносить ко-бенефіти для здоров'я та клімату [19].

Отже, токсиколого-гігієнічна характеристика пилових викидів у зонах хімічних і переробних виробництв вимагає комплексного підходу, який враховує:

- розмірний склад (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, за потреби – PM₁);
- хімічний профіль (іони, метали, органічні компоненти);
- супутні газоподібні домішки (NO₂, SO₂, ЛОС, NH₃);
- кумулятивну дію на здоров'я населення та екосистеми.

Важливо розуміти, що в атмосферному повітрі важкі метали переважно знаходяться саме у формі твердих часток (PM_{2.5} або PM₁₀). Це означає, що пил виступає не лише як механічний подразник, а і як носій токсичних агентів. Біоаккумуляція важких металів (As, Cd, Pb, Hg) в організмі людини може призводити до порушення клітинного гомеостазу, окислювального стресу та нейротоксичності [28, 41]. Тому оцінка впливу пилових викидів хімічних виробництв має включати аналіз хімічного складу аерозолів, оскільки викиди промисловості та автотранспорту можуть взаємодіяти, збільшуючи загальне навантаження металами.

1.3 Міжнародні та національні підходи до нормування пилу в атмосферному повітрі (ВООЗ, ЄС, Україна)

Всесвітня організація охорони здоров'я задає глобальний “золотий стандарт” для оцінки ризиків, пов'язаних із пиловими викидами. Оновлені Глобальні настанови ВООЗ щодо якості повітря 2021 р. для PM_{2.5} та PM₁₀ є орієнтовними рівнями, а не юридично обов'язковими нормами, однак саме вони слугують науковою базою для формування регіональних та національних систем нормування [46].

Європейський Союз до 2024 р. регулював якість атмосферного повітря на основі Директиви 2008/50/ЄС та 2004/107/ЄС. У жовтні 2024 р. прийнято Директиву (ЄС) 2024/2881 “Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи”, яка істотно посилює вимоги до вмісту PM_{2.5} і PM₁₀ [46].

Основні параметри для 2030 року:

- $PM_{2.5}$: річне граничне значення – 10 $мкг/м^3$ (замість 25 $мкг/м^3$ у попередній редакції), добове – 25 $мкг/м^3$ з обмеженням кількості перевищень;
- PM_{10} : річне – 20 $мкг/м^3$ (замість 40 $мкг/м^3$), добове – 45 $мкг/м^3$ [19].

Директива 2024/2881 зобов’язує держави-члени:

- розробляти плани покращення якості повітря в зонах, де граничні значення перевищуються;
- активніше використовувати моделювання та супутникові дані (зокрема продукти Copernicus/CAMS);
- забезпечувати доступ громадськості до інформації та ефективні механізми оскарження бездіяльності уповноважених органів.

Паралельно в ЄС діє Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди, яка встановлює інтегровані вимоги до великих промислових установок, у тому числі хімічних і переробних, щодо застосування найкращих доступних технологій і дотримання граничних значень викидів пилу (mg/nm^3) у відхідних газах [2].

Європейська агенція з довкілля регулярно публікує звіти про стан повітря. За оцінками агенції та компанії IQAir, у 2024 р. лише сім країн світу відповідали рекомендаціям ВООЗ щодо середньорічних концентрацій $PM_{2.5}$, тоді як більшість країн, включно з частиною держав-членів ЄС, мали середньорічні рівні вище за 5 $мкг/м^3$ [25, 26, 33, 46].

Україна перебуває у процесі поетапного наближення до європейських підходів. Базовим нормативним актом є Закон України «Про охорону атмосферного повітря» № 2707-XII від 16.10.1992 р. (редакція станом на 08.08.2025 р.), який визначає правові й організаційні засади охорони повітря, запроваджує систему дозволів на викиди й базові принципи нормування [9].

Разом із тим, за даними технічного звіту JRC “Status of Environment and Climate in Ukraine” (2025), у національній системі досі відсутні повноцінні нормативи для $PM_{2.5}$ і PM_{10} як окремих індикаторів якості атмосферного повітря; натомість використовується показник “завислі речовини” та система

гранично допустимих концентрацій.

Стратегічним кроком стало ухвалення Закону України «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» № 3855-IX від 16.07.2024 р., який набув чинності 8 серпня 2025 р. Він імплементує принципи директиви про промислові викиди: запроваджує інтегровані екологічні дозволи, орієнтацію на інноваційні технології, єдиний державний реєстр, посилює вимоги до звітності й моніторингу викидів, у тому числі пилу [11, 13].

За результатами спільного аналізу, проведеного ЄС та OECD, попри прогрес у правовій сфері, реальна якість повітря в низці українських промислових міст (енергетика, металургія, хімічна та переробна промисловість) істотно відхиляється як від стандартів ЄС, так і від рекомендацій ВООЗ; система моніторингу залишається фрагментованою, із недостатньою просторовою репрезентативністю та технічно застарілою інфраструктурою [29, 33].

Важливим аспектом є вплив пилової депозиції на наземні екосистеми та агроландшафти. FAO наголошує, що пилові й піщані шторми, а також хронічна депозиція пилу здатні знижувати урожайність, погіршувати якість аграрної продукції та перешкоджати досягненню щонайменше 11 з 17 Цілей сталого розвитку. Дослідження показують, що рівень забруднення ґрунтів є динамічним, але важкі метали можуть зберігатися в ґрунтовому покриві протягом тривалого часу навіть після припинення або ліквідації джерела забруднення, що створює довгострокові ризики для продовольчої безпеки та екосистемних послуг.

Узагальнюючи, у сфері нормування пилу можна виокремити три рівні:

- глобальний рівень (ВООЗ, ООН, UNEP, IPCC) задає науково обґрунтовані цільові орієнтири та підкреслює відсутність безпечного порогу;
- Європейський рівень формує жорстку, юридично обов’язкову систему нормативів (PM_{2.5}, PM₁₀) і конкретні механізми їх досягнення (плани, моделювання, БАТ, інтегровані дозволи, відкриті дані);

– Україна перебуває в стадії переходу від традиційної моделі «TSP + ГДК» до європейської, потребуючи впровадження чітких стандартів для $PM_{2.5}/PM_{10}$ та інтегрованого контролю промислового забруднення.

Для успішної модернізації української промисловості необхідним є не лише формальне наближення нормативів до європейських, а й практичне впровадження найкращих доступних технологій як інструменту зниження пилових викидів, підвищення енерго- та ресурсоефективності й зміцнення конкурентоспроможності виробництв.

1.4 Нормативно-правові вимоги до ПрАТ «Азот» та ТОВ «Карпатнафтохім» як великих пилогенеруючих джерел

Діяльність обох підприємств – ПрАТ «Азот» (м. Черкаси) [40] та ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш) [36] – як значних джерел пилових та газоподібних викидів регулюється комплексом національних і міжнародних нормативних документів, що визначають вимоги до контролю, звітності та мінімізації впливу на довкілля.

На загальнодержавному рівні правове поле формують такі ключові документи:

– Закон України «Про охорону атмосферного повітря» № 2707-ХІІ, який визначає вимоги до нормування викидів стаціонарних джерел, розроблення гранично допустимих викидів, проведення інвентаризації та здійснення виробничого моніторингу. Для підприємств масштабу ПрАТ «Азот» та ТОВ «Карпатнафтохім» ці положення є базовими, оскільки охоплюють всі пилогенеруючі установки та допоміжні об'єкти.

– Національний реєстр викидів та перенесення забруднювачів, запроваджений Законом України № 2614-ІХ та оновлений положеннями Закону № 3855-ІХ (2024 р.). Для великих хімічних підприємств звітність у реєстрі є обов'язковою, що передбачає відкритість інформації про обсяги викидів твердих частинок, летких органічних сполук, парникових газів та інших

забруднювачів.

– Форма державної статистичної звітності № 2-ТП (повітря) (оновлена у 2024 р.), яка забезпечує уніфікований облік викидів пилю за видами речовин, джерелами та технологічними процесами. Обидва підприємства належать до категорії великих забруднювачів, тому звітування за цією формою є щорічним обов'язком.

ТОВ «Карпатнафтохім» належить до інтегрованої нафтохімічної промисловості та за технологічним профілем підпадає під ті види діяльності, які у країнах ЄС регулюються Директивою 2010/75/ЄС, зокрема виробництво органічних хімічних речовин, виробництво полімерів, виробництво хлору та луку, робота великих спалювальних установок.

В українському правовому полі це означає, що підприємство зобов'язане:

- отримувати дозволи на викиди забруднюючих речовин для кожного стаціонарного джерела відповідно до Закону «Про охорону атмосферного повітря»;
- подавати статистичні звіти за формою № 2-ТП (повітря);
- звітувати до Національного реєстру викидів та перенесення забруднювачів, забезпечуючи доступність екологічної інформації;
- у перспективі – отримати інтегрований дозвіл, відповідно до нового українського законодавства з інтегрованого запобігання та контролю промислового забруднення, яке поступово імплементує вимоги IED та заходи на основі BAT.

Міжнародні організації – ВООЗ, UNECE, Європейське агентство з довкілля – наголошують на необхідності зниження концентрацій $PM_{2.5}$ і PM_{10} до рівнів, рекомендованих Глобальними настановами ВООЗ 2021 р., має стати стратегічною метою національних політик у сфері якості повітря, що актуалізує модернізацію пилогенеруючих виробництв у Черкасах та Калуші.

2 ОБ'ЄКТ, УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Природно-кліматичні та урбаністичні умови об'єктів дослідження

Ефективність розсіювання викидів промислових підприємств критично залежить від фізико-географічних параметрів локації та архітектурно-планувальної структури урбосистеми. Саме тому, комплексна оцінка впливу пилових викидів хімічних і переробних виробництв неможлива без детального аналізу природно-кліматичних та просторово-урбаністичних характеристик територій, на яких ці підприємства розміщені. Географічне положення, рельєф, фонові кліматичні умови, структура забудови та транспортної мережі визначають умови розсіювання й акумуляції твердих частинок (PM_{10} , $PM_{2.5}$), а також уразливість населення до забруднення повітря.

Черкаси та Калуш представляють два різні типи урбанізованих промислових центрів, а саме Черкаси – обласний центр у середній течії Дніпра з розвиненою хімічною промисловістю (ПрАТ «Азот»); та Калуш – промисловий осередок Прикарпаття з історично сформованим хімічним кластером (ТОВ «Карпатнафтохім» та інші підприємства калійної й нафтохімічної галузей).

Аналіз розповсюдження дрібнодисперсних часток (PM_{10} , $PM_{2.5}$) у промислових агломераціях неможливий без урахування синергетичного ефекту між кліматичними змінами та морфологією міської забудови. Згідно з останніми звітами IPCC (AR6, 2023), урбанізовані території є епіцентрами формування локальних мікрокліматичних аномалій, зокрема ефекту «міського теплового острова» (рис. 2.1) (Urban Heat Island – UHI).

Для досліджуваних об'єктів критичним є поняття аеродинамічної шорсткості поверхні. Щільна забудова міст Черкаси та Калуш змінює профіль вітру, створюючи зони турбулентності та застою повітря (так звані «вулицьканьйони»), де концентрація пилових часток може перевищувати фонові значення у 3–5 разів навіть на значній відстані від джерела емісії [29].



Рисунок 2.1 – Ефект «міського теплового острова» в промислових мікрорайонах [29]

Ступінь розсіювання викидів визначається стратифікацією атмосфери. В умовах глобального потепління, яке за даними служби моніторингу атмосфери Copernicus [30], в Україні проявляється зростанням кількості днів з антициклональною погодою, частішають випадки приземних інверсій. Це створює ефект «свинцевої ковдри», коли викиди від низьких джерел (транспорт, переробка) та високих труб (ТЕС, хімпром) не розсіюються у верхні шари атмосфери, а акумулюються у придихальному шарі.

2.1.1 Вплив акваторії та рівнинного ландшафту на трансфер аерозолів у місті Черкаси

Місто Черкаси розташоване у центральній частині України, на правому березі Кременчуцького водосховища річки Дніпро, що є визначальним фактором формування місцевого мезоклімату. Місто формує важливий промисловий, транспортний і адміністративний вузол регіону, поєднуючи функції обласного центру, річкового порту та осередку хімічної, машинобудівної й харчової промисловості.

За сучасними оцінками, чисельність населення Черкас (з урахуванням повоєнних демографічних змін) становить близько 270–300 тис. осіб, що відносить місто до групи середніх за українською класифікацією, але з високим рівнем індустріального навантаження на одиницю площі.

Клімат Черкас належить до помірно континентального з теплим літом і відносно холодною зимою. За даними кліматичних баз (Climate-Data, Timeanddate, Weather-Atlas), середньорічна температура повітря становить близько 9,8–11 °С, а річна сума опадів – 540–590 мм.

Сезонна структура клімату характеризується такими рисами:

- зими – малосніжні, зі середніми температурами близько $-1...-3$ °С у січні-лютому;
- літо – тепле, подекуди спекотне: середні температури липня-серпня досягають 21–22 °С, а денні максимуми нерідко перевищують 30 °С;
- опади мають максимум у теплий період (червень–липень), коли за місяць може випадати 60–75 мм, і мінімум – взимку.

Для екологічної оцінки пилових викидів важливими є: переважно слабкі вітри (до 5 м/с), зафіксовані Черкаським регіональним центром гідрометеорології, що сприяють накопиченню забруднювачів у приземному шарі в умовах антициклональної погоди та температурних інверсій; а також наявність водної поверхні Кременчуцького водосховища, яка впливає на локальний мікроклімат (підсилення туманів, зміна розподілу вітрів) та процеси розсіювання аерозолів.

Акваторія Кременчуцького водосховища діє як температурний буфер та генератор бризової циркуляції. У денні години літнього періоду виникає денний бриз (вітер з води на сушу). Оскільки ПрАТ «Черкаський «Азот» розташоване у південно-східній частині міста, а житлові масиви (Митниця, Центр) витягнуті вздовж узбережжя, бризова циркуляція може сприяти "притисканню" викидів до землі або їх переносу вглиб житлової забудови, залежно від напрямку градієнтного вітру. Крім того, підвищена вологість повітря поблизу водосховища сприяє процесам гігроскопічного росту аерозольних часток (особливо це стосується викидів аміачної селітри та карбаміду, які є гігроскопічними). Збільшення маси часток прискорює їх гравітаційне

осадження (суха депозиція) на прибережні території.

На фоні глобальних змін клімату дослідження ООН, IPCC та національних кліматичних офісів показують, що Україна нагрівається швидше за середньосвітові темпи: швидкість підвищення температури тут перевищує глобальну, що вже призводить до зростання частоти посух, хвиль спеки та екстремальних опадів. Для Черкаського регіону це означає потенційне збільшення тривалості періодів із підвищеною концентрацією РМ у приземному шарі повітря.

За даними регіональних доповідей про стан довкілля (2023–2024 рр.), для Черкас характерна висока повторюваність приземних інверсій температури, особливо у нічний та ранковий час. Взаємодія викидів ПрАТ «Азот» (аміак, діоксид азоту, завислі речовини) з вологим повітрям над водосховищем сприяє утворенню «вологих смогів» та вторинних аерозолів (нітрату амонію). У зимовий період 2024 року фіксувалися періоди застою повітря (штиль), коли концентрації дрібнодисперсного пилу (РМ_{2.5}) перевищували безпечні рівні за рекомендаціями ВООЗ у 3–4 рази [19, 46].

Містобудівна структура Черкас історично формувалась як лінійна вздовж Дніпра, з концентрацією промислових підприємств у північно-східній та східній частинах міста, поблизу берегової лінії. Житлова забудова представлена багатоповерховими мікрорайонами радянського періоду та приватним сектором, розміщеним переважно в центральній і правобережній частинах.

Такий просторовий розподіл створює контраст «промзона – житлова забудова», при якому:

- промислові об'єкти (зокрема хімічний комплекс ПрАТ «Азот») сконцентровані на відносно обмеженій території,
- житлові масиви розміщені в зоні потенційного впливу пилових та інших викидів за несприятливих метеоумов (інверсії, штиль),
- транспортні магістралі (у т. ч. під'їзні шляхи до підприємств) формують додаткові джерела пилу й NO₂.

Згідно із Законом України «Про охорону атмосферного повітря» (№ 2707-XII) та новим Законом «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» (№ 3855-IX), Черкаси як обласний центр входять

до пріоритетної зони екологічного моніторингу, де має здійснюватися контроль якості повітря, у тому числі за показниками пилу, відповідно до вимог національного законодавства та з урахуванням наближення до директив ЄС.

2.1.2 Роль Передкарпатської улоговини у формуванні несприятливих мікрокліматичних умов міста Калуш

Місто Калуш розташоване в Івано-Франківській області, у зоні передгір'їв Українських Карпат, на відстані близько 35 км від обласного центру – Івано-Франківська. На відміну від Черкас, Калуш розташований у Передкарпатті, в долині річки Лімниця. Рельєф місцевості характеризується як улоговинний (басейнового типу). Це створює передумови для виникнення мікрокліматичних умов, несприятливих для розсіювання викидів. Згідно з методиками ВМО, такі території класифікуються як зони підвищеного потенціалу забруднення атмосфери. Гори та пагорби, що оточують місто, знижують середню швидкість вітру, що призводить до застою повітряних мас [24].

Калуш сформувався як потужний промисловий вузол, у якому поєднуються калійна, хімічна та нафтохімічна промисловість. В інвестиційних і регіональних оглядах він характеризується як «промисловий хаб» Прикарпаття з високою концентрацією підприємств, у тому числі з іноземним капіталом.

Ключовим підприємством є ТОВ «Карпатнафтохім», яке є єдиним в Україні виробником етилену, пропілену, бензолу, каустичної соди мембранного типу, поліетилену та полівінілхлориду (ПВХ). Специфіка технологічних процесів (кріекстракція, піроліз вуглеводнів, полімеризація, робота з високореакційними реагентами) зумовлює утворення як газоподібних, так і пилоподібних викидів, зокрема дрібнодисперсних частинок, насичених органічними сполуками та продуктами термічних перетворень.

Населення Калуської територіальної громади оцінюється в межах 60–70 тис. осіб (станом до повномасштабного вторгнення та з урахуванням міграційних процесів). Для міста з відносно невеликою чисельністю населення така концентрація важкої промисловості означає високе техногенне навантаження на одиницю площі й особливу вразливість до пилових і хімічних викидів.

Калуш належить до зони помірно континентального вологого клімату з відчутним впливом орографії (передгір'я Карпат). Це проявляється в:

- більш прохолодному та вологому кліматі порівняно з Придніпров'ям і Центральною Україною;
- річних сумах опадів, що можуть перевищувати 700–800 мм, із максимумом у теплий період;
- підвищеній частоті туманів і мряки, особливо в перехідні сезони;
- локальних вітрових режимах, зумовлених рельєфом (долини, балки, тераси).

Для Калуша характерні часті приземні інверсії, особливо в осінньо-зимовий період. Холодне повітря стікає зі схилів у котловану міста, блокуючи вертикальне переміщення. У такі періоди викиди від ТОВ «Карпатнафтохім» та Калуської ТЕЦ, а також пил з хвостосховищ, утворюють стійкий смог.

Отже, орографічна замкненість котловини суттєво обмежує горизонтальне провітрювання. Панівні вітри (західні та північно-західні) часто «запирають» викиди ТОВ «Карпатнафтохім» та Калуської ТЕЦ у межах міста.

За даними національних та регіональних кліматичних оцінок, Карпатський регіон є чутливою зоною до змін клімату: спостерігається підвищення середньорічної температури, зміна структури опадів (інтенсифікація зливових дощів), збільшення ризику паводків та зсувів. Ці процеси безпосередньо впливають на атмосферну стратифікацію і можуть підсилювати чи, навпаки, послаблювати розсіювання пилу в різні пори року.

Специфікою регіону є висока ймовірність утворення туманів (до 60–80 днів на рік), які виступають акумуляторами твердих частинок. Окрім виробничих викидів, значним фактором є пиління хвостосховищ та засолених ґрунтів Домбровського кар'єру, що в умовах зміни клімату (збільшення кількості посушливих днів улітку) створює загрозу транскордонного перенесення сольового пилу.

З орографічної точки зору територія міста Калуша має комбінований характер і включає як рівнинні ділянки, так і підвищені елементи рельєфу, серед яких домінує гора Височанка. Гідрографічна мережа міста є досить розвиненою: її формують річки Лімниця, Сівка та Млинівка, що здійснюють суттєвий вплив на просторову структуру міського ландшафту. Північно-західні

околиці перетинає річка Кропивник, до якої впадають притоки Фрунелів і Кривець, утворюючи локальні зони з підвищеною зволоженістю та специфічними мікрокліматичними умовами.

Лісові насадження займають близько десятої частини території міста, виконуючи важливі екологічні функції: зменшення вітрової ерозії, стабілізація ґрунтів, фільтрація атмосферного повітря та підтримання біорізноманіття міських екосистем.

Окремою особливістю Калуша є поєднання індустріальних майданчиків із зонами давнього видобутку солей та калійної руди, що сформували депресійний та карстово-відпрацьований рельєф. Це зумовлює:

- існування локальних «замкнених» мікробасейнів, де повітряні маси в приземному шарі можуть застоюватися;
- підвищений ризик накопичення пилу та газоподібних домішок у безвітряні періоди;
- можливість вторинного підняття пилу (ресуспензії) з промислових майданчиків, відвалів, складів сировини (у т. ч. у процесі вивітрювання відходів калійного виробництва).

Місто характеризується компактним плануванням: житлова забудова – переважно багатоповерхові квартали та приватний сектор – розміщена в безпосередній близькості до промислових зон. Інвестиційні паспорти й аналітичні огляди наголошують, що Калуш, попри індустріальний характер, має необхідність модернізації транспортної інфраструктури та системи екологічної безпеки, особливо з огляду на високий рівень промислової концентрації.

У контексті законодавства України та євроінтеграційних процесів Калуш відноситься до територій, де, відповідно до Закону «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» та Стратегії державної екологічної політики, мають бути запроваджені інтегровані екологічні дозволи для ключових промислових підприємств, а також створені локальні програми моніторингу та зниження ризиків, пов'язаних із пиловими та хімічними викидами.

Таким чином, природно-кліматичні та урбаністичні умови розглянутих міст формують поєднання високого техногенного навантаження та різнотипної кліматичної вразливості, що обґрунтовує вибір Черкас, та Калуша як

репрезентативних об'єктів для оцінки впливу пилових викидів хімічних і переробних виробництв і подальшої розробки рекомендацій зі зниження техногенного навантаження.

2.2 Джерела формування пилових викидів на підприємствах хімічної і нафтохімічної промисловості

Аналіз технологічних регламентів та звітів з оцінки впливу на довкілля дозволяє ідентифікувати специфічні джерела утворення твердих часток на досліджуваних об'єктах. Відповідно до Директиви 2010/75/EU [2] про промислові викиди, ці підприємства належать до установок підвищеного рівня екологічного ризику, для яких встановлюються жорсткі вимоги та дотримання граничних значень викидів пилу у відхідних газах.

2.2.1 ПрАТ «Азот» як джерело аерозольного забруднення

Приватному акціонерному товариству «Азот» (м. Черкаси) належить провідна роль у хімічному холдингу OSTCHEM, що входить до Group DF [40]. Це підприємство є системоутворюючим елементом хімічної промисловості України та найбільшим у країні виробником мінеральних добрив, що спеціалізується на виробництві аміаку, карбаміду, аміачної селітри, карбамідно-аміачної суміші, а також капролактаму, іонообмінних смол, азотної кислоти та інших продуктів азотної хімії. Широкий спектр продукції зумовлює функціонування розгалуженої системи технологічних установок, які є потенційними джерелами пилових викидів – як організованих (через газоходи та димові труби), так і неорганізованих (від складів, перевантажувальних вузлів, відкритих майданчиків).

З погляду міжнародних екологічних зобов'язань, виробництво азотних добрив належить до високовуглецевих і високоризикованих секторів промисловості. У звітах IPCC (AR6) зазначено, що виробництво азотної кислоти є одним із провідних промислових джерел N_2O – потужного парникового газу з глобальним потеплювальним потенціалом у 273 рази більшим, ніж CO_2 . Аналогічні висновки наведені у звітності UNFCCC, де

сектора азотної промисловості позначені як пріоритетні для декарбонізації.

Таким чином, у зв'язку з впровадженням в Україні Закону «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення» № 3855-IX, який гармонізує національні вимоги з Директивою 2010/75/ЄС про промислові викиди, питання інвентаризації та характеристики пилогенеруючих джерел ПрАТ «Азот» набуває особливої актуальності. Відповідність принципам найкращих доступних технологій є ключовою умовою для мінімізації техногенного навантаження.



Рисунок 2.2 – ПрАТ «Азот» (м. Черкаси)

Виробничо-господарський комплекс характеризується розгалуженою інфраструктурою, що включає 43 структурні підрозділи, розміщені на промисловому майданчику загальною площею близько 500 га.

У 2025 році на ПрАТ «Азот» відновлена робота цехів аміаку **A-3** (проектною потужністю близько 900 т/добу); цеху зі виробництвом карбаміду **M-2** (потужністю орієнтовно 1100 т/добу), цеху **M-5** (виробництво неконцентрованої азотної кислоти), **M-6** (1000 т/добу) та цеху **M-9** (виробництво аміачної селітри) з метою розширення випуску карбамідно-аміачної суміші (КАС), що свідчить про нарощування обсягів виробництва та, відповідно, потенційне збільшення техногенного навантаження на атмосферне повітря.

Найпотужнішим джерелом емісії твердих частинок (*particulate matter*) на підприємстві є цехи виробництва мінеральних добрив. Процес грануляції

(прилювання) є критичною точкою утворення аерозолів.

Основні технологічні ланки, пов'язані з утворенням пилу:

1. Грануляція та сушіння твердих мінеральних добрив.

У цехах виробництва аміачної селітри (М-5, М-9) та карбаміду (М-2, М-6) використовують метод розбризкування плаву зустрічним потоком повітря. Цей процес супроводжується виносом:

- дрібнодисперсного пилу аміачної селітри та карбаміду,
- аерозоль плаву (т. зв. «туман» NH_4NO_3 або $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$),
- вторинного пилу від механічної обробки гранул.

Виробництво карбаміду, аміачної селітри та карбамідно-аміачної суміші супроводжується стадіями грануляції (у грануляційних вежах), сушіння, охолодження та класифікації гранул. На цих етапах формується значна кількість пилу карбаміду, аміачної селітри та пилу сумішей (дрібна фракція – «отсів»), яка виноситься повітряними потоками із сушарок, охолоджувачів.

У цьому процесі відбуваються два фізико-хімічні явища, що генерують пил, насамперед це утворення «туману»: коли частина плаву випаровується (сублімує) і миттєво конденсується у холодному повітрі, утворюючи дрібнодисперсний аерозоль (PM1.0–PM2.5). Це частинки розміром менше 1 мкм, які важко вловлюються стандартними фільтрами і створюють візуальний ефект «сизого диму» над вежами. По-друге, це механічне винесення пилу, а саме коли потік повітря захоплює дрібні частинки готового продукту та пил, що утворився при терті гранул.

Хімічний склад пилу робить його гігроскопічним, а отже здатним поглинати вологу, збільшувати розмір частинок та виступати ядрами конденсації. Саме ці частинки активно формують вторинні неорганічні аерозолі, що входять до фракції PM_{2.5} і беруть участь у формуванні смогу [44].

За даними Fertilizers Europe (2024), масова концентрація пилу на виході з грануляційних веж без газоочистки може становити 150–200 мг/м³. Це пояснює появу характерного «сизого диму» над промисловим майданчиком під час пікових навантажень [34].

2. Специфіка пилоутворення у виробництві капролактаму.

Синтез капролактаму на ПрАТ «Азот» здійснюється за класичною схемою окиснення циклогексану. Джерелами пилу є:

- сушильні установки для сульфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,
- вузли розсіву та пакування кристалічного продукту.

Кристалічний пил сульфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ є дратівливим агентом для дихальних шляхів. Проблема полягає в тому, що в умовах підвищеної вологості (близькість Кременчуцького водосховища) цей пил сприяє кислотоутворенню в атмосферному повітрі (вторинне забруднення).

Згідно зі звітами Європейського агентства з довкілля (EEA, 2023), виробництво капролактаму також супроводжується викидами сажі (при спалюванні кубових залишків у печах) та органічних аерозолів, що належать до групи PM2.5 [30, 31].

3. Виробництво іонообмінних смол – це унікальний для України сегмент виробництва. Технологія базується на кополімеризації стиролу з дивінілбензолом. Пилогенеруючі операції включають:

- сушіння гранул у сушарках «киплячого шару» призводить до стирання полімерних гранул і винесення полімерного пилу в систему аспірації;
- механічний розсів і пакування сухих полімерних частинок.

Екологічна небезпека зумовлена тим, що пил іонообмінних смол фактично є мікропластиком. Враховуючи глобальну стратегію UNEP щодо боротьби із забрудненням пластиком (Resolution 5/14, 2022), цей вид викидів потребує особливого моніторингу. Мікрочастинки смол не біодеградують і можуть накопичуватися у ґрунтах санітарно захисних зон та водних об'єктах при осадженні [38, 46]

4. Транспортування, зберігання та відвантаження добрив.

Стрічкові транспортери, норії, пневмотранспорт та бункерні системи створюють умови для:

- абразійного стирання гранул,
- вторинного пиління на етапах перевантаження,
- неорганізованих викидів у зонах відвантаження у залізничні вагони й автотранспорт.

Додатковим джерелом є викиди тепловозів, що транспортують продукцію: сажа локомотивів виступає носієм поліциклічних ароматичних вуглеводнів, які адсорбуються на пилових частинках.

5. Виробництво аміаку та азотної кислоти. Хоча основним екологічним фокусом на цих стадіях є викиди NO_x , N_2O , CO та CO_2 , додаткові пилові викиди утворюються:

- при роботі допоміжних котельних установок,
- факельних установках, а також
- під час спалювання відхідних газів.

Згідно з Директивою 2010/75/ЄС, такі установки класифікуються як великі спалювальні установки, для яких встановлюються жорсткі нормативи щодо концентрацій твердих частинок, NO_x та SO_2 .

6. Цех очищення промислових стічних вод розташований у с. Слобода забезпечує очищення міських і промислових стоків. Хоча основні викиди тут газоподібні (метан – 1091,8 т/рік), однак пилові викиди пов'язані з:

- ерозією сухих мулових карт,
- сушінням осаду (за наявності відповідної технології),
- біоаерозолями, що містять важкі метали та органічні домішки.

За офіційними даними, викиди суспендованих твердих часток становлять 0,381 т/рік [23].

7. Допоміжні технологічні процеси (водопідготовка, вапнування, склад хімреагентів) як джерело дрібнодисперсного пилу

Пил утворюється також під час:

- підготовки живильної води (вапно, сода, коагулянти),
- використання сорбентів та флокулянтів,
- розфасування хімічних реагентів.

Ці матеріали належать до класичних пилогенних агентів із високим рівнем дисперсності.

Проведений аналіз технологічних процесів дозволяє класифікувати ПрАТ «Азот» як потужне джерело полікомпонентного аерозольного забруднення, у складі якого переважають:

- первинні мінеральні аерозолі (аміачна селітра, карбамід, сульфат амонію),
- органічні аерозолі (у тому числі мікропластики),
- чорний вуглець,
- вторинні неорганічні аерозолі, що утворюються в атмосфері внаслідок реакцій NH_3 , HNO_3 та NO_x .

Особливістю структури викидів є висока розчинність і біологічна активність частинок, що робить їх суттєво відмінними від інертного пилу металургії чи цементної промисловості.

У зв'язку зі зростанням виробництва у 2025 році критично важливим є впровадження автоматизованих систем моніторингу $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} на ключових джерелах викидів, насамперед у грануляційних вежах. Саме цей елемент залишається слабким місцем системи екологічного управління підприємства.

2.2.2 ТОВ «Карпатнафтохім» як джерело емісії специфічних аерозолів

ТОВ «Карпатнафтохім» – сучасний нафтохімічний комплекс, який позиціонується як стратегічно важливий та високотехнологічний об'єкт хімічної індустрії України [36]. Є одним із ключових виробників полівінілхлориду (ПВХ-суспензія), етилену, каустичної соди та хлору в Україні. Виробничі потужності підприємства зосереджені у м. Калуш, що географічно віддалене від обласного центру (Івано-Франківськ) на 35 км, а від міста Львів – на 110 км. Стратегічне значення об'єкта визначається його здатністю забезпечувати замкнений цикл переробки вуглеводневої сировини у кінцеві полімерні матеріали.

Підприємство володіє ексклюзивними потужностями з випуску:

- базових олефінів (етилену, пропілену),
- ароматичних вуглеводнів (нафтового бензолу),
- широкого спектра фракцій піролізу ($\text{C}_4\text{--C}_9$), а також
- полімерних матеріалів – поліетилену та суспензійного полівінілхлориду (ПВХ-С);
- хлор-лужне виробництво (каустична сода, хлор), інтегроване з ланцюгом етилендихлориду – вінілхлорид-мономеру – полівінілхлориду.



Рисунок 2.3 – ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш)

В основі технологічного регламенту виробничого процесу базується на високотемпературному піролізі вуглеводневої сировини з подальшим низькотемпературним ректифікаційним розділенням продуктів реакції. Для забезпечення виробничого циклу використовується різноманітна вуглеводнева сировина: від легких та середніх дистилатів (бензин, дизпаливо), прямогонні бензини, до зріджених газів – різні види бутану (н-бутан, технічний) та широку фракцію легких вуглеводнів (ШФЛВ).

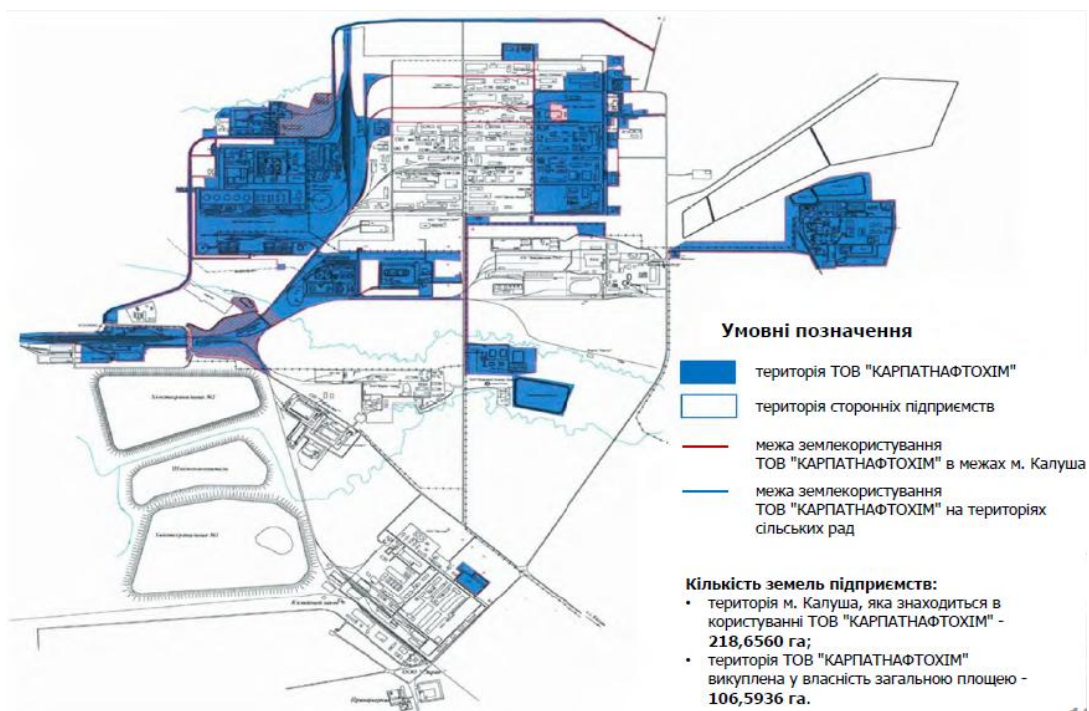


Рисунок 2.4 – Карта-схема розташування основних виробничих потужностей та джерел викидів ТОВ «Карпатнафтохім» [36]

Саме специфіка піролізних процесів та використання легких вуглеводнів визначає морфологічний склад викидів підприємства, де поряд із твердими частками (сажею) значну частку займають леткі органічні сполуки.

Ключові пилогенеруючі процеси:

1. Піроліз вуглеводнів як джерело викидів сажі та дрібнодисперсних часток. Базовим технологічним процесом нафтохімічного виробництва є піроліз (термічний розклад) вуглеводнів, який здійснюється у трубчастих печах при температурах 800–850 °С. У ході реакції на внутрішніх стінках змійовиків відбувається накопичення коксу (елементарного вуглецю). Для відновлення ефективності теплообміну проводиться процедура декоксування – випалювання коксу пароповітряною сумішшю.

Під час декоксування та, особливо, у аварійних ситуаціях газові потоки спрямовуються на факельні установки. Неповне згоряння вуглеводнів на факелах супроводжується інтенсивним утворенням чорного вуглецю, основним компонентом промислової сажі. У перші секунди після утворення частинки сажі мають нанорозміри (РМ_{0.1}), однак швидко коагулюють у ланцюжкові структури, що потрапляють до фракції РМ_{2.5}.

Відповідно до звітів IPCC (2023), чорний вуглець належить до короткоживучих кліматичних забруднювачів, який інтенсивно поглинає сонячну радіацію, сприяє локальному перегріванню повітряних мас та посиленню температурних інверсій. Для Калуської улоговини це особливо критично, оскільки така орографічна структура сприяє накопиченню аерозолів і формуванню стійких епізодів смогу [24].

2. Виробництво суспензійного полівінілхлориду: емісія полімерного пилу та мікропластику

Процес отримання суспензійного полівінілхлориду (ПВХ-С) є ключовим джерелом твердого полімерного пилу. Технологія виробництва передбачає полімеризацію вінілхлориду у водному середовищі з подальшим виділенням твердої фази та сушінням

Згідно з підходами, визначеними у довіднику BREF для полімерної промисловості, основними етапами формування пилових викидів є такі:

а) Сушіння суспензії. Після завершення процесу центрифугування вологий ПВХ подається до сушарок типу «киплячого шару». У процесі інтенсивного

сушіння відбувається відділення дрібнодисперсних частинок полімеру, які разом із відпрацьованим повітрям надходять до газовідвідних систем. Саме на цій стадії утворюється характерний полівінілхлоридний пил, що містить частинки діаметром від декількох мікрометрів до 100–150 мкм.

б) Пневмотранспорт і фасування сухого порошку. Транспортування висушеного ПВХ-порошку до силосів зберігання, а також його подальше дозування, переміщення та пакування в мішки супроводжується інтенсивним утворенням пилової хмари. За рахунок механічних коливань, падіння матеріалу та турбулентності повітря на етапах перевантаження фіксується підвищене виділення пилових частинок, що є характерною ознакою полімерних виробництв.

Екологічне значення пилових викидів ПВХ полягає у тому, що твердодисперсна фракція містить залишковий вінілхлорид-мономер (VCM) – хлорорганічну сполуку, класифіковану Міжнародним агентством з вивчення раку як канцероген класу 1. Вміст VCM у пилових частинках зумовлює їхню потенційну токсичність та потребу у суворому контролі. Крім того, осідання полівінілхлоридного пилу в межах санітарно-захисної зони промислового майданчика розглядається як забруднення довкілля мікропластиком, що набуває особливої актуальності у світлі розробки Глобальної угоди ООН про пластмаси (UNEP, INC-5, 2024), у межах якої передбачено посилення міжнародних вимог до запобігання втратам первинної пластмасової сировини та мікрогрануляту [25, 27, 28, 34].

3. Хлор-лужне виробництво та специфічні аерозолі

ТОВ «Карпатнафтохім» використовує сучасний мембранний метод електролізу, що виключає викиди ртуті (на відміну від старих технологій). Проте, існують специфічні джерела твердих викидів на стадії підготовки розсолу.

Джерелами виступають склади солі (галіту) та вузли приготування розсолу. Пиління кам'яної солі (NaCl) під час розвантаження та дроблення. Утворюється сольовий пил, який викликає засолення ґрунтів навколо підприємства та корозію металоконструкцій міської інфраструктури [4].

4. Вплив режимів «пуск-зупинка» в умовах воєнного стану

Специфікою роботи підприємства у 2022–2025 роках є вимушені зупинки

через перебої в енергопостачанні та логістиці. Для нафтохімії це є фактором підвищеного екологічного ризику.

Під час аварійних зупинок або пускових операцій відбувається масоване скидання некондиційної сировини на факельні системи. Як результат – пікові викиди сажі та продуктів неповного згоряння (СО, бензопірен).

Саме тому важливим є дані супутникової системи Copernicus Sentinel-5P, які фіксують кореляцію між періодами перезапуску заводу та зростанням індексу аерозолів над Калуським промисловим вузлом [30]. Це підтверджує тезу про те, що нестабільний режим роботи є більш шкідливим, ніж стабільна експлуатація.

5. Вторинне забруднення: хвостосховища та полігони

Хоча Домбровський кар'єр та хвостосховища формально є окремими об'єктами, вони історично та технологічно пов'язані з калійним та нафтохімічним виробництвом. В контексті ТОВ «Карпатнафтохім» слід враховувати шламонакопичувачі очисних споруд. Висохлі карти шламів у літній період стають джерелом вторинної вітрової ерозії, піднімаючи у повітря токсичний пил, що містить важкі метали та хлорорганічні сполуки.

Відповідно до паспортних даних та звітів про інвентаризацію викидів, газоочисне обладнання ТОВ «Карпатнафтохім» працює у безперервному технологічному циклі. Проектна ефективність очистки пилогазової суміші на даних установках оцінюється у 99,5%.

2.3 Методичні підходи до екологічної оцінки впливу пилових викидів

Оцінка впливу пилових викидів у зонах хімічних і переробних виробництв вимагає поєднання кількох методичних блоків: інвентаризації викидів, моніторингу концентрацій, моделювання розсіювання, оцінки ризику для здоров'я населення й екосистем, побудови інтегральних показників техногенного навантаження.

Для сучасних промислових майданчиків, особливо у хімічній галузі, дедалі ширше застосовуються автоматизовані системи моніторингу викидів (CEMS/AMS), які забезпечують безперервний контроль пилу на джерелі та в

зоні впливу.

У зонах впливу хімічних і переробних підприємств важливі не лише викиди на джерелі, а й фактичні концентрації у приземному шарі повітря, де формується експозиція населення.

Стандартний гравіметричний метод (EN 12341) для $PM_{10}/PM_{2.5}$ в ЄС; на його основі будуються національні мережі моніторингу [31, 32, 33, 34].

У контексті промислових зон:

- такі відбори можуть виконуватися в санітарно-захисних зонах для оцінки впливу підприємства на населення;
- отримані значення зіставляються з граничними рівнями ВООЗ та національними нормативами;
- результати можуть використовуватися для верифікації моделей розсіювання (ОНД-86 та інші), розрахунку зон впливу підприємства.

Наземний моніторинг (стаціонарні пости, автоматизовані станції) забезпечує точні локальні дані щодо концентрацій PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 . Проте для оцінки просторового патерну забруднення (особливо в умовах недостатньої густоти мережі) дедалі ширше застосовуються дані дистанційного зондування: серії MODIS/MISR/VIIRS від NASA дозволяють отримувати поля аерозольної оптичної товщини, які через емпіричні чи гібридні моделі відображають приземні концентрації $PM_{2.5}$ [30]; CAMS global reanalysis (EAC4) та регіональні продукти Copernicus Atmosphere Monitoring Service забезпечують тривалі ряди тривимірних полів концентрацій аерозолів і газів, що поєднують модельні розрахунки з широким набором спостережень [30, 38, 44, 47].

Такий підхід відповідає вимогам Директиви (ЄС) 2024/2881 щодо використання моделювання й супутникових даних для оцінки якості повітря й планування заходів.

Альтернативний сегмент контролю якості атмосферного повітря представлений мережами громадського моніторингу (EcoCity, SaveEcoBot, ЛУН Місто Air тощо), які активно інтегруються в екологічну інфраструктуру

України. За наявними даними [18], сенсорні мережі функціонують у 20 регіонах країни. Методологія оцінки базується на інструментальному вимірюванні вмісту твердих часток фракції $PM_{2.5}$. Інтерпретація результатів проводиться шляхом конвертації концентрацій у бали Індексу якості повітря (AQI) з відповідним кольоровим маркуванням зон небезпеки (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – AQI для забруднення повітря $PM_{2.5}$ [23, 26]

AQI	Рівень забруднення повітря	Наслідки для здоров'я	Застереження (для $PM_{2.5}$)
0 - 50	добре	Якість повітря вважається задовільною, а забруднення повітря не становить небезпеки або не становить нічого	Жодного
51 -100	Помірний	Якість повітря прийнятна; однак деякі забруднювачі можуть викликати помірне занепокоєння для здоров'я дуже невеликої кількості людей, які надзвичайно чутливі до забруднення повітря.	Активним дітям і дорослим, а також людям із захворюваннями дихальних шляхів, такими як астма, слід обмежити тривале перебування на вулиці.
101-150	Нездоровий для чутливих груп	Члени чутливих груп можуть мати наслідки для здоров'я. Це навряд чи вплине на широку громадськість.	Активним дітям і дорослим, а також людям із захворюваннями дихальних шляхів, такими як астма, слід обмежити тривале перебування на вулиці.
151-200	Нездоровий	Кожен може почати відчувати вплив на здоров'я; члени чутливих груп можуть мати більш серйозні наслідки для здоров'я	Активним дітям і дорослим, а також людям із захворюваннями дихальних шляхів, такими як астма, слід уникати тривалого перебування на вулиці; всім іншим, особливо дітям, варто обмежити тривале перебування на свіжому повітрі
201-300	Дуже нездоровий	Медичні попередження про надзвичайні ситуації. Більша ймовірність ураженості всього населення.	Активним дітям і дорослим, а також людям з респіраторними захворюваннями, такими як астма, слід уникати будь-яких навантажень на свіжому повітрі; всім іншим, особливо дітям, слід обмежити навантаження на свіжому повітрі.
300+	небезпечний	Попередження про стан здоров'я: кожен може мати більш серйозні наслідки для здоров'я	Усім слід уникати будь-яких навантажень на відкритому повітрі

Аналіз рівня аерогенного забруднення здійснюється шляхом трансформації абсолютних значень концентрацій у відносні показники. Основним інструментом такої оцінки в Україні слугує Індекс забруднення атмосфери (ІЗА). Він дозволяє уніфікувати дані спостережень, нормуючи усереднені або пікові концентрації поліутантів відносно їх гігієнічних регламентів (ГДК). Визначення ІЗА для окремого компонента забруднення

проводиться за рівнянням:

$$ІЗА_i = \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{a_i},$$

а для комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) за рівнянням:

$$КІЗА = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{a_i},$$

де C_i – вміст екополютанта i в атмосферному повітрі, мг/м³; $ГДК_i$ – гранично допустима концентрація екополютанта i в атмосферному повітрі, мг/м³; a_i – коефіцієнт, який залежить від класу небезпеки екополютанта.

Хоча питання стосується саме методів визначення пилу, в практиці промислового екологічного контролю масові концентрації часто оцінюють також розрахунковими методами, які спираються на:

- питомі показники викидів згідно з методиками Міндовкілля;
- класичну методику ОНД-86 для розрахунку концентрацій у приземному шарі (врахування метеорології, рельєфу, висоти труби тощо).

Такі методи не замінюють вимірювань, але:

- використовуються для інвентаризації викидів, коли відсутній повний набір прямих вимірів;
- дозволяють моделювати прогностні сценарії (зміна продуктивності, встановлення нових газоочисних установок, перехід на інше паливо).

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Важливо зазначити, що атмосферні аерозолі є одним із домінуючих факторів деградації повітряного басейну. Динаміка накопичення твердих домішок у приземному шарі атмосфери є мультифакторним процесом, що залежить від демографічного навантаження, технологічних характеристик промислових джерел емісії та ступеня впровадження природоохоронних заходів. Додатковими детермінантами виступають інфраструктурні особливості (тип та стан дорожнього полотна) і кліматичні параметри, що впливають на процеси вимивання та вторинного підйому пилу. Високі ризики для здоров'я людини та пригнічення фітоценозів зумовлюють нагальну необхідність інструментального контролю вмісту пилових часток.

Для аналітичної частини використовується поєднання трьох груп даних:

1. офіційні дані державної системи моніторингу – дані мережі спостережень Українського гідрометеорологічного центру та Центральної геофізичної обсерваторії [22] (регламентовані відповідними наказами ДСНС та Міндовкілля). Ця мережа забезпечує тривалі ряди концентрацій зважених частинок (загальний пил/TSP, PM_{10} , частково $PM_{2.5}$) та газоподібних компонентів у великих промислових містах України;
2. державна платформа «ЕкоЗагроза» Міндовкілля – офіційний ресурс та мобільний застосунок, що агрегує дані про стан атмосферного повітря, вод, ґрунтів, радіаційний фон, а також інформацію про збитки довкіллю, зокрема від війни. Платформа інтегрує дані державних станцій та окремих мереж громадського моніторингу (зокрема EcoCity);
3. громадський та приватний моніторинг (SaveEcoBot, EcoCity, IQAir тощо) – SaveEcoBot (НУО SaveDnipro) є найбільшим агрегатором екологічних даних в Україні, який об'єднує понад 500 станцій моніторингу якості повітря, фонові радіації, відкритих державних даних та власної мережі низьковартісних сенсорів.

3.1 Екологічна оцінка техногенного навантаження хімічного кластера на якість атмосферного повітря м. Черкаси

Ефективна оцінка екологічного стану урбанізованої території, що знаходиться під впливом потужного хімічного кластера (ПрАТ «Азот»), вимагає крос-валідації даних з різних джерел. У цьому дослідженні застосовано порівняльний аналіз даних державної системи моніторингу (пости Черкаського обласного центру з гідрометеорології) та громадських мереж спостереження (SaveEcoBot, EcoCity), агрегованих на платформі Міндовкілля «ЕкоЗагроза» (<https://ecozagroza.gov.ua/>).

Промисловий вузол ПрАТ «Азот» розташований з урахуванням панівної рози вітрів (переважно північно-західні та західні вітри, що відносять викиди від міста). Однак, дані моніторингу SaveEcoBot та Служби моніторингу атмосфери Copernicus (CAMS) [30] за 2023–2024 рр. фіксують епізодичні підвищення концентрацій PM_{2.5} у житлових зонах при зміні вітру на південно-східний. Урбаністична структура Черкас характеризується широкими проспектами, що, з одного боку, покращує провітрюваність (вентиляцію), а з іншого – при сильних вітрах сприяє повторному підйому пилу (респензії) з дорожнього покриття.

Згідно з актуальними даними, аналіз виробничої діяльності підприємств азотного холдингу Ostchem за I квартал 2025 року демонструє стійку тенденцію до нарощування потужностей. Загальний обсяг випуску мінеральних добрив склав 529,3 тис. тонн, що на 5,3% перевищує показники аналогічного періоду минулого року. Основне техногенне навантаження припадає на Черкаський промисловий вузол, де місцевий «Азот» виробив 394,8 тис. тонн добрив (проти 134,4 тис. тонн у «Рівнеазоту») [15]. Таке зростання обсягів виробництва актуалізує питання оцінки відповідності рівня пилових викидів екологічним нормативам.

За умови роботи у режимі максимального завантаження, підприємство здатне генерувати близько 3 млн тонн готової продукції на рік, що відповідає піковим значенням техногенного навантаження на атмосферне повітря регіону.

Таким чином, зростання обсягів виробництва на 5,3% у 2025 році дозволяє прогнозувати пропорційне збільшення валових викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, якщо на підприємстві не було проведено модернізацію пилогазоочисного устаткування, що актуалізує питання оцінки екологічного сліду в умовах підвищеного завантаження потужностей.

Промисловий майданчик площею близько 500 га об'єднує 43 структурні підрозділи, які формують єдиний технологічний ланцюг переробки природного газу та атмосферного повітря у продукти з високою доданою вартістю. Ключовою особливістю емісійного профілю підприємства є переважання процесів газофазного синтезу та кристалізації з розплавів, що визначає специфічну морфологію твердих викидів: це не класичний мінеральний пил (як у металургії), а складні хімічні аерозолі та тумани, здатні до фазових переходів в атмосфері.

На основі аналізу матеріального балансу та технологічних схем виробництва ПрАТ «Азот», домінуючим джерелом емісії твердих частинок є грануляційні вежі цехів виробництва аміачної селітри та карбаміду. Викиди з цих джерел являють собою складну аерозольну систему, що складається з мікрочастинок готового продукту (розміром PM_{2.5-10}) та туману, утвореного внаслідок конденсації парів.

Другу групу за значущістю формують джерела механічного походження: системи аспірації вузлів пересипки, транспортування та пакування готової продукції, а також дільниці сушіння сульфату амонію (побічного продукту виробництва капролактаму). Специфічним маркером впливу підприємства є наявність у складі пилу водорозчинних форм азоту, що підтверджує його безпосередній зв'язок із технологічними процесами кристалізації добрив.

За даними Головного управління статистики у Черкаській області [15], загальний обсяг викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел у регіоні в останні роки коливається в діапазоні $\approx 47\text{--}62$ тис. т/рік, з тенденцією до скорочення порівняно з 2018 р. Так, у 2018 р. викиди від стаціонарних джерел становили близько 57,9 тис. т, а у 2022 р. – вже 47,0 тис. т, що свідчить про зниження на $\sim 19\%$.

Регіональна доповідь про стан довкілля за 2021 р. деталізує внесок окремих підприємств. У таблиці основних забруднювачів атмосферного повітря зазначено, що: ПрАТ «Азот» викинуло у 2021 р. $\approx 3,5$ тис. т забруднюючих речовин, тоді як загальні викиди від основних підприємств-забруднювачів становили 26,5 тис. т ($\approx 55,7$ % від викидів стаціонарних джерел області).

Таким чином, один хімічний комплекс формує понад 7 % обласних стаціонарних викидів і понад 13 % викидів основних промислових забруднювачів, що підтверджує його ключову роль у формуванні регіонального пилового та газоподібного навантаження.

У структурі викидів Черкаської області (2020–2024 рр.) домінують:

- оксид вуглецю,
- суспендовані тверді частинки,
- сполуки азоту та сірки,
- метан і неметанові ЛОС.

Для нашого дослідження важливим є показник “суспендовані тверді частинки”, який у звітності 2-ТП (повітря) відображає сумарну масу пилу, тоді як у практиці оцінки якості повітря в ЄС і ВООЗ використовується диференціація за $PM_{10}/PM_{2.5}$. Це означає, що при інтерпретації даних необхідні перехідні коефіцієнти або додаткові вимірювання, аби співвіднести «зважені тверді частинки» зі стандартами ВООЗ та директив ЄС.

Водночас, на рівні міста Черкаси, відкриті ресурси (IQAir, звіти громадських ініціатив) фіксують періодичні епізоди перевищення рекомендованих ВООЗ рівнів $PM_{2.5}$, що підтверджує, що сукупний внесок промислових джерел (у т. ч. ПрАТ «Азот»), транспорту й опалення домогосподарств призводить до значущих ризиків для здоров'я населення.

Аналіз екологічної ситуації за 2022 рік демонструє спадну тенденцію обсягів промислових викидів у Черкаській області (сумарно 47,0 тис. тонн, що на 0,7 тис. тонн менше за попередній період). Основний внесок у покращення якості повітря зробив найбільший забруднювач регіону – ПрАТ «Азот». За звітний період підприємству вдалося зменшити генерацію забруднюючих речовин на 0,424 тис. тонн, досягнувши показника у 3,106 тис. тонн.

Така динаміка стала можливою завдяки модернізації очисного обладнання (відновлення скрубєрів) та технологічним змінам, зокрема переходу на виробництво рідких форм добрив. За оцінками, ці заходи дозволили запобігти викидам 2,106 тис. тонн шкідливих речовин, серед яких значну частку (0,616 тис. тонн) становив аміак. Як наслідок, інтегральний показник забруднення (ІЗА) по місту Черкаси покращився, змінившись з 7,36 до 5,37, однак все ще класифікується як підвищений.

Таблиця 3.1 – Основні забруднювачі атмосферного повітря за 2022 рік

Назва об'єкту	Назва забруднюючої речовини	Частка викидів забруднюючої речовини			Частка оснащення джерел викидів газочисними установками (ГОУ), %	Ефективність роботи ГОУ, %	Зменшення обсягів викидів за рахунок впровадження природоохоронних заходів, т/рік	
		усього викидів, т/рік	до загального обсягу викидів об'єкту, %	до загального обсягу викидів населеного пункту, %*			очікуване	фактичне
2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПрАТ „Азот“	Оксид вуглецю	78,737	2,5	-	4,4	100	-	-
	Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	896,896	28,88	-	42,2	50-99	-	-
	Діоксид азоту	486,612	15,67	-	24,4	95-100	0,1	0,1
	Аміак	365,99	11,78	-	46,6	50-100	-	-

Протягом 2023 року в регіоні спостерігалася тенденція до погіршення якості повітря: викиди від стаціонарних джерел зросли на 14,8 тис. т, досягнувши 61,8 тис. т. Основною причиною стало збільшення виробництва на ПрАТ «Азот», що додало в атмосферу 2,913 тис. т забруднюючих речовин (загальний викид підприємства – 6,018 тис. т).

Таблиця 3.2 – Основні забруднювачі атмосферного повітря за 2023 рік

Назва об'єкту	Назва забруднюючої речовини	Частка викидів забруднюючої речовини			Частка оснащення джерел викидів газочисними установками (ГОУ), %	Ефективність роботи ГОУ, %	Зменшення обсягів викидів за рахунок впровадження природоохоронних заходів, т/рік	
		усього викидів, т/рік	до загального обсягу викидів об'єкту, %	до загального обсягу викидів населеного пункту, %*			очікуване	фактичне
2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПрАТ «Азот»	Оксид вуглецю	247,400	4,1	-	4,4	100	-	-
	Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок	1835,334	30,5	-	42,2	50-99	-	-
	Діоксид азоту	795,312	13,2	-	24,4	95-100	0,1	0,1
	Аміак	679,704	11,3	-	46,6	50-100	-	-

Концентрація промислового забруднення залишається високою: 67% усіх викидів (41,185 тис. т) припадає на групу основних підприємств області.

Як наслідок, індекс забруднення атмосфери зріс із 5,32 до 6,54, що відповідає градації «підвищений рівень» і практично збігається із середнім показником по Україні (6,6).

Згідно з офіційною інформацією, що міститься у звітах за формою № 1-відходи, а також даними паспортів місць видалення відходів, ПрАТ «Азот» визначено основним об'єктом акумуляції промислових відходів у Черкаському регіоні (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Ідентифікацію ключових суб'єктів господарювання, на території яких зосереджено найбільші обсяги промислових відходів, здійснено шляхом аналізу форми № 1-відходи та відомостей з паспортів місць видалення відходів (МВВ)

№ з/п	Підприємства	Найменування відходу	Клас небезпеки	Накопичено відходів станом на початок звітного періоду, т	Фактично утворилось відходів на підприємстві за 2023 рік (звітний), т	Накопичено відходів станом на кінець звітного року, т	Місце накопичення відходів
1.	ПрАТ «АЗОТ», м. Черкаси, вул. Героїв Холодного Яру, 72, код згідно з ЄДРПОУ 00203826	Шлам від очищення вод стічних комунальних (міських) (осад після біологічних очисних споруд)	4	108188,0	0	108188,0	Накопичувач обезводненого осаду очисних споруд (Черкаський район, с. Червона Слобода)
		Шлам від очистки обладнання; шлам мийки машин; шлам з установки термічного знешкодження стоків; шлам станції нейтралізації; силікагель; декаліт; відпрацьоване активоване вугілля; цеоліт, алюмогель; іонообмінні смоли; сополімер; відходи гасіння вапна; шлак і бій цегли з печей	4	6060,0	0	6060,0	Накопичувач промислових відходів (Черкаський район, с. Вергуни)
		Шлам від очищення вод стічних комунальних (міських) (зневоднений осад)	4	252170,0	2598,0	254768,0	Мулові поля цеху очистки промислових і стічних вод (Черкаський район, с. Червона Слобода)
		Шлам від очищення вод стічних комунальних (міських) (зброджений осад)	4	7026,768	0	7026,768	Компостні майданчики цеху очистки промислових і стічних вод (Черкаський район, с. Червона Слобода)
		Силікагель; активоване вугілля; іонообмінні смоли; шлам від очистки обладнання; шлам установки термічного знешкодження стоків; шлак і бій цегли з печей; відходи гасіння вапна; інше	4	6104,0	0	6104,0	Шламонакопичувач поз. 22/1 виробництва іонообмінних смол (м. Черкаси)

У 2023 звітному році здійснено виконання планових робіт із мінімізації забруднення повітряного басейну згідно з вимогами чинної дозвільної документації на викиди (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Впровадження заходів зі зниження рівня емісії забруднюючих речовин на виконання умов дозволів протягом 2022

№ з/п	Назва об'єкта та фактична адреса промислового майданчика	Код виробничого та технологічного процесу, технологічного устаткування (установки)	Найменування заходу	Строк виконання заходу	Номер джерела викиду на карті-схемі	Зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря після впровадження заходу, т/рік
1	2	3	4	5	6	7
1	ПрАТ „АЗОТ“, 18028, м.Черкаси, вул.Героїв Холодного Яру, 72	210405	Реконструкція апаратів ВТН. Реконструкція промивного скрубєру (цех М-9)	2022	504,505	Зменшення викидів аміаку на 252,6 т/рік та аміачної мселітри на 1259,7 т/рік

Державний моніторинг у м. Черкаси здійснюється на трьох стаціонарних постах. Найбільш репрезентативним для оцінки впливу ПрАТ «Азот» є пункт спостереження № 2 (мікрорайон «Дніпровський», вул. Гетьмана Сагайдачного), розташований у зоні впливу північно-західних вітрів від промвузла.

Таблиця 3.5 – Середньомісячні концентрації домішок в повітрі за вересень 2022 року [34]

Назва шкідливих речовин	Концентрації, мг/м ³				Середньодобові ГДК, мг/м ³
	Центр міста	Дніпровський мікрорайон	Південно-західний мікрорайон	По місту	
Пил	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15
Двооксид сірки	0,021	0,023	0,019	0,021	0,05
Оксид вуглецю	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0
Двооксид азоту	0,06	0,04	0,02	0,04	0,04
Оксид азоту	–	–	0,02	–	0,06
Сірководень	0,002	0,002	0,001	0,002	–
Аміак	0,08	0,07	0,05	0,07	0,04
Формальдегід	–	0,006	–	–	0,003

За даними Регіональних доповідей Черкаської ОДА, період 2020-2021 рр. характеризувався стабільно високим рівнем забруднення, що корелювалося з піковими обсягами виробництва добрив. Тоді як у період 2022 спостерігається «екологічна яма» – різке зниження концентрацій (на 30–40%) через зупинку підприємств та зменшення автотрафіку в перші місяці війни.

У період 2023–2024 фіксується «відскок», оскільки концентрації аміаку та пилу не просто повернулися до довоєнного рівня, а й перевищили його. Це пояснюється не лише відновленням роботи цехів М-5 і М-9 ПрАТ «Азот», а й використанням дизельних генераторів бізнесом міста, що додало у повітря значну кількість сажі.

На відміну від офіційних постів, які вимірюють «пил загальний» гравіметричним методом (раз на добу), датчики SaveEcoBot вимірюють фракції PM2.5 та PM10 у режимі реального часу (лазерне розсіювання).

Аналіз погодинних даних станції SaveEcoBot (ID: 1421, вул. Героїв Холодного Яру) за 2024 рік виявив критичну проблему: пікові забруднення у нічний час. У період з 23:00 до 04:00 концентрація PM2.5 часто зростає до 50–70 мкг/м³ (норма ВООЗ – 15 мкг/м³). Це свідчить про наявність температурних інверсій, які «притискають» викиди підприємства до землі, а також про можливі нічні технологічні операції (продувки), які не фіксуються державними постами вдень.

Слід враховувати, що побутові датчики мають похибку до 20–30% при високій вологості (туман), що є характерним для Черкас через близькість Кременчуцького водосховища. Тому ці дані використовуються як індикатор трендів, а не абсолютних значень.

Окремим об'єктом екологічної оцінки у структурі ПрАТ «АЗОТ» є Цех очищення промислових стічних вод (ОПСВ). Даний підрозділ виконує функцію централізованої системи водовідведення, приймаючи на очистку не лише власні виробничі та злизові стоки підприємства, а й комунальні стічні води міста Черкаси та інших промислових суб'єктів.

Промисловий майданчик цеху територіально розташований у с. Слобода (Червонослобідська ТГ). Технологічний цикл включає стадії механічної та біологічної очистки, а також хлорування стоків. Окрім основного обладнання, джерелами емісії забруднюючих речовин виступають допоміжні дільниці: котельня, зварювальні пости, фарбувальні та металообробні цехи, а також резервуари зберігання паливно мастильних матеріалів.

На території Цеху очищення промислових стічних вод розміщено:

- обладнання для механічного та біологічного очищення господарсько-побутових, промислових та дощових стічних вод;
- обладнання для хлорування очищених стічних вод;
- котельню;
- лабораторії;
- зварювальний пост та пост газового різання металу;
- металообробну дільницю;
- місця зберігання дизельного палива та мастил;
- фарбувальну дільницю.

Згідно з інвентаризацією джерел викидів, у процесі експлуатації існуючого обладнання в атмосферне повітря надходить широкий спектр речовин. Домінуючими за масою є парникові гази, зокрема метан (1091,8 т/рік) та діоксид вуглецю (160,4 т/рік). Специфічні викиди, характерні для процесів очистки стоків, представлені диметилсульфідом (9,1 т/рік), аміаком (7,58 т/рік) та сірководнем (1,29 т/рік). Також фіксуються викиди твердих суспендованих частинок (0,38 т/рік), оксидів азоту, толуолу та низки інших органічних і неорганічних сполук. Оскільки об'єкт належить до другої групи за ступенем впливу на довкілля і його параметри залишаються незмінними, розробка заходів щодо впровадження найкращих доступних технологій згідно з чинним законодавством не передбачена.

Діяльність ПрАТ «АЗОТ», а саме Цех ОПСВ формально підпадає під дію Закону України «Про оцінку впливу на довкілля», однак вимоги цього Закону не застосовуються до об'єктів, які вже мають чинні рішення щодо провадження планованої діяльності (у даному випадку – чинний дозвіл на викиди в атмосферне повітря від стаціонарних джерел), та були введені в експлуатацію до набрання чинності зазначеним Законом, за умови, що якісні та кількісні характеристики об'єкта не зазнали змін.

У процесі провадження виробничої діяльності на Цеху ОПСВ в атмосферне повітря надходять такі забруднюючі речовини (розрахункові річні обсяги викидів) (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Річні обсяги викидів забруднюючих речовин Цеху ОПСВ
ПрАТ «АЗОТ»

№ з/п	Назва забруднюючої речовини	Хімічне позначення	Річний обсяг викидів, т/рік
1	Суспендовані тверді частинки	—	0,38068
2	Діоксид азоту	NO ₂	0,283
3	Оксид азоту (І)	N ₂ O	0,0003
4	Оксид вуглецю	CO	0,750
5	Діоксид вуглецю	CO ₂	160,409
6	Метан	CH ₄	1091,822
7	Сірководень	H ₂ S	1,289
8	Аміак	NH ₃	7,581
9	Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	0,9784
10	Фенол	C ₆ H ₅ OH	0,030
11	Формальдегід	CH ₂ O	0,4702
12	Диметилсульфід	(CH ₃) ₂ S	9,158
13	Карбонові кислоти (суміш)	—	1,011
14	Хлор	Cl ₂	0,328
15	Сполуки заліза	Fe та ін.	0,0489
16	Сполуки марганцю	Mn та ін.	0,0017
17	Фтористий водень	HF	0,00009
18	Вуглеводні граничні	—	0,0000000000414
19	Масло мінеральне нафтове	—	0,0000149000251
20	Хлористий водень	HCl	0,0056
21	Кислота сірчана	H ₂ SO ₄	0,0008
22	Натрію гідроксид	NaOH	0,00056
23	Калію гідроксид	KOH	0,00056
24	Ксилол	C ₈ H ₁₀	0,114
25	Уайт-спірит	—	0,014
26	Ацетон	C ₃ H ₆ O	0,004
27	Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	0,014

28	Спирт бутиловий	$C_4H_{10}O$	0,003
29	Етилацетат	$C_4H_8O_2$	0,008
30	Сольвент-нафта	—	0,002

Для Черкас, як регіонального промислового центру, дані IQAir та супутникові реаналізи CAMS [30, 34, 38] свідчать, що рівні PM_{10} , та $PM_{2.5}$ періодично перевищують рекомендації ВООЗ (зокрема, щорічний граничний рівень 5 мкг/м^3 для $PM_{2.5}$ та 15 мкг/м^3 для PM_{10} згідно з оновленими Глобальними рекомендаціями 2021 р.), що підсилює значущість пилових викидів крупних хімічних підприємств у регіональній структурі забруднення.

Результати моніторингу на восьми стаціонарних постах свідчать про те, що протягом року рівень атмосферного забруднення характеризується певною варіабельністю, проте стабільно перевищує гігієнічні нормативи. Зокрема, концентрації поллютантів знаходяться в діапазоні $0,17\text{--}0,3 \text{ мг/м}^3$, що відповідає перевищенню ГДК у $1,1\text{--}2,0$ рази (рис. 3.1).

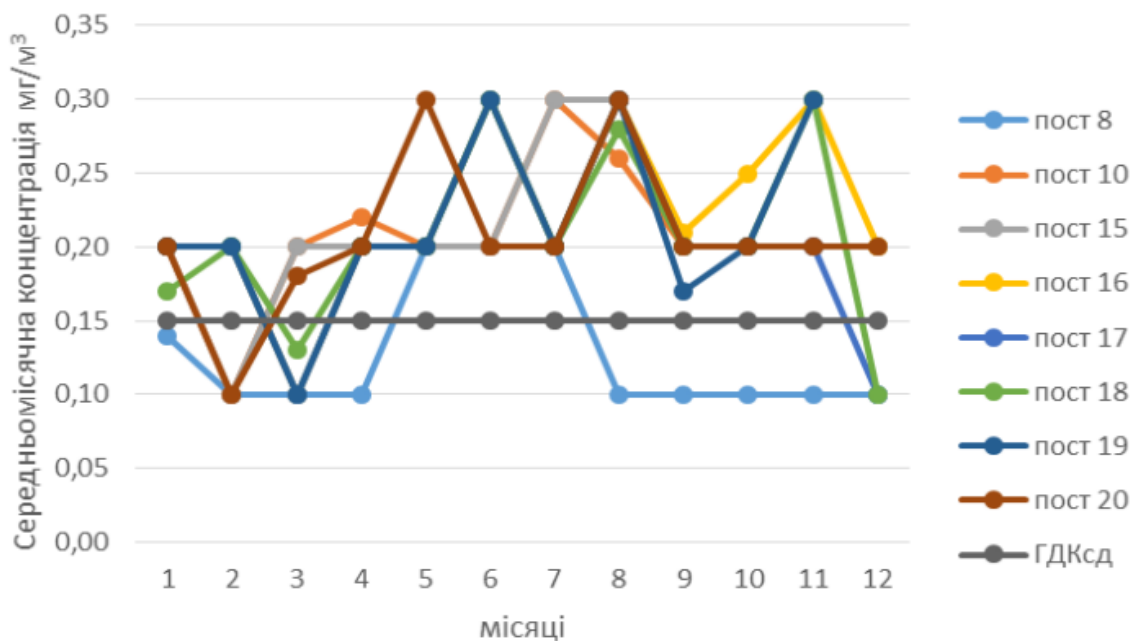


Рисунок 3.1 – Сезонна мінливість концентрацій неорганічного пилу на контрольованих постах моніторингу

Варто зазначити, що динаміка концентрацій неорганічного пилу демонструє територіальну асинхронність (не співпадає у різних районах). Часовий максимум забруднення чітко корелює з теплим сезоном року (травень–серпень).

Слід відмітити, що незважаючи на наявність сертифікованих систем управління якістю та екологічним менеджментом, виробничі потужності ПрАТ «Азот» і надалі відносяться до переліку екологічно небезпечних об'єктів загальнодержавного значення, що обумовлює необхідність посиленого моніторингу аерозольних викидів та впровадження найкращих доступних технологій.

Попри те, що згідно з СН-245-71 санітарно-захисна зона ПрАТ «Азот» має становити 1000 м, фактичний вплив викидів поширюється на більшу відстань. Урахування рози вітрів показало, що за північним, східним, західним та південно-західним румбами розрахункова межа санітарно-захисної зони виходить за межі нормативної, що свідчить про її недостатність для захисту прилеглих територій.

3.2 Екологічна оцінка сумарного впливу промислових і вторинних джерел пилу в Калуському промвузлі та роль ТОВ «Карпатнафтохім» у формуванні аерогенного ризику

Промисловий комплекс міста Калуш характеризується високою концентрацією об'єктів хімічної, нафтохімічної, будівельної та енергетичної промисловості, що формують потужний і багатокомпонентний вплив на стан атмосферного повітря регіону. Вплив цих об'єктів посилюється ерозійними процесами. Відсутність щільного лісового бар'єра між промзоною та житловою забудовою (райони Хотінь, Підгірки) призводить до того, що навіть при помірному вітрі відбувається вітрова ерозія сухих поверхонь хвостосховищ.

Однією з унікальних ознак Калуського промислового району [14], яка принципово відрізняє його від інших українських промвузлів, є поєднання великих промислових підприємств закритого циклу (хімія, нафтохімія) з великими відкритими ділянками, здатними генерувати пил вторинного походження. До таких площ належать (рис. 3.2):

- Домбровський кар'єр (9) – багатокілометрова територія висохлих розсолів, солей, мулів, яка в літній період перетворюється на надпотужне джерело пилових частинок (сольовий пил NaCl , CaCl_2 , відкриті солі магнію);
- хвостосховища та шламонакопичувачі очисних споруд (8) – при

пересиханні вони піднімають у повітря PM_{10} – $PM_{2.5}$, що містять солі, хлориди, сульфати й навіть важкі метали;

- піщано-гравійні ділянки та території складу матеріалів підприємств будівельної індустрії (4, 7);

- пилові поля на межі з урбанізованими кварталами, відкриті ґрунтові ділянки та дороги без твердого покриття.



Рисунок 3.2 – Розташування небезпечних промислових підприємств міста Калуш 1 – ТЕЦ; 2 – ТОВ «Карпатнафтохім»; 3 – ТОВ «Даноша»; 4 – завод «3 бетони»; 5 – ТОВ «Карпатська кераміка»; 6 – металобаза; 7 – завод будівельних матеріалів; 8 – очисні споруди «Карпатнафтохіму»; 9 – Домбровський кар’єр

Такі джерела забезпечують постійний фоновий рівень дрібнодисперсного пилу, який у спекотний період здатний збільшуватися в 2–4 рази.

За відкритими даними Головного управління статистики в Івано-Франківській області [14], загальний обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря у 2020–2024 рр. зменшився з $\approx 178,1$ тис. т у 2020 р. до 115,1 тис. т у 2024 р., при цьому викиди від стаціонарних джерел у 2024 р. також становили 115,1 тис. т (майже весь обсяг припадає на стаціонарні джерела).

У структурі викидів області домінують:

- діоксид сірки та інші сполуки сірки,
- сполуки азоту,
- суспендовані тверді частинки,
- неметанові леткі органічні сполуки.

Згідно з регіональними доповідями та науковими дослідженнями, основними джерелами викидів у регіоні є Бурштинська ТЕС та ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш) [14, 18], яке вважається одним із найпотужніших хімічних комплексів регіону.

У попередніх роках у зв'язку із зупинкою роботи «Карпатнафтохіму» фіксувалося тимчасове зниження регіональних викидів, що прямо відображено в національних та регіональних доповідях. Однак відновлення діяльності нафтохімічного комплексу повернуло підприємство до групи ключових забруднювачів атмосферного повітря Івано-Франківщини, зокрема в частині органічних та пилових викидів, пов'язаних із виробництвом ПВХ, хлор-лужною технологією та котельними установками.

Екологічні профілі Калуської громади підкреслюють, що ТОВ «Карпатнафтохім» виступає системоутворюючим промисловим підприємством, яке формує суттєву частку викидів забруднюючих речовин, зокрема речовин у вигляді суспендованих твердих частинок і токсичних органічних сполук. При цьому в документах стратегічної екологічної оцінки наголошується на відповідальності підприємства щодо запровадження природоохоронних заходів і наявності локальної системи контролю викидів.

Загальний фон пилового забруднення в регіоні додатково оцінюється за даними супутникового моніторингу (NASA, Служби моніторингу атмосфери Copernicus) [30, 33], які демонструють сезонні максимуми аерозольної оптичної товщини над урбанізованими зонами Прикарпаття, особливо в опалювальний сезон і в періоди низької атмосферної вентиляції.

З урахуванням того, що Калуш розташований у межах Карпатського регіону із складними метеорологічними умовами (часті інверсії, слабкі вітри, долинний рельєф), пилові викиди полівінілхлориду та неорганічних солей можуть локально акумулюватися в приземному шарі, що підсилює значення моніторингу дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}, PM₁₀) у прилеглих житлових зонах. Супутникові дані NASA (аерозольна оптична товщина) та CAMS підтверджують, що урбанізовано-промислові території України, включно з

промвузлами Західної України, демонструють сезонні максимуми аерозольного навантаження, корельовані з інтенсивністю промислових викидів та метеорологічними умовами.

Згідно з офіційною звітністю Головного управління статистики в Івано-Франківській області, за підсумками 2023 року обсяг емісії забруднюючих речовин від стаціонарних джерел склав 147,7 тис. тонн. Аналіз динаміки показників свідчить про незначне скорочення техногенного навантаження: зафіксовано зменшення валових викидів на 3,02% відносно рівня попереднього року.

Таблиця 3.7 – ТОВ «Карпатнафтохім» у контексті основних джерел забруднення повітря Івано-Франківщини

Назва підприємства	Кількість викидів, тонн		
	2022 рік	2021 рік	збільшення/-зменшення до 2021 року
Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря			
ВП «БУРШТИНСЬКА ТЕС» АТ «ДТЕК ЗАХІДЕНЕРГО»	133711,305	145630,256	-11918,951
ФЛП «КАЛУСЬКА ТЕЦ» ТОВ «КОСТАНЗА»	1962,238	6781,055	-4818,817
НГВУ «НАДВІРНАНАФТОГАЗ» ПАТ «УКРНАФТА», м. Надвірна	1955,241	1934,455	20,786
НГВУ «ДОЛИНАНАФТОГАЗ» ПАТ «УКРНАФТА», м. Долина	1371,783	1326,625	45,158
Добувна промисловість і розроблення кар'єрів			
ПАТ «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКЦЕМЕНТ», с. Ямниця, Івано-Франківський район	1443,475	2079,043	-635,568
Переробна промисловість			
ТОВ «СВІСС-КРОНО»	383,450	485,508	-102,058
ТОВ «КАРПАТНАФТОХІМ»	808,681	1137,883	-329,202

Згідно з наведеними статистичними даними, загальний обсяг викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря, утворених у результаті діяльності ТОВ «Карпатнафтохім», у 2022 році становив 808,681 т, що на 329,202 т менше, ніж у 2021 році (1137,883 т). Це свідчить про суттєве зниження промислового навантаження на атмосферне повітря Калуського промислового вузла – приблизно на 29 %.

За даними регіональної статистики, у 2023 році в атмосферний басейн Івано-Франківської області від стаціонарних об'єктів надійшло 147,7 тис. тонн забруднюючих речовин, що на 3,02% менше порівняно з аналогічним показником 2022 року (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Тенденції змін обсягів емісії забруднювачів в атмосферне повітря на території Івано-Франківської області, тис. т

Роки	Викиди в атмосферне повітря			Щільність викидів у розрахунку на 1 кв. км,т	Обсяги викидів розрахунку на 1 особу, кг
	Всього	У тому числі			
		Стаціонарними джерелами	Пересувними джерелами		
2019	205,02	205,02	-	14,7	149,6
2020	178,1	140,4	37,7	-	-
2021	210,3	172,4	37,9	-	-
2022	152,3	152,3	-	-	-
2023	147,7	147,7	-	10,6	108,9 ¹

Аналіз статистичних даних свідчить, що Калуський район демонструє нестабільну, хвилеподібну динаміку обсягів викидів забруднюючих речовин у повітря протягом 2021–2023 років. У 2021 році сукупні викиди становили 15,526 тис. т, однак уже у 2022 році цей показник істотно знизився — до 8,688 тис. т (падіння приблизно на 44 %). Таке різке скорочення пояснюється насамперед частковим згортанням діяльності промислових підприємств у період воєнного стану, зниженням виробничих навантажень у нафтохімічному секторі та скороченням обсягів роботи енергетичних установок.

Таблиця 3.9 – Техногенне навантаження на атмосферний басейн від стаціонарних джерел за адміністративно-територіальним поділом (дані 2023 р.)

	Обсяги викидів забруднюючих речовин усього, т		
	2021	2022	2023
Область	172425,3	152259,2	147699,0
Івано-Франківський	152179,1	139244,4	134464,1
Калуський	15526,6	8688,0	9762,7
Верховинський	6,1	6,1	19,5
Коломийський	402,0	322,3	304,9
Косівський	95,3	214,8	108,6
Надвірнянський	4216,2	3783,6	3039,2

Втім, у 2023 році спостерігається новий підйом викидів – до 9,762 тис. т (+12,4 % порівняно з 2022 роком). Відновлення промислових процесів, запуск окремих технологічних ліній «Карпатнафтохіму» (передусім піролізу та виробництва ПВХ-С), а також збільшення транспортної активності у регіоні

стали ключовими факторами цього зростання.

З огляду на те, що Калуський район є одним з найбільш індустріальних у межах області – передусім через діяльність ТОВ «Карпатнафтохім», – навіть порівняно невеликі зміни у роботі підприємства суттєво впливають на загальний рівень викидів. Особливу роль відіграють:

- викиди дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ і PM_{10} , які формуються у процесах сушіння ПВХ, пневмотранспорту та фасування полімерів;
- викиди продуктів піролізу, зокрема чорного вуглецю, що утворюється під час декоксування;
- соляний та хімічний пил від виробництва каустичної соди та хлору;
- вторинний пил від хвостосховищ і Домбровського кар'єру.

Таким чином, зростання викидів у 2023 році, попри те що не досягло рівня 2021 року, свідчить про тенденцію до поступового повернення промислового навантаження, що потребує посиленого контролю за якістю атмосферного повітря, удосконалення систем пилогазоочистки та впровадження ВАТ-рішень відповідно до європейських екологічних вимог.

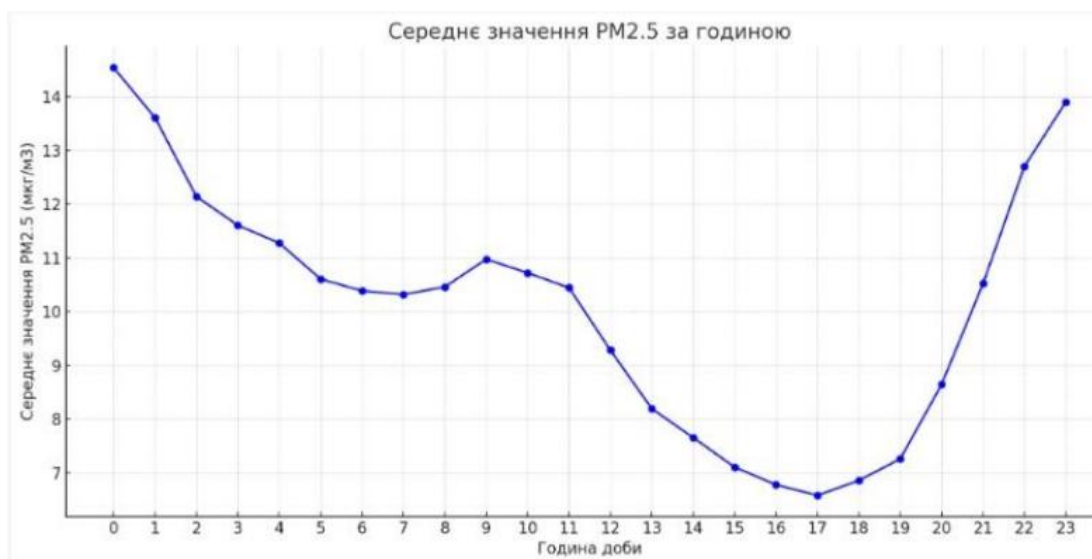


Рисунок 3.3 – Добові зміни концентрації частинок пилу $PM_{2.5}$ в м. Калусі

Таблиця 3.10 – Зміна показників викидів пріоритетних забруднювачів повітря стаціонарними джерелами (ретроспективний аналіз за 5-річний період)

	Діоксиду та інших сполук сірки	Сполуки азоту	Метану	Оксиду вуглецю	Речовин у вигляді суспендованих твердих частинок	Неметанових летких органічних сполук
2019	136143,7	16252,1	8087,1	4086,5	35244,0	5062,5
2020	95707,1	12276,8	7728,2	3053,9	16818,4	4705,1
2021	119803,4	14959,0	7311	3569,4	21530,1	5114,6
2022	104884,9	12817,8	6381,5	2880,8	20537,3	4626,2
2023	96512,1	13177,8	5683,1	2631,9	24903,1	4650,4

З метою оцінки аерогенного навантаження та виявлення просторово-часових закономірностей розподілу сажі на території міста, було проаналізовано динаміку середньомісячних концентрацій (розрахунок виконано за методикою [4], рис. 3.4.

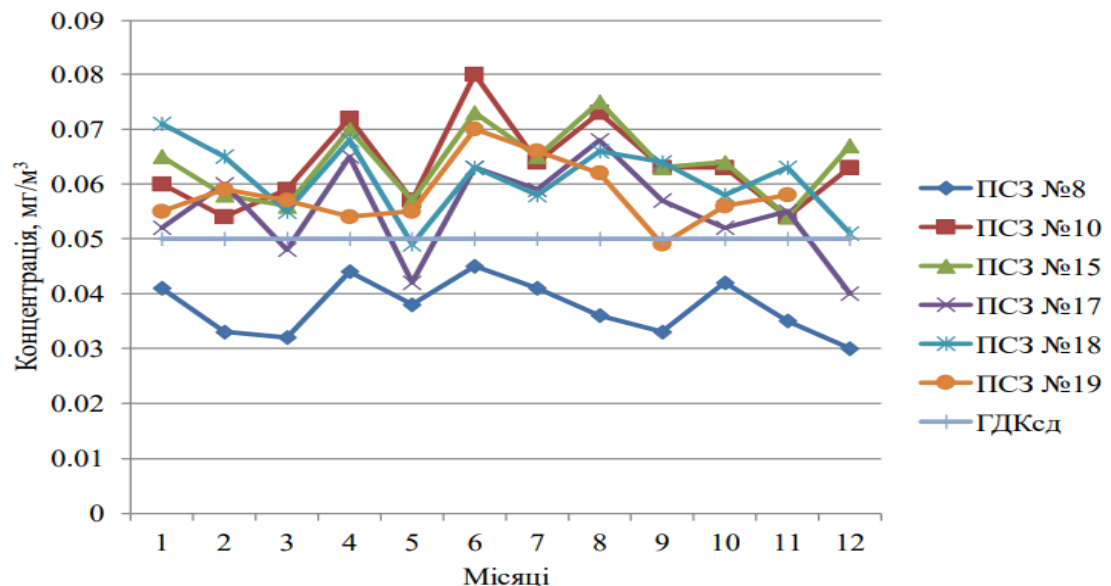


Рисунок 3.4 – Часовий хід середньомісячних концентрацій сажі на стаціонарних постах

Аналіз екстремумів показав, що максимальне забруднення зафіксовано у червні на посту спостереження 10, де концентрація сягала 0,08 мг/м³. Натомість мінімальний показник відмічено у грудні на 8-му посту на рівні 0,03 мг/м³. Екологічна ситуація в районі п'яти постів (10, 15, 17, 18, 19) залишається напруженою протягом року: фіксуються концентрації в межах 0,052–0,08 мг/м³, що відповідає перевищенню нормативу ГДК у 1,1–1,7 раза.

Аналіз середньорічних концентрацій за 2020–2024 роки демонструє нестабільну динаміку, пов'язану з режимами роботи підприємства (табл. 3.11) за даними Регіональних доповідей Івано-Франківської ОДА [14, 18] та порталу SaveEcoBot (<https://www.saveecobot.com/maps/ivano-frankivska-oblast>

Таблиця 3.11 – Динаміка забруднення атмосферного повітря в зоні впливу ТОВ «Карпатнафтохім» (2020–2024 рр.)

Показник	2020 (стабільна робота)	2021 (пікове навант.)	2022 (зупинка /війна)	2023 (відновлення /перебої)	2024 (I півріччя)	ГДК с.д.
Пил загальний, мг/м ³	0,18	0,22	0,12	0,16	0,19	0,15
Формальдегід, мг/м ³	0,012	0,015	0,008	0,011	0,013	0,003
Вуглецю оксид, мг/м ³	1,8	2,1	1,2	1,5	1,7	3,0
Сажа (С), мг/м ³	0,04	0,06	0,02	0,05	0,07	0,05

Попри те, що валові викиди у тоннах зменшилися порівняно з довоєнним 2021 роком, концентрація сажі (маркер неповного згоряння вуглеводнів) у 2024 році перевищила ГДК (0,07 мг/м³). Це пояснюється частими аварійними зупинками та пусками виробництва етилену через нестабільне енергопостачання. Пускові операції супроводжуються інтенсивним спалюванням некондиційної сировини на факелах, що генерує викиди дрібнодисперсної сажі (PM_{2.5}). Тоді як у періоди температурних інверсій (осінь–зима), навіть при знижених викидах, забруднюючі речовини накопичуються у приземному шарі, створюючи ефект «хімічного смогу».

Аналіз даних станцій громадського моніторингу (м. Калуш, вул. Хіміків, ID станції 1488) показує, що офіційна статистика, яка базується на усередненні, згладжує пікові навантаження. Датчики фіксували короткочасні (1–2 години) стрибки концентрації PM_{2.5} до 80–120 мкг/м³ (перевищення норми ВООЗ у 5–8 разів) у нічний час. Ймовірно, це пов'язано з нічними технологічними продувками систем або вітровим підйомом пилу з сухих карт хвостосховищ, які не звожуються належним чином під час простою.

Аналіз карт аерозольної оптичної товщини над Калуським районом виявив локальну аномалію з середнім значенням 0,4–0,5 (при фоні Карпатського регіону 0,1–0,15). Позитивні значення індексу поглинання аерозолів над промзоною «Карпатнафтохім» вказують на наявність поглинаючих аерозолів (сажі/black carbon), що корелює з даними про роботу факельних систем. У квітні 2024 року зафіксовано різке зростання

аерозольної оптичної товщини до 1,5, що було спричинено перенесенням пилу з Сахари. Однак, супутниковий аналіз дозволив відокремити цей регіональний фон від локального шлейфу заводу, який має чітку прив'язку до рози вітрів (південно-східний напрямок переносу на житлові масиви).

Супутник Sentinel-5P [30] зафіксував підвищені концентрації формальдегіду у тропосферному стовпі над Калушем – до 150 мкмоль/м². Формальдегід є специфічним забруднювачем для виробництва смол та полімерів. Його наявність у повітрі підтверджує активність джерел викидів навіть у періоди заявленого простою (ймовірно, випаровування з відстійників або неорганізовані викиди).

У період 2023–2024 рр. спостерігається зміна профілю забруднення: зниження валових викидів компенсується зростанням пікових навантажень сажі та дрібнодисперсного пилу через нестабільні режими роботи («пуск-зупинка») та використання генераторів.

3.3 Оцінка просторово-часових особливостей забруднення повітря за даними державного моніторингу та відкритих платформ

Враховуючи обмеженість мережі державних постів спостереження, у роботі застосовано комбінований підхід із залученням супутникових даних та громадського моніторингу.

У м. Черкаси функціонують стаціонарні пости, що здійснюють відбір проб 2–4 рази на добу. Дані агрегатора SaveEcoBot підтверджують кореляцію між напрямком вітру від промзони та показаннями датчиків у житлових кварталах. У м. Калуші державний моніторинг є фрагментарним. Використання даних громадських станцій (зокрема, EcoCity) дозволило виявити добову циклічність забруднення: зростання концентрації PM_{2.5} у вечірні години (19:00–22:00), що пов'язано з температурною інверсією та накопиченням автотранспортних і промислових викидів у низині.

Для оцінки транскордонного перенесення та фонового забруднення використано дані системи CAMS та сенсора TROPOMI [30]. Карти розподілу аерозольної оптичної товщини над Україною за 2024 рік демонструють аномалії над Черкаським промисловим вузлом, що свідчить про постійну наявність дрібнодисперсної фракції в атмосферному стовпі, навіть коли наземні пости не фіксують перевищень.

За даними звіту «European State of the Climate 2024», літо та рання осінь в Україні були аномально теплими та сухими [29]. Це призвело до явища ресуспензії (вторинного підйому) пилу з ґрунтів та золошламовідвалів, що чітко простежується на супутникових знімках у спектрі поглинання аерозолів.

Встановлено чітку сезонну диференціацію забруднення, зокрема у холодний період – домінування викидів від енергетики та утворення зимових смогів через слабе турбулентне перемішування (характерно для обох міст). У теплий період відбувається зростання концентрації пилу за рахунок конвективного підйому та фотохімічних реакцій (утворення вторинних аерозолів під дією сонячної радіації), що особливо характерно для центральних і південних районів.

Об'єкти дослідження розташовані в контрастних ландшафтних умовах, що вимагає диференційованого підходу до моделювання розсіювання викидів. Водний фактор у Черкасах та рельєф у Калуші виступають природними каталізаторами накопичення забруднень. Технологічні процеси на ПрАТ «Азот» та ТОВ «Карпатнафтохім» є джерелами специфічного пилу (аерозолі добрив та полімерний пил відповідно), який за хімічною природою і токсичністю відрізняється від звичайного міського пилу.

Офіційна статистика не відображає повної картини небезпеки через застарілу методологію обліку (відсутність вимірювань $PM_{10}/PM_{2.5}$). Дані міжнародних сервісів (CAMS, NASA) вказують на те, що навіть при зниженні виробничих потужностей у 2022–2025 роках рівень аерозольного забруднення залишається високим через вплив вторинних факторів та кліматичних змін.

Оцінку аерогенного навантаження на території України, базуючись на даних мережі спостережень національної гідрометеорологічної служби (120 стаціонарних постів у 35 містах), фахівцями ЦГО ім. Бориса Срезневського [22] оприлюднено зріз екологічної ситуації за січень–червень 2024 року (табл. 3.12). Структура забруднення атмосферного повітря за інтегральним показником ІЗА виглядає так:

- високий рівень ($KI_{ЗА} > 7$): спостерігався у 12 містах;
- підвищений рівень: відмічено у 6 містах;
- низький рівень: зафіксовано у 17 містах.

Таблиця 3.12 – Ранжування міст України за комплексним індексом забруднення атмосфери (ІЗА) за даними спостережень у 2024 році

№ з/п	Місто	ІЗА	№ з/п	Місто	ІЗА	№ з/п	Місто	ІЗА
1.	Кам'янське	13,9	13.	Суми	7,6	25.	Українка	3,8
2.	Дніпро	12,2	14.	Київ	7,5	26.	Олександрія	3,8
3.	Краматорськ*	11,3	15.	Ужгород	6,7	27.	Івано-Франківськ	3,4
4.	Кривий Ріг	11,2	16.	Миколаїв	6,2	28.	Бровари	3,3
5.	Львів	8,9	17.	Кременчук	5,6	29.	Світловодськ	3,3
6.	Луцьк	8,6	18.	Кропивницький	5,3	30.	Харків	3,2
7.	Одеса	8,6	19.	Полтава	5,3	31.	Обухів	3,2
8.	Запоріжжя	8,4	20.	Житомир	4,6	32.	Ізмаїл	3,0
9.	Вінниця	8,4	21.	Рівне	4,6	33.	Хмельницький	2,9
10.	Херсон	7,9	22.	Тернопіль	4,2	34.	Чернівці	1,9
11.	Слов'янськ*	7,8	23.	Біла Церква	4,0	35.	Горишні Плавні	1,8
12.	Черкаси	7,7	24.	Чернігів	3,8	36.	Калуш	1,8

Місто Черкаси посідає 12 місце із величиною ІЗА 7,7 (табл. 3.12), що відповідає підвищеному рівню техногенного навантаження. Напружена екологічна ситуація зумовлена діяльністю ПрАТ «Азот», щільною забудовою та інтенсивним трафіком.

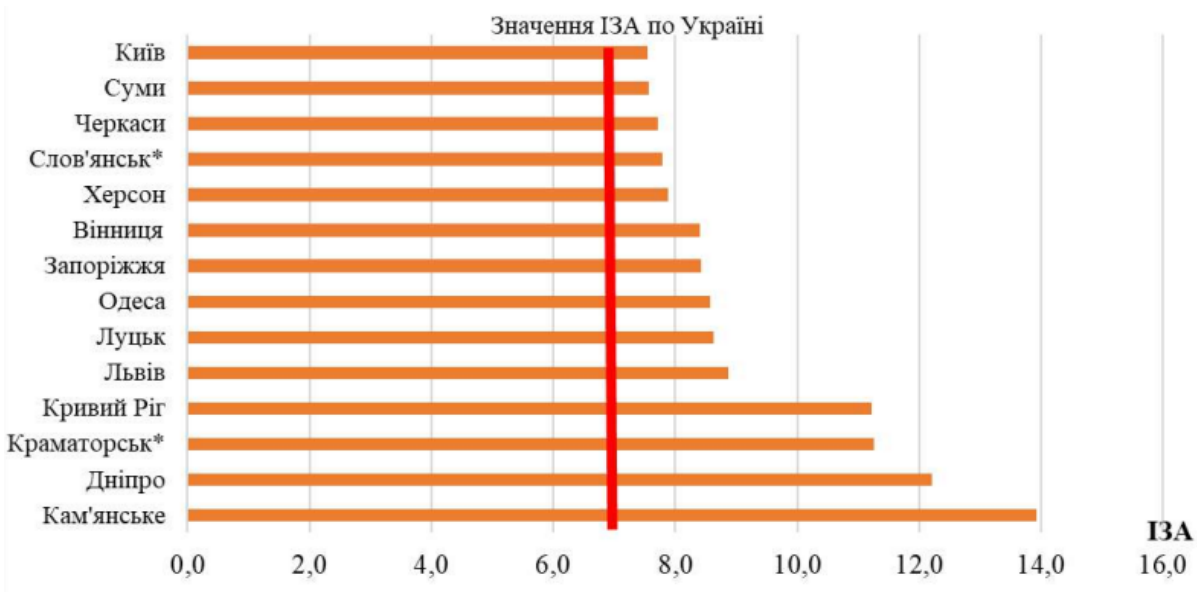


Рисунок 3.5 – Ранжування міст України з критичним станом повітряного басейну за величиною ІЗА (2024 р.)

У 2024 році домінуючим фактором забруднення став формальдегід (3,1 ГДК с.д.). Також зареєстровано перевищення нормативів по оксиду вуглецю на рівні 2,2 ГДК м.р. та аміаку (1,2 ГДК с.д.; 1,4 ГДК м.р.). Це підтверджує статус міста як одного з лідерів за рівнем газоподібного та аерозольного забруднення.

Місто Калуш посідає 36 місце з індексом 1,8, що є низьким рівнем забруднення атмосферного повітря порівняно з іншими містами країни. Це пояснюється різким зниженням обсягів роботи ТОВ «Карпатнафтохім» у 2020–2023 рр., відсутністю великих ТЕС та кращою природною аерацією (відкритий рельєф долин). Водночас низький ІЗА не означає відсутності локальних екологічних ризиків. Калуш характеризується специфічним забрудненням від полімерного пилу (ПВХ), чорного вуглецю, сольового пилу (NaCl) та пилу хвостосховищ. Цей вплив є місцевим та епізодичним, але залишається потенційно небезпечним для населення прилеглих територій.

3.4 Оцінка канцерогенних та неканцерогенних ризиків від впливу важких металів у складі аерозолів

В умовах інтенсивної урбанізації та функціонування потужних хімічних кластерів (на прикладі м. Черкаси та м. Калуш), традиційний гравіметричний контроль загальної маси пилу не дозволяє повною мірою оцінити загрозу для здоров'я населення. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, важкі метали в атмосферному повітрі перебувають переважно у формі твердих часток фракцій $PM_{2.5}$ та PM_{10} . Потрапляючи в організм інгаляційним шляхом, вони здатні до біоаккумуляції, викликаючи порушення клітинного гомеостазу, окислювальний стрес та нейротоксичність [19, 46].

За результатами комплексної оцінки ризиків для здоров'я населення, науковцями Оксаною Єгоровою та співавторами розраховані на основі ретроспективного аналізу концентрації Pb, Mn, Cr, Cu, Ni, Zn та Cd за період 2018–2024 років [41], що є репрезентативним для зон впливу хімічних виробництв України (рис. 3.6).

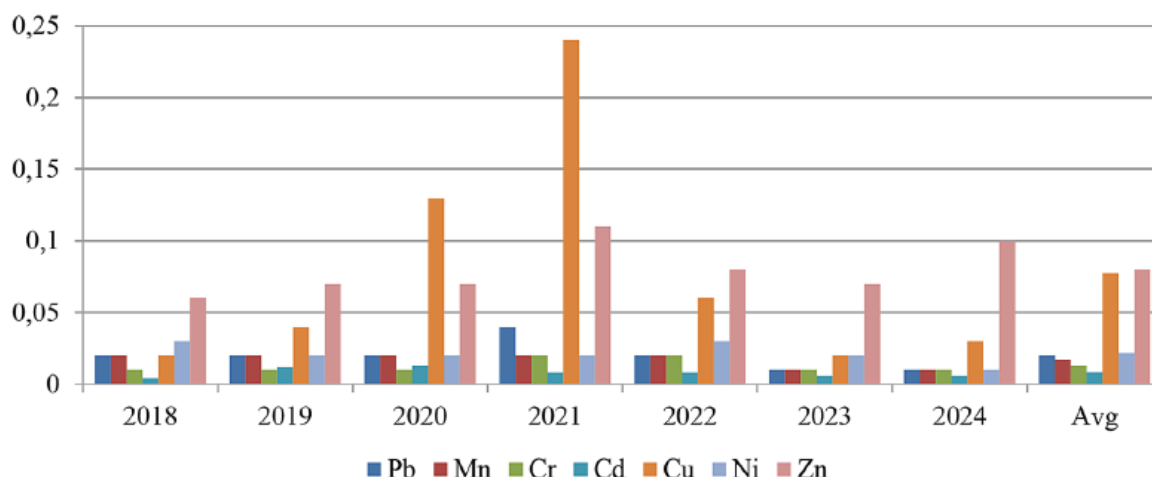


Рисунок 3.6 – Вміст важких металів в атмосферному повітрі м. Черкаси, мкг/м³ [41]

Науковцями встановлено, що просторовий розподіл концентрацій зазначених металів корелює з розміщенням двох ключових джерел емісії – ПрАТ «Азот» та Черкаської ТЕЦ. Внаслідок домінування північно-західних та південно-західних вітрів відбувається транспортування аерозольних і газових домішок безпосередньо в напрямку щільної житлової забудови.

Результати дослідження вмісту важких металів у фракціях пилу свідчать про критичну ситуацію для дитячого населення в зонах промислового впливу. Розрахунки показали, що сумарний індекс небезпеки (НІ) при хронічному інгаляційному надходженні металів для дітей становить 7,33, що класифікується як високий рівень ризику. Для дорослого населення цей показник становить 1,56 (помірний ризик) [41].

Таблиця 3.13 – Показники хронічного добового надходження (ADD), коефіцієнтів небезпеки (HQ) та індексу небезпеки (HI), розраховані на основі середніх концентрацій важких металів в атмосферному повітрі м. Черкаси за даними 2018–2024 рр. (за матеріалами Оксани Єгорової, Ольги Мислюк, Олени Хоменко та Віталія Постриганя)

Важкі метали	Середня концентрація (C_{Avg}), мг/м ³	Середня добова доза (ADD), діти	Середня добова доза (ADD), дорослі	Референтна концентрація (RfC), мг/м ³	Коефіцієнт небезпеки (HQ), діти	Коефіцієнт небезпеки (HQ), дорослі	Критичні органи та системи-мішені
Свинець (Pb)	0,00002	2,7E-05	5,8E-06	0,00015	0,18	0,04	ЦНС, кровоносна, ендокринна та репродуктивна системи
Марганець (Mn)	0,00002	2,3E-05	5,0E-06	0,00005	0,47	0,10	ЦНС, органи дихання
Хром (Cr)	0,00001	1,7E-05	3,7E-06	0,0001	0,17	0,04	Органи дихання, імунна система, ШКТ
Кадмій (Cd)	0,00001	1,1E-05	2,4E-06	0,00002	0,55	0,12	Органи дихання, ендокринна система
Мідь (Cu)	0,00008	1,0E-04	2,2E-05	0,00002	5,25	1,12	Органи дихання, системна дія
Нікель (Ni)	0,00002	2,9E-05	6,2E-06	0,00005	0,58	0,12	Органи дихання, кровоносна та імунна системи, ЦНС
Цинк (Zn)	0,00008	1,1E-04	2,3E-05	0,0009	0,12	0,03	Органи дихання, кровоносна та імунна системи
Сумарний ризик (HI)	—	—	—	—	7,33 (високий)	1,56 (помірний)	Органи дихання ($HI_{дит} = 7,14$), ЦНС ($HI_{дит} = 1,23$)

Примітка: жирним шрифтом виділено показники, що перевищують допустимий рівень ризику ($HQ > 1$)

Детальний аналіз коефіцієнтів небезпеки (HQ) дозволив виявити, що основним драйвером токсичного впливу є мідь. Для дитячого населення HQ_{Cu} сягає 5,25, що свідчить про високу ймовірність розвитку патологій дихальної системи. Внесок окремих металів у формування загального неканцерогенного ризику розподілився наступним чином: Cu (72%) > Ni (8%) = Cd (8%) > Mn (6%) > Cr (2%) = Pb (2%) = Zn (2%).

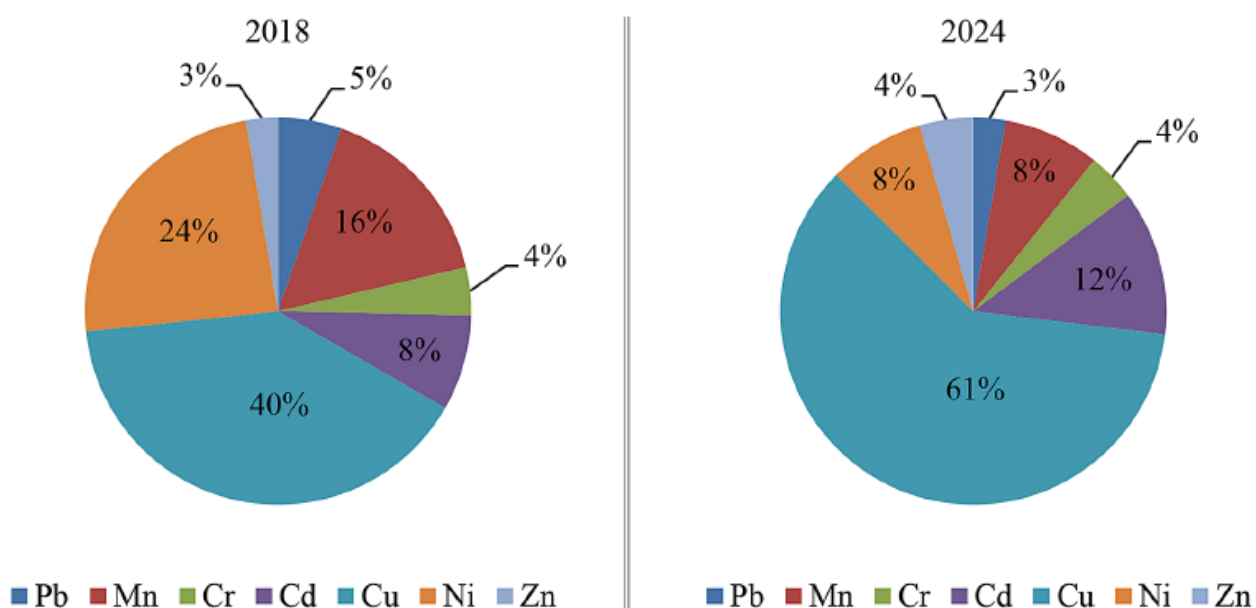


Рисунок 3.7 – Динаміка внеску важких металів у загальний кумулятивний неканцерогенний ризик (2018–2024 рр.) м. Черкаси [41]

Критично вразливими системами організму визначено:

- органи дихання: сумарний індекс НІ = 7,14 для дітей та 1,53 для дорослих;
- центральна нервова система: НІ = 1,23 для дітей. Особливу небезпеку становить синергічний ефект міді та цинку, які при спільній дії посилюють нейротоксичність, навіть якщо концентрації окремих елементів знаходяться в межах ГДК.

Важливо зазначити, що навіть у роки зі зниженим промисловим навантаженням (2018, 2023 рр.), коли концентрація міді становила $0,02 \text{ мкг/м}^3$, ризик для дітей залишався на неприйнятному рівні (НІ = 3,4), що підтверджує відсутність безпечного порогу дії для цих токсикантів у складі аерозолів.

Згідно з класифікацією Міжнародного агентства з вивчення раку, нікель, кадмій, свинець та шестивалентний хром є канцерогенами. Розрахунок сумарного канцерогенного ризику показав значення:

- $TCR_{діти} = 7,1 \times 10^{-5}$;
- $TCR_{дорослі} = 7,6 \times 10^{-5}$.

Хоча отримані значення знаходяться в межах прийняттого діапазону (від 10^{-6} до 10^{-4}), визначеного US EPA та національними стандартами. Проте аналіз структури ризику вказує на домінуючу роль хрому, частка якого становить 81–92% у загальному канцерогенному потенціалі аерозолів. Друге місце посідає кадмій (5–16%), третє – нікель (2–5%). Це вимагає впровадження специфічного моніторингу вмісту хрому в викидах хімічних та енергетичних підприємств.

Високий рівень забруднення аерозолями важких металів у досліджуваних урбосистемах має полігенетичну природу. Як зазначають науковці [3, 5, 41], окрім стаціонарних джерел (ПрАТ «Азот», ТЕЦ, ТОВ «Карпатнафтохім»), суттєвий внесок здійснюють мобільні джерела. Згідно з даними досліджень, значна частина міді та заліза надходить в атмосферу внаслідок стирання гальмівних колодок, тоді як цинк є маркером зносу автомобільних шин. Це підтверджує необхідність комплексного підходу до управління якістю повітря, що включає регулювання як промислових, так і транспортних потоків.

Таким чином, ПрАТ «Азот» ідентифіковано як одне з ключових джерел техногенного навантаження, що формує забруднення аерозолями важких металів. Виявлений високий рівень неканцерогенного ризику для дітей вимагає перегляду природоохоронних програм, зокрема впровадження високоефективних систем фільтрації дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ та комплексного регулювання промислових і транспортних потоків.

3.5 Екологічні ризики, пов'язані з трансформацією аерозольних частинок у хімічних промвузлах

Проблема забруднення атмосферного повітря у досліджуваних містах (Черкаси та Калуш) не обмежується лише прямими викидами твердих часток із джерел. Значна частка забруднення (до 40–60% маси $PM_{2.5}$) формується безпосередньо в атмосфері внаслідок фізико-хімічних реакцій між газоподібними прекурсорами (SO_2 , NO_x , NH_3 , леткими органічними сполуками).

Згідно з класифікацією Європейського агентства з довкілля та методологією EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023), виділяють два типи аерозолів:

1. аерозолі дезінтеграції (первинні), які утворюються при механічному подрібненні твердих матеріалів (транспортування та пересипка сировини й добрив, знос обладнання, дроблення, сушіння, фасування). Вони переважають у фракції PM_{10} ;
2. аерозолі конденсації (вторинні) – формуються шляхом нуклеації (перехід «газ $\rightarrow$ частинка») та подальшої коагуляції продуктів газозфазних реакцій. Саме вони становлять основну частку дрібнодисперсної фракції $PM_{2.5}$ та ультрадисперсних частинок ($PM_{0.1}$), які становлять найбільшу загрозу для здоров'я згідно з рекомендаціями ВООЗ [46].

У контексті підприємств азотної хімії (ПрАТ «Азот») ключову роль у формуванні вторинних аерозолів відіграє взаємодія аміаку з кислотними оксидами, насамперед продуктами окиснення SO_2 та NO_x .

Специфікою Черкаського промвузла є поєднання потужних джерел емісії аміаку та оксидів азоту на фоні підвищеної вологості повітря зумовленої близькістю Кременчуцького водосховища. Таке поєднання створює своєрідний «атмосферний хімічний реактор» для інтенсивного утворення амонійних солей, які виступають основними компонентами вторинних неорганічних аерозолів.

Нітрат амонію (NH_4NO_3) є основним компонентом вторинного аерозолу в зоні впливу підприємства. Процес його утворення проходить у кілька стадій:

1. окиснення діоксиду азоту відбувається внаслідок викидів NO_x від енерготехнологічних агрегатів під дією гідроксил-радикалів (OH) та озону (O_3) в денний час окислюються до азотної кислоти (HNO_3);

2. нейтралізація аміаком. Газоподібна азотна кислота вступає в оборотну реакцію з аміаком, який присутній в атмосфері через витоки з технологічного обладнання цехів аміаку та карбаміду, з утворенням амоній нітрату (NH_4NO_3).

Ключовою термодинамічною особливістю цього процесу є його температурна та вологісна залежність. За низьких температур (зимовий та перехідні сезони) й високої відносної вологості рівновага зміщується у бік утворення твердої фази – дрібнодисперсного аерозолі. Влітку, за підвищених температур, нітрат амонію частково дисоціює з поверненням у газову фазу. Саме цим пояснюються часті спостереження в холодний період року в Черкасах характерних «білих серпанків», які в дійсності є не водяним туманом, а аерозольною хмарою амонійних солей.

Паралельно з нітратами у викидах присутні оксиди сірки, що утворюються при спалюванні палива. Аміак реагує з продуктами окиснення сірки швидше і незворотно, утворюючи сульфат амонію.

Частинки $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ та NH_4NO_3 відзначаються високою гігроскопічністю. Досягнувши критичних значень відносної вологості, вони інтенсивно поглинають водяну пару, збільшуючись у розмірах із субмікронного діапазону ($\sim 0,1$ мкм) до 1,0–2,5 мкм. Це переводить їх в оптично активний стан (розсіювання світла), що погіршує видимість і підвищує їх здатність проникати в альвеоли легень людини.

Окремим джерелом аерозольних частинок є викиди від грануляційних башт карбаміду ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), які формують переважно первинний аерозоль органічної природи. Пил карбаміду, взаємодіючи з атмосферними окисниками, потенційно може виступати прекурсором утворення ізоціанової кислоти (HNCO) – високотоксичної сполуки, однак цей механізм потребує додаткових цілеспрямованих інструментальних досліджень в умовах Черкаського промвузла.

У Калуській промисловій агломерації виробничий цикл ТОВ «Карпатнафтохім» базується на піролізі вуглеводневої сировини та подальшій полімеризації, що зумовлює принципово інший морфологічний та хімічний профіль аерозолів порівняно з Черкасами. Тут домінують гідрофобні органічні частинки та сажистий аерозоль.

Під час сушіння та фасування суспензійного полівінілхлориду в атмосферу надходить дрібнодисперсний полімерний пил. До його ключових фізико-хімічних характеристик належать:

- частинки ПВХ є діелектриками та легко електризуються (трибоелектричний ефект), що сприяє їх агрегації у більші конгломерати. Такі агрегати, з одного боку, швидше осідають у безпосередній близькості до підприємства, а з іншого – налипають на поверхні рослин, ґрунту, будівель, формуючи стійкі полімерні плівки;

- поверхня частинок ПВХ здатна адсорбувати залишковий мономер вінілхлориду (C_2H_3Cl), який класифікований Міжнародним агентством з вивчення раку (IARC) як канцероген для людини (Група 1) [46]. У такому випадку відносно інертний полімерний пил перетворюється на носій високотоксичного хімічного агента.

Експлуатація піролізних установок і факельних систем супроводжується інтенсивними викидами сажі (елементарного вуглецю, Black Carbon – BC), яка утворюється внаслідок неповного згоряння вуглеводнів. Для Калуського регіону сажа має подвійну екологічну роль:

- з точки зору кліматичних впливів – частинки сажі ефективно поглинають сонячну радіацію, спричиняючи локальний позитивний радіаційний форсинг і потенційне посилення прогріву приземного шару атмосфери;

- з точки зору токсикології – сажа має велику питому поверхню та слугує субстратом для сорбції поліциклічних ароматичних вуглеводнів, зокрема бенз(а)пірену, що утворюється при тих самих високотемпературних процесах горіння.

Додатковою особливістю Калуського вузла є наявність хлору в технологічному циклі. За участі хлоровмісних сполук в атмосфері можуть утворюватися радикали $Cl\cdot$, які є значно активнішими окисниками для летких органічних сполук, ніж гідроксил-радикали $OH\cdot$. Це потенційно пришвидшує формування приземного озону та вторинних органічних аерозолів, що частково підтверджується епізодичними даними регіонального моніторингу.

3.6 Розробка комплексу природоохоронних заходів для зниження техногенного навантаження

На основі проведеного аналізу фізико-хімічних властивостей аерозолів та специфіки їх утворення у Черкаському та Калуському промислових вузлах, розроблено диференційовані рекомендації. Аналіз технологічних регламентів засвідчив, що наявні системи очистки (переважно циклонного типу або застарілі скрубери) не забезпечують достатньої ефективності щодо вилучення дрібнодисперсних фракцій ($PM_{2.5}$) та специфічних хімічних аерозолів. Тому запропоновані заходи базуються на принципах найкращих доступних технологій, визначених у довідкових документах ЄС для хімічної промисловості.

Як встановлено у ході дослідження, основною проблемою ПрАТ «Азот» є не стільки первинний грубодисперсний пил, скільки дрібнодисперсні аерозолі аміачної селітри та карбаміду (субмікронні частинки), що формують стійкі тумани, а також газоподібні прекурсори (NH_3 , NO_x). Для мінімізації їх впливу пропонується реалізація таких заходів:

1. впровадження високоефективних волокнистих туманоуловлювачів. На стадіях грануляції та випарювання замість стандартних скруберів доцільно застосувати фільтри з механізмом броунівської дифузії. Вони забезпечують вилучення частинок розміром <1 мкм з ефективністю до 99,9%, що дозволить усунути ефект «сизого хвоста» (туману) над грануляційними вежами;

2. термостабілізація викидів є необхідною умовою для запобігання термічній дисоціації нітрату амонію у літній період, що призводить до переходу аерозолу в токсичні гази. Для цього необхідно впровадити системи охолодження відхідних газів перед їх викидом в атмосферу, що знизить утворення вторинних токсикантів (NH_3 , HNO_3);

3. рекуперація пилу. Реалізація заходу здійснюється шляхом встановлення систем повернення пилу у технологічний процес. Розчин, отриманий після промивки газів у скруберах, має повертатися на стадію випарювання, що одночасно зменшує втрати готового продукту та знижує навантаження на очисні споруди;

4. для зменшення утворення вторинних нітратів в атмосфері критично важливим є контроль співвідношення NH_3/NO_x . Впровадження технологій

селективного каталітичного відновлення на агрегатах виробництва азотної кислоти дозволить знизити викиди оксидів азоту до рівнів $< 50 \text{ мг/м}^3$.

Важливо зазначити, що специфікою роботи ТОВ «Карпатнафтохім» є емісія гідрофобного полімерного пилу, мікропластику та сажі (чорного вуглецю) від процесів горіння. Саме тому, пріоритетними природоохоронними заходами є:

- впровадження програми «Operation Clean Sweep» – це міжнародна ініціатива щодо досягнення «нульових втрат» пластикових гранул. Заходи передбачають встановлення герметичних систем на вузлах завантаження полімеру (шлюзові живильники, телескопічні рукави), застосування локальних рукавних фільтрів тонкого очищення на лініях пневмотранспорту, а також облаштування пасток у зливовій каналізації для запобігання потраплянню мікропластику у річкові екосистеми;

- оптимізувати факельні системи для зменшення викидів сажі (носія канцерогенів) під час пускових операцій та аварійних зупинок, необхідно модернізувати оголовки факелів системами подачі пари, що забезпечить повне бездимне згоряння вуглеводнів. Альтернативним рішенням є впровадження систем повернення факельних газів у паливну мережу підприємства;

- враховуючи сезонність вітрового підйому пилу на сухих картах шламонакопичувачів, рекомендується застосування зв'язуючих реагентів (полімерних емульсій або бішофіту). Вони утворюють на поверхні ґрунту стійку кірку, що запобігає ерозії, але не перешкоджає природному випаровуванню вологи.

Існуюча система державного моніторингу (пости Гідрометцентру) базується переважно на контролі валового пилу, що є недостатнім для оперативної оцінки токсикологічних ризиків. Тому пропонується перехід до гібридної ризик-орієнтованої моделі спостереження:

1. встановлення автоматизованих систем моніторингу на джерелах. Згідно з вимогами Закону № 3855-IX, ключові джерела (грануляційні вежі, димові труби печей піролізу) мають бути обладнані оптичними пиломірами, що передають дані в режимі реального часу.

2. моніторинг прекурсорів, насамперед для м. Черкаси критично важливим є впровадження безперервного вимірювання не лише пилу $\text{PM}_{2.5}$, а

й аміаку та кислотних газів, оскільки стандартний гравіметричний метод занижує показники через випаровування нітрату амонію з фільтрів у теплий період року;

3. інтеграція супутникових даних, зокрема розробка регіонального алгоритму перерахунку даних аерозольної оптичної товщини із супутника Sentinel-5P (прилад TROPOMI) у приземні концентрації PM_{2.5} з урахуванням коефіцієнтів вологості (для Черкас) та типу аерозолі (для Калуша), що дозволить компенсувати відсутність наземних постів у віддалених районах.

Враховуючи близькість житлової забудови до промислових зон в обох містах, технологічних заходів може бути недостатньо для ефективного захисту населення. Оскільки значна частина забруднення (важкі метали, сажа) формується кумулятивним впливом промисловості та автотранспорту, необхідний комплексний підхід до управління міським середовищем. Саме тому пропонується створення біогеохімічних бар'єрів:

- у Черкасах – висадка деревних порід із високою газопоглинальною здатністю щодо аміаку та оксидів азоту (клен гостролистий, тополя чорна, робінія). Доцільно формувати багаторусні насадження, що сприяють вертикальному перемішуванню повітряних мас («провітрюванню»), а не їх застою;

- у Калуші потрібно врахувати, що пил має тенденцію до акумуляції в низинах, санітарно-захисна зона має формуватися як щільний фільтруючий бар'єр (хвойні породи – ялина, туя), здатний механічно затримувати тверді частинки сажі та полімерного пилу упродовж року;

- створення буферних зелених зон (в'яз, липа) навколо дитячих дошкільних та навчальних закладів для зниження інгаляційного впливу металів;

- в умовах щільної забудови рекомендовано використання «зелених дахів» та вертикального озеленення на фасадах будівель, орієнтованих у бік промислових майданчиків. Це слугує додатковим пилоосаджувачем та дозволяє знизити локальні концентрації PM₁₀ до 30% на локальному рівні.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

4.1 Аналіз стану промислової безпеки та гігієни праці на підприємствах хімічного комплексу

Забезпечення безпечних умов праці на підприємствах хімічної та переробної промисловості є пріоритетним завданням, оскільки специфіка виробничих процесів у цій галузі пов'язана з постійним впливом комплексу шкідливих і небезпечних факторів на організм працюючих. Згідно з чинним законодавством України, зокрема Законом «Про охорону праці» та міжнародним стандартом ДСТУ EN ISO 45001:2019, організація трудової діяльності на об'єктах хімічного комплексу вимагає систематичного аналізу ризиків та впровадження превентивних заходів. На підприємствах, що спеціалізуються на переробці сировини з високим рівнем пилоутворення, стан промислової безпеки визначається рівнем герметизації технологічного обладнання, ефективністю систем аспірації та суворим дотриманням регламентів роботи з токсичними речовинами.

Основним шкідливим виробничим фактором у зонах хімічних і переробних виробництв є промисловий пил, який за своєю природою є аерозолем переважно фіброгенної дії. Аналіз гігієнічних умов праці свідчить, що дрібнодисперсні фракції пилу (PM2.5 та PM10) становлять найбільшу загрозу, оскільки здатні проникати глибоко в респіраторну систему, викликаючи професійні захворювання, такі як пневмоконіози, хронічні обструктивні хвороби легень та специфічні інтоксикації залежно від хімічного складу пилу. Окрім хімічного впливу, персонал піддається дії фізичних факторів, серед яких провідне місце посідають підвищений рівень шуму від роботи подрібнювального та вентиляційного обладнання, вібрація, а також несприятливий мікроклімат у цехах, де процеси сушіння або термічної обробки супроводжуються значними тепловиділеннями.

Оцінка стану промислової безпеки на сучасних етапах розвитку галузі

(2024–2025 рр.) вказує на те, що попри впровадження автоматизованих систем управління, на багатьох підприємствах залишається актуальною проблема фізичного зносу основних фондів. Це призводить до порушення щільності з'єднань у вузлах пересипки сировини та пакувальних лініях, що стає причиною перевищення ГДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Особливу небезпеку становить вибухопожежна загроза, оскільки пил багатьох хімічних сполук та полімерів у завислому стані здатний утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні суміші. Нижня концентраційна межа поширення полум'я для таких сумішей часто досягається при аварійних зупинках вентиляційних систем, що вимагає застосування спеціалізованого обладнання у вибухозахищеному виконанні та встановлення систем автоматичного пожежогасіння.

Додатковим фактором, що впливає на стан безпеки праці в умовах сьогодення, є ризики, зумовлені воєнним станом та загрозою транскордонних і локальних техногенних аварій. Руйнування інфраструктури або перебої в енергопостачанні можуть призвести до миттєвого відключення очисних споруд, що спричиняє неконтрольований викид пилових часток як у виробничі приміщення, так і в навколишнє природне середовище. У зв'язку з цим, аналіз стану охорони праці вимагає врахування не лише стаціонарних режимів роботи, а й сценаріїв раптового виникнення надзвичайних ситуацій. Психофізіологічне навантаження на персонал також зростає через необхідність роботи в умовах підвищеної відповідальності та потенційної небезпеки, що потребує вдосконалення методів професійного добору та медико-профілактичного супроводу працівників.

Таким чином, проведений аналіз стану промислової безпеки та гігієни праці підтверджує, що пиловий фактор залишається критичним чинником техногенного навантаження. Необхідність модернізації систем колективного захисту, впровадження інтелектуальних систем моніторингу робочої зони та актуалізація планів реагування на надзвичайні ситуації є ключовими напрямками для зниження рівня виробничого травматизму та професійної

захворюваності на підприємствах хімічного і переробного комплексу.

4.2 Комплексні заходи з мінімізації впливу пилового фактора та забезпечення пожежної безпеки

Розробка та впровадження комплексних заходів із мінімізації впливу пилового фактора на хімічних і переробних виробництвах є критично важливою умовою для зниження професійних ризиків та запобігання техногенним аваріям. Основу технічних рішень становить концепція багатобар'єрного захисту, яка починається з герметизації технологічного обладнання. Використання сучасних ущільнювальних матеріалів, встановлення герметичних кожухів на конвеєрних стрічках та застосування вакуумних систем завантаження сировини дозволяють локалізувати пилоутворення безпосередньо в місці його виникнення, запобігаючи поширенню дрібнодисперсних часток у об'єм робочої зони. Для ефективного видалення залишкових концентрацій пилу обов'язковим є проектування та експлуатація систем місцевої витяжної вентиляції (аспірації), оснащених високоефективними фільтрами. Станом на 2025 рік найбільш доцільним для хімічної галузі є використання двоступеневих систем очищення, де на першому етапі застосовуються циклони для вловлювання грубої фракції, а на другому – рукавні фільтри з імпульсним очищенням або електрофільтри, що забезпечують ефективність очищення до 99,9% для часток класу PM10 та PM2.5.

Важливою складовою гігієни праці є впровадження інтелектуальних систем моніторингу повітряного середовища в режимі реального часу. Встановлення мережі стаціонарних датчиків, інтегрованих у загальнозаводську систему управління, дозволяє автоматично регулювати потужність вентиляційних установок залежно від фактичної концентрації пилу, що не лише гарантує дотримання ГДК, а й оптимізує енергоспоживання підприємства. У випадках, коли технічних засобів колективного захисту недостатньо для повного усунення шкідливого впливу,

обов'язковим є застосування засобів індивідуального захисту органів дихання. Відповідно до стандартів ДСТУ EN 149, персонал має забезпечуватися респіраторами класу захисту не нижче FFP2 або FFP3, що мають низький опір диханню та високу сорбційну здатність. Організаційні заходи при цьому включають впровадження графіків обов'язкового вологого прибирання виробничих приміщень із використанням промислових пиłosосів у вибухозахищеному виконанні, що виключає повторне підняття осілого пилу в повітря.

Забезпечення пожежної безпеки в умовах високої запиленості вимагає особливого підходу через вибухонебезпечні властивості багатьох хімічних аерозолей. Оскільки пилоповітряні суміші можуть детонувати від мінімального джерела енергії, комплекс заходів включає встановлення систем виявлення та гасіння іскор у вентиляційних каналах, а також використання обладнання з маркуванням АTEX, що виключає можливість іскроутворення при механічному терті або короткому замиканні. Для запобігання руйнуванню будівель у разі можливого вибуху пилу в бункерах або фільтрах передбачається встановлення вибухорозрядних панелей (мембран), що спрямовують енергію вибуху в безпечну зону. Система протипожежного захисту повинна бути доукомплектована автоматичними установками пожежогасіння тонкорозпиленою водою або інертними газами, які є найбільш ефективними для ліквідації загорянь пилоподібних матеріалів.

Окрему увагу в 2025 році приділяється автономності систем безпеки. Враховуючи можливі перебої в енергопостачанні, критично важливе обладнання – аспіраційні установки в зонах із токсичним пилом та системи пожежної сигналізації — повинно мати резервне живлення від джерел безперебійного живлення або генераторів. Поєднання інженерних рішень із цифровим контролем та суворим адміністративним регламентом дозволяє створити безпечне робоче середовище, мінімізувати техногенне навантаження на навколишнє середовище через зменшення аварійних викидів та забезпечити відповідність підприємства сучасним екологічним і

безпековим стандартам.

4.3 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій

Забезпечення безпеки населення, що проживає в зонах впливу хімічних і переробних виробництв, є пріоритетним напрямком державної політики у сфері цивільного захисту. Враховуючи специфіку об'єктів дослідження, основними джерелами техногенної небезпеки є аварійні ситуації, що супроводжуються раптовим викидом значних мас токсичного пилу або хімічно небезпечних речовин (ХНР) в атмосферне повітря. Організація захисту населення у 2025 році базується на комплексному підході, що поєднує інженерно-технічні заходи, оперативне оповіщення та підготовку цивільних осіб до дій в умовах хімічної загрози, згідно з вимогами Кодексу цивільного захисту України.

Першочерговим елементом захисту є функціонування автоматизованих систем раннього виявлення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення. Сучасні системи інтегрують датчики екологічного моніторингу підприємства з регіональними мережами цивільного захисту, що дозволяє у разі аварії негайно активувати засоби масового інформування: вуличні гучномовці, мобільні додатки та системи екстреного мовлення. В умовах 2025 року особлива увага приділяється цифровізації оповіщення, де інформація про напрямок руху хімічної хмари (зокрема пилового шлейфу) та межі зон можливого зараження передається мешканцям у режимі реального часу з чіткими інструкціями щодо напрямку евакуації.

Інженерний захист населення передбачає використання захисних споруд цивільного захисту, які повинні бути приведені у готовність до прийому людей у найкоротші терміни. Для зон хімічного ризику критично важливим є оснащення сховищ системами фільтровентиляції, здатними очищувати повітря від дрібнодисперсного пилу та специфічних хімічних агентів. У разі відсутності можливості швидкого переходу до сховищ, населення інформується про правила «герметизації приміщень» (укриття у квартирах чи

офісах із заклеюванням вікон та вентиляційних отворів), що є ефективним тимчасовим заходом при короткочасних викидах пилоподібних речовин.

Евакуаційні заходи при загрозі поширення хімічного зараження мають свої особливості: маршрути виведення населення плануються перпендикулярно до напрямку вітру з урахуванням рельєфу місцевості, оскільки пилові маси та важкі гази схильні накопичуватися у низинах. У 2025 році евакуаційні плани обов'язково коригуються з урахуванням поточної оперативної обстановки та цілісності транспортної інфраструктури. Паралельно з організованою евакуацією здійснюється забезпечення населення засобами індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Для захисту від промислового пилу та багатьох видів ХНР найефективнішими є промислові протигази з відповідними фільтруючими коробками або, як мінімум, ватно-марлеві пов'язки, змочені нейтралізуючими розчинами (соди або лимонної кислоти), що дозволяє суттєво знизити дозу інгалаційного опромінення токсикантами.

Медичний захист в умовах надзвичайної ситуації включає створення резервів антидотів та засобів надання першої допомоги безпосередньо в зонах потенційного ризику. Окремим аспектом у 2025 році є психологічна стійкість населення, що досягається шляхом регулярних тренувань та розповсюдження лаконічних алгоритмів дій у кризових ситуаціях. Таким чином, лише системна взаємодія між суб'єктами господарювання, органами ДСНС та місцевими громадами дозволяє мінімізувати наслідки техногенних аварій, забезпечуючи високий рівень безпеки цивільного населення в умовах ризику аварійного викиду шкідливих речовин.

ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження встановлено, що ПрАТ «Азот» (м. Черкаси) та ТОВ «Карпатнафтохім» (м. Калуш) є визначальними джерелами техногенного навантаження на атмосферне повітря відповідних промислових агломерацій. Виявлено, що їхній аерозольний профіль суттєво різниться: у Черкасах домінують неорганічні та гігроскопічні частинки (насамперед NH_4NO_3 і $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), тоді як у Калуші переважає полімерний та вуглецевий аерозоль (полівінілхлоридний пил, мікропластик, сажисті частинки).

Проаналізовано механізми вторинного аерозолоутворення й встановлено, що у Черкасах ключову роль відіграють реакції між оксидами азоту та аміаком у поєднанні з підвищеною вологістю повітря від Кременчуцького водосховища. Це сприяє інтенсивному утворенню дрібнодисперсних амонійних солей, які формують до 60 % маси $\text{PM}_{2.5}$ у холодний період року. Для Калуша з'ясовано, що улоговинний рельєф та часті температурні інверсії блокують розсіювання викидів, що призводить до періодичних піків забруднення полімерним та вуглецевим пилом.

Досліджено поведінку дрібнодисперсних частинок і встановлено, що основну масу забруднення у житлових районах (радіус > 2 км від джерел) становлять частинки $\text{PM}_{2.5}$ та менше. Через надзвичайно низьку швидкість їх осадження ($< 0,1$ см/с) домінуючим механізмом очищення повітря є атмосферні опади. У посушливий 2024 рік це спричинило кумулятивне накопичення пилу у приземному шарі.

За даними автоматизованого моніторингу, у зимовий період 2024 року концентрації $\text{PM}_{2.5}$ у Черкасах становили 45–60 мкг/м^3 , що у 3–4 рази перевищувало рекомендації ВООЗ. У Калуші в періоди штилю концентрації PM_{10} досягали 70–90 мкг/м^3 , що підтверджує високу повторюваність смогових явищ унаслідок рельєфних особливостей території.

Виявлено приховані аномалії забруднення за даними супутникового моніторингу Sentinel-5P/TROPOMI та CAMS. Установлено, що над

промисловими зонами Черкас і Калуша аерозольна оптична товщина збільшувалась до 0,4–0,5, навіть у періоди офіційно задекларованого зниження виробничої активності. Для Калуша встановлено, що режими «пуск–зупинка» на підприємстві супроводжуються піковими викидами сажі та формальдегіду – до 150 мкмоль/м² у тропосферному стовпі.

Проаналізовано технологічні процеси ПрАТ «Азот» і визначено, що середня масова концентрація пилу на виході з грануляційних веж без очищення сягає 150–200 мг/м³. Для ТОВ «Карпатнафтохім» підтверджено, що пил полівінілхлориду та сажа є носіями канцерогенних сполук, здатних адсорбувати поверхнево-активні речовини і транспортувати їх на значні відстані.

На основі одержаних результатів обґрунтовано комплекс природоохоронних заходів відповідно до принципів найкращих доступних технологій: для ПрАТ «Азот» – впровадження волокнистих фільтрів-туманоуловлювачів з ефективністю 99,9% для часток <1 мкм та оптимізація температурного режиму агрегатів для зменшення утворення NO_x, заходи з мінімізації витоків NH₃. Для ТОВ «Карпатнафтохім» – реалізація програми «Operation Clean Sweep» для герметизації вузлів пересипки ПВХ (мінімізація мікропластику) та модернізація факельних систем паровим інжектуванням для повного спалювання сажі. Для урбанізованих територій – створення багаторівневих фітобар'єрів, здатних знизити локальні концентрації пилу на 30%, та перехід до автоматизованого моніторингу специфічних прекурсорів вторинних аерозолів і металовмісного пилу.

Таким чином, встановлено, що формування аерозольного навантаження у Черкасах та Калуші відбувається за принципово різними сценаріями, зумовленими технологічними, кліматичними та орографічними чинниками. Отримані результати підтверджують необхідність диференційованого підходу до управління атмосферним повітрям у зонах хімічного і переробного виробництва та впровадження сучасних ризик-орієнтованих методів екологічної безпеки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Адаменко С.Я., Архипова Л.М. Дослідження закономірностей змін $PM_{2,5}$ та PM_{10} в атмосферному повітрі Прикарпаття. Екологічна безпека та природокористування, вип. 3 (51), 2024. С. 47-58.
2. Аналіз потенційного впливу впровадження Директиви 2010/75 про промислові викиди в енергетичному секторі України. Київ: ГО “ДІКСІ ГРУП”. 2022. 216 с. URL: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/11/dixi-dozvil-report-main-17.11.pdf>
3. Аналітична оцінка ситуації у хімічній промисловості України та на внутрішньому товарному ринку хімічної продукції за підсумками січня-вересня 2023 р. ДП «Черкаський НДІТЕХІМ». Черкаси, 2023. 34 с.
4. Бондар О. І., Боголюбов В. М., Мальований М. С. Техноекологія: навч. посіб. Херсон: Олді-плюс, 2011. 314 с.
5. Гончаренко Т. П., Жицька Л. І. Екологічна оцінка впливу на довкілля підприємств хімічної галузі на прикладі ПАТ «Азот» (м. Черкаси). Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2013 (78). С. 114-119.
6. Гринчишин Н.М. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок ($PM_{2,5}$) у містах України в умовах карантину та воєнного стану. Вісник ЛДУБЖД. № 27. 2023. С. 6-15. DOI: [10.32447/20784643.27.2023.01](https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.01)
7. Державна служба статистики України. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
8. ДСТУ 7738:2015 «Безпека екологічна та техногенна. Терміни та визначення понять»
9. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992. Поточна редакція від 08.08.2025., № 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
10. Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2003. Поточна редакція від 08.11.2024, 3993-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text>
11. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 26.06.91. Поточна редакція від 08.08.2025, 3855-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
12. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>

13. Закон України «Про управління відходами» № 2849-IX від 13.12.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
14. Звіти діяльності Головного управління статистики в Івано-Франківській області за 2021-2024 роки. <https://www.ifstat.gov.ua/>
15. Звіти діяльності Головного управління статистики у Черкаській області за 2021-2024 роки. <https://www.ck.ukrstat.gov.ua/>
16. Ляховська О.В. Виробники мінеральних добрив в Україні: проблеми та перспективи їхньої діяльності. *Економіка і суспільство*. Мукачівський державний університет. 2018. Випуск 19. С. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2018-19-27>
17. Міністерство енергетики України. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. 2024. URL: <https://mev.gov.ua/>
18. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти за 2020-2024 рр. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/ekologichni-pasporty/>
19. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Інформація щодо стану якості атмосферного повітря в Україні (за даними Державної санітарно-епідеміологічної служби та інших джерел). 2024. URL: <https://mepr.gov.ua/>
20. Столяренко Г. С. Редокс-системи синтезу та використання кисневмісних радикалів / М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : Вертикаль, 2023. 608 с.
21. Хандогіна О.В., Дрозд О.М., Дядін Д.В. Аналіз проведення стратегічної екологічної оцінки регіональних планів управління відходами. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 2 (47). С. 232–241. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.38>
22. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України у 2024 році. Київ, 2025. 58 с. URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/>
23. Шкала індексу якості повітря (AQI) та кольорова легенда. <https://aqicn.org/scale/uk/>
24. Яцишин Т. М., Орфанова М. М., Стельмахович Г. Д., Яковина О. В. та ін. Дослідження вразливості міських територій до змін клімату на прикладі міста Калуш. *Науково-технічний журнал: Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. № 1 (21) 2020. С. 22-29. DOI: 10.31471/2415-3184-

2020-1(21)-22-30.

25. Air quality in Europe 2024: Report. *European Environment Agency*. 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2024>
26. Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI). <http://www.aqicn.org/>
27. Ali M.U., Liu G., Yousaf B. et al. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ Geochem Health*. 2019. Vol. 41. P. 1131–1162. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-018-0203-z>
28. Calderón-Garcidueñas L, Stommel EW, Rajkumar RP, et al. Particulate air pollution and risk of neuropsychiatric outcomes. What we breathe, swallow, and put on our skin matters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol18, No.21. 11568. doi:[10.3390/ijerph1821115687](https://doi.org/10.3390/ijerph1821115687).
29. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
30. Copernicus Sentinel-5P / TROPOMI. Tropospheric NO₂ and SO₂ data over Ukraine. 2024. Дані доступні через Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>
31. Europe's air quality status 2022. European Environment Agency: website. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022>
32. Exceedance of air quality standards in Europe. European Environment Agency: website, URL: <https://www.eea.europa.eu/ims/exceedance-of-air-quality-standards>
33. Data on global air pollutant concentrations. Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS). 2024. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/>
34. Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. European Commission. 2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>
35. International Energy Agency (2024), CO₂ Emissions in 2023, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
36. KARPATNAFTOCHIM. <http://www.knh.com.ua/uk/vyrobnytstvo1/>
37. Liu C., Chen R., Sera F., et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *The New England Journal of Medicine*. 2019. Vol. 381, № 8. P. 705–715. doi.org/10.1056/NEJMoa18173646.

38. Monitoring air pollution from space. *European Space Agency*. Copernicus Sentinel-5P. 2024. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
39. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *International Energy Agency: special report*. 2021. (Interactive: [iea.li/nzeroadmap](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/05/net-zero-by-2050_4a1ca43f/c8328405-en.pdf)). URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/05/net-zero-by-2050_4a1ca43f/c8328405-en.pdf
40. OSTCHEM. ПАТ «Азот». Офіційний сайт: <http://www.ostchem.com/uk/o-kompanii/proizvodstvo/azot>
41. Yehorova Oksana, Mislyuk Olga, Khomenko Olena, Postryhan Vitalii. Risk-based assessment of atmospheric air pollution by heavy metals. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2025, 26(11), 118–128. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/211761>
42. Savenets Mykhailo, Nadochii Liudmyla, Kozlenko T. V. and others. Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 2: Pollutants total content according to the satellite data. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2023. 32. P. 130-143. doi: 10.31481/uhmj.32.2023.09
43. Savenets Mykhailo, Osadchyi Volodymyr, Komisar Kateryna, Zhemera Natalia, Oreshchenko Andrii. Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale russian invasion of Ukraine. *Atmospheric Pollution Research*. Volume 14, Issue 11, November 2023, 101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
44. Tracking Sulfur Dioxide from Space. *NASA Earth Observatory*. 2023. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/SulfurDioxide>
45. Volchyn I.A., Haponych L.S., Przybylsk W.Ja. Current state and forecast of sulfur dioxide and dust emissions at thermal power plants of Ukraine. Power supply technologies. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021, № 5. P. 87-93. https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/5/NVNGU05_2021_Volchyn.pdf
46. World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. *World Health Organization*. <https://iris.who.int/handle/10665/345334>.
47. Zamfirova M. S., Khokhlov V. M. Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021-2050 by CORDEX model ensemble. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2020. (25), 17-27. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>