

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я ТА СУСПІЛЬНОГО
БЛАГОПОЛУЧЧЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за ОС «Магістр»

на тему:

«ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ НА ЯКІСТЬ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ»

*на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю
"Екологія"*

Виконав: здобувач вищої освіти
заочної форми навчання,
спеціальності 101 «Екологія»

_____ **Ляхович Д. І.**

Керівник: професор кафедри
екології та захисту довкілля

_____ **Параняк Р. П.**

Рецензент : к. с. - г. н., доц.

_____ **Осередчук Р. С.**

Львів 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Тема: Вплив енергетичної кризи на якість атмосферного повітря

Мета: вивчення впливу енергетики в умовах енергетичної кризи на якість повітря атмосфери в умовах західної України та суміжних районів

Об'єкт: атмосферне повітря у Львівській області

Предмет: якість повітря у контексті впливу об'єктів енергетики

Завдання дослідження:

- Дослідити основні види енергетичних ресурсів та з'ясувати сутність енергетичної кризи;
- Охарактеризувати основні джерела забруднення атмосферного повітря, пов'язані з виробництвом та споживанням енергії, включаючи традиційні та резервні енергетичні потужності.
- Проаналізувати екологічні та соціально-економічні наслідки погіршення якості повітря, спричиненого змінами в енергетичному секторі.
- Проаналізувати сучасний стан енергетичного сектору Західної України та суміжних регіонів, визначити динаміку та структуру викидів забруднювальних речовин
- Розробити рекомендації щодо зниження негативного впливу енергетичної кризи на стан атмосферного повітря.

У першому розділі роботи розглянуто основні енергетичні ресурси людства та проблеми, пов'язані із їх експлуатацією. Проаналізовано суть та характер енергетичних кризів. Вивчено екологічні наслідки отримання та використання енергетичних ресурсів. Проведено огляд основних напрямів переходу на відновлювані джерела енергії та встановлено їхню обмеженість на даний момент.

У другому розділі досліджено методи, прийоми та інструменти аналізу якості атмосферного повітря. Детально проаналізовано існуючі системи моніторингу, їхні можливості та обмеження. Особливу увагу зосереджено на станціях моніторингу у західній Україні та східній Польщі та на системі доступу до інформації, зібраної цими станціями.

У третьому розділі наведено характеристику якості та вивчено динаміку показників забруднення повітря у регіоні. Встановлено, що основні викиди у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення пов'язані із підприємствами, що добувають вугілля та генерують електроенергію та тепло. Підтверджено високу кореляцію між індексом якості повітря та початком опалювального сезону у східній Польщі. Окреслено перспективи стратегічної екологізації енергетичного сектору у Львівській області та у прилеглих територіях.

Загальна характеристика роботи

Обсяг -----	93
Таблиць -----	7
Рисунків -----	25
Використаних джерел -----	52

Зміст

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	7
1.1. Загальна характеристика енергетичних ресурсів світу	7
1.2. Особливості енергетичної кризи в умовах глобалізації	18
1.3. Роль відновлюваних джерел та перспективи зменшення екологічних ризиків	28
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1. Системи моніторингу якості атмосферного повітря.....	34
2.2. Методи та індикатори оцінки якості повітря	43
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
3.1. Загальна характеристика якості атмосферного повітря	47
3.2. Розвиток енергетики Львівщини та якість повітря	59
3.3. Перспективи екологізації енергетики регіону	70
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	77
РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНА ОБОРОНА	79
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	84
Додаток А.....	90
Додаток Б.....	92

ВСТУП

Однією із глобальних загроз сучасності є енергетична криза. Сучасна енергетична криза є одним із ключових викликів для глобального розвитку, оскільки безпосередньо впливає не лише на економічну стабільність, а й на стан навколишнього природного середовища. Зростання цін на енергоносії, геополітична напруженість, обмеженість традиційних ресурсів та потреба у декарбонізації економіки призвели до суттєвих змін у структурі виробництва та споживання енергії. У багатьох країнах світу, зокрема й в Україні, енергетична криза зумовила активізацію використання доступних, але часто екологічно шкідливих джерел енергії, таких як вугілля, мазут або паливо низької якості. Це, у свою чергу, призводить до зростання обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Якість повітря належить до ключових індикаторів екологічної безпеки, впливає на рівень добробуту населення і досягнення цілей сталого розвитку. Стан повітряного басейну залежить від структури енергетичного сектору, який традиційно є одним із головних джерел антропогенних викидів. Об'єкти енергетики генерують значні обсяги оксидів сірки, азоту, вуглецю, твердих частинок та інших забруднювальних речовин, які негативно впливають на стан здоров'я населення, спричиняють деградацію екосистем, посилюють кліматичні зміни і можуть зумовлювати суттєві соціально-економічні збитки.

В умовах енергетичного дефіциту, обмежених фінансових ресурсів та відкладеної модернізації енергетичних потужностей ризики погіршення якості атмосферного повітря істотно зростають. Перехід до використання дешевших, але екологічно шкідливих видів палива, а також експлуатація застарілого обладнання без належних систем очищення викидів ведуть до збільшення концентрацій забруднювальних речовин у повітрі, особливо в промислових регіонах.

В Україні ці процеси ускладнено воєнними діями: цілеспрямовані атаки агресора на енергетичну інфраструктуру порушують стабільність енергопостачання, аварійні режими роботи об'єктів генерації та ріст навантаження на резервні й менш екологічні енергетичні потужності. Це створює додаткові

екологічні ризики, посилює техногенне навантаження на довкілля та ускладнює реалізацію заходів з охорони атмосферного повітря.

Дослідження впливу енергетичної кризи на стан атмосферного повітря є надзвичайно актуальним, оскільки дозволяє виявити взаємозв'язки між енергетичною політикою, структурою генерації та екологічними наслідками. Розуміння цих процесів є необхідним для розроблення ефективних стратегій адаптації, впровадження енергозберігаючих технологій та розширення частки відновлюваних джерел енергії з метою зменшення негативного впливу на довкілля та здоров'я населення.

Метою даної роботи є вивчення впливу енергетики в умовах енергетичної кризи на якість повітря атмосфери в умовах західної України та суміжних районів. Для досягнення мети слід виконати такі завдання:

- Дослідити основні види енергетичних ресурсів та з'ясувати сутність енергетичної кризи;
- Охарактеризувати основні джерела забруднення атмосферного повітря, пов'язані з виробництвом та споживанням енергії, включаючи традиційні та резервні енергетичні потужності.
- Проаналізувати екологічні та соціально-економічні наслідки погіршення якості повітря, спричиненого змінами в енергетичному секторі.
- Проаналізувати сучасний стан енергетичного сектору Західної України та суміжних регіонів, визначити динаміку та структуру викидів забруднювальних речовин
- Розробити рекомендації щодо зниження негативного впливу енергетичної кризи на стан атмосферного повітря.

Об'єктом дослідження є атмосферне повітря у Львівській області. *Предметом* дослідження є якість повітря у контексті впливу об'єктів енергетики.

У дослідженні застосовано комплекс методів дослідження, зокрема методи систематизації, порівняння та контекстного аналізу, еколого-математичного моделювання, інформаційно-аналітичного моніторингу, а також елементи експертного та графічного аналізу.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна характеристика енергетичних ресурсів світу

Енергія є однією з базових категорій фізики, що відображає здатність системи виконувати роботу. Вона існує у різних формах – механічній, тепловій, електричній, хімічній – і підпорядковується фундаментальному закону збереження. У науці це абстрактна величина, вимірювана у джоулях, але в повсякденному житті вона набуває конкретного економічного змісту.

Для суспільства енергія — це стратегічний ресурс, без якого неможливі виробництво, транспорт, зв'язок чи комфорт побуту. Наявність і доступність енергії визначають рівень розвитку економіки та якість життя. Тому енергія водночас виступає і фізичною величиною, і господарською категорією, що поєднує закони природи з потребами цивілізації.

З давніх часів людина тісно пов'язана з природою і залежить від її енергетичних ресурсів. Спершу це була м'язова сила, далі — вогонь, який став символом прогресу й основою перших технологій. Згодом людство навчилося використовувати силу вітру та води: вітряки й водяні млини забезпечували роботу ремесел і розвиток господарства.

Індустріальна епоха принесла відкриття викопного палива — вугілля, нафти, газу. Саме вони дали потужний поштовх розвитку промисловості, транспорту й комунікацій, але водночас стали джерелом екологічних проблем – від того, що енергії бракує і для її добування доводиться руйнувати природне середовище, – і до того, що надмірне використання енергії само по собі трансформує довкілля. Сьогодні людство стоїть перед викликом: як задовольнити зростаючі потреби в енергії, не виснажуючи природу й не руйнуючи кліматичну рівновагу.

Життя людини і розвиток суспільства супроводжуються процесами накопичення, перетворення і витрачання енергії. Біологічні процеси в організмі людини ґрунтуються на накопиченні та перетворенні енергії, отриманої з їжі, яка забезпечує рух, мислення і творчу діяльність. У

масштабах суспільства енергія виступає основою виробництва, транспорту, комунікацій і культурного розвитку. Від найпростіших форм використання вогню до сучасних високотехнологічних систем відновлюваної енергетики людство завжди прагнуло ефективніше накопичувати та перетворювати енергію. Однак із зростанням рівня споживання з'явилися й проблеми — виснаження ресурсів, забруднення довкілля, кліматичні зміни. Це спонукає сучасну цивілізацію до пошуку нових балансів між потребами розвитку і відповідальним ставленням до енергетичних ресурсів. Таким чином, життя людини і розвиток суспільства — це постійний рух енергії, від її накопичення до витрачання, від природи — до створених людиною систем, що визначають рівень і якість цивілізаційного прогресу.

Оцінювати енергетичні виміри процесів у суспільстві і природі можна з різних позицій: філософа, фізика, економіста, соціолога, еколога та інших. Також ці виміри можна вивчати на різних рівнях: від індивідуального споживання енергії до енергоемності окремих підприємств, галузей чи держав. Індивідуальне енергоспоживання — це багатогранний показник: він одночасно відображає фізіологічні потреби, технічні можливості, економічний рівень і екологічні виклики. Індивідуальне споживання людиною енергії за даними роботи [8] наведено в табл. 1.1. Споживання енергії на рівні держави зазвичай оцінюють через систему спеціалізованих показників, які відображають обсяги виробництва та використання різних видів енергетичних ресурсів. До них належать дані про генерацію та споживання електроенергії, видобуток і використання вугілля, нафти, природного газу, відновлюваних джерел енергії, а також баланс імпорту й експорту енерго-ресурсів. Такі показники дозволяють простежити структуру енергетики країни, визначити рівень її залежності від зовнішніх постачальників, оцінити ефективність перетворення первинних ресурсів у кінцеву енергію. Крім того, вони є важливими індикаторами економічного розвитку, промислового потенціалу, рівня життя населення та екологічного навантаження на довкілля.

Таблиця 1.1. Індивідуальне споживання людиною енергії за добу
(за даними роботи [8])

Споживач	Харчування	Побут	Промисловість і с/г	Транспорт	Разом		
					тис. ккал	кВт·год	кг у.п.
Первісна людина	2	–	–	–	2	2,4	0,3
Мисливець	3	2	–	–	5	5,8	0,7
Первісний землекористувач	4	4	4	–	12	14,0	1,7
Культурний землекористувач	6	12	7	1	26	30,0	3,7
Людина «індустріальна»	7	32	24	14	77	90,0	11,0
Людина «технологічна»	10	66	91	63	230	267,0	33,0

Енергію вимірюють у різних одиницях залежно від сфери використання. Основною, введеною у систему СІ одиницею є Джоуль (Дж, J) – робота, яку здійснює сила 1 ньютон, переміщаючи тіло на 1 метр у напрямку дії сили. Проте на практиці часто зручно використовувати інші, несистемні одиниці. Наприклад, калорія – кількість енергії, необхідна для нагрівання 1 грама води на 1 °C (від 14,5 до 15,5 °C при тиску в 1 атмосферу) – 1 cal=4,184 Дж; цю одиницю часто використовують для вимірювання енергетичної цінності їжі, напр. одне яблуко середнього розміру містить близько 50 ккал, а людині для підтримання життєдіяльності потрібно приблизно 2000–2500 ккал на добу. Кіловат-година (кВт·год, kWh) — це одиниця вимірювання енергії, яку найчастіше використовують в енергетиці та побуті для обліку споживання електроенергії. У середньому одна українська родина витрачає кілька сотень кВт·год електроенергії на місяць.

Кілограм умовного палива (кг у.п.) — це умовна енергетична одиниця, яку застосовують для порівняння різних видів палива за їх тепловою згоряння. Різні види палива (вугілля, нафта, газ, дрова тощо) мають різну

калорійність, тобто виділяють різну кількість теплоти при згорянні. Щоб зручно було їх співставляти, ввели єдиний "еталон" — 1 кг умовного палива. В Україні та більшості країн прийнято:

$$1 \text{ кг у.п.} = 29,3 \text{ МДж} (\approx 7000 \text{ ккал})$$

Це відповідає теплоті згоряння 1 кг кам'яного вугілля середньої якості. Використання такої одиниці інтуїтивно зрозуміло (хоча і не є точним), дозволяє також переводити будь-яке інше паливо (газ, нафту, дрова, торф, електроенергію) у єдині порівняльні одиниці; застосовується в енергетичній статистиці та розрахунках балансу палива країни; використовується для оцінки паливної ефективності.

Приклади переведення (орієнтовно): 1 м^3 природного газу $\approx 1,1 \text{ кг у.п.}$; 1 кг сирої нафти $\approx 1,5 \text{ кг у.п.}$, 1 кВт·год електроенергії $\approx 0,122 \text{ кг у.п.}$ або 1 кг умовного палива $\approx 8,14 \text{ кВт·год енергії}$ (див. табл.1.2).

Таблиця 1.2. Переведення різних енергоресурсів
у кілограми умовного палива (кг у.п.).
(розраховано за даними довідників)

Вид палива / енергії	Одиниця виміру	Еквівалент, кг у.п.
Кам'яне вугілля (середнє)	1 кг	1,00 кг у.п.
Природний газ	1 м ³	~1,1 кг у.п.
Нафта (середня)	1 кг	~1,5 кг у.п.
Дрова (повітряно-сухі)	1 кг	~0,5 кг у.п.
Торф (повітряно-сухий)	1 кг	~0,3 кг у.п.
Кокс	1 кг	~0,7–0,8 кг у.п.
Електроенергія	1 кВт·год	~0,122 кг у.п.

Щороку для забезпечення світових потреб в енергії використовується понад 10 млрд тонн палива у перерахунку на вугільний еквівалент [8]. Приблизно 40 % цього обсягу становить нафта, ще значну частку займають вугілля та природний газ. Таким чином, понад 90 % усієї енергії, яку споживає людство, отримується з вуглецевмісної сировини. Така залежність від викопних джерел енергії неминує загострює проблему їх виснаження у

майбутньому та водночас посилює негативний вплив на довкілля через забруднення атмосфери, парниковий ефект і зміну клімату. Зауважимо, що інші (не вуглецевмісні) джерела енергії це передусім:

- гідроенергетика (водяні електростанції)
- ядерна енергія
- відновлювані джерела:
 - сонце, вітер, геотермальна,
 - біомаса (традиційна і сучасна), біогаз тощо

При цьому можна вважати, що біомаса і біогаз – це відновлювані, але вуглецевмісні джерела енергії. Їх головна відмінність від викопних палив у тому, що при правильному циклі використання (наприклад, вирощування й спалювання біомаси) викиди CO_2 частково компенсуються поглинанням вуглецю під час росту рослин. Але при інтенсивному застосуванні без балансу (вирубка лісів, монокультури, використання викопного палива для обробки і транспорту біомаси) — вони також сприяють додатковим парниковим викидам і деградації довкілля.

Для енергетичних балансів логічно виділяти три групи джерел:

- Викопні (невідновлювані, вуглецевмісні)
- Відновлювані вуглецевмісні (біомаса, біогаз, біопаливо)
- Безвуглецеві відновлювані та ядерні

Попри значні зусилля у різні часи й різних куточках світу та наміри перейти із використання паливних корисних копалин на альтернативні та відновлювані джерела, усе ще вуглецевмісні джерела енергетичних ресурсів домінують. У 2023 році близько 81-82 % первинної енергії у всьому світі забезпечувалось викопними джерелами [25]. Нафта і вугілля забезпечили відповідно третину та чверть світового споживання енергії, яке того року досягло історичного максимуму, зрісши на 2% порівняно з 2022 роком. Рекордне споживання було зумовлене зростанням попиту, понад половину якого сформували країни Глобального Півдня, де попит зростає удвічі

швидше за світові темпи. 2023 року було зафіксовано й інший рекорд — це був «найсекотніший» рік в історії. За даними 73-го видання «Статистичного огляду світової енергетики», зростання споживання викопного палива, особливо вугілля, спричинило 40 млрд тонн викидів CO₂ — найвищий показник в історії (+2% до 2022 р.).

Міжнародне енергетичне агентство пояснило частину зростання викидів дефіцитом гідроенергії через посуху. В іншому разі викиди, ймовірно, знизилися б. Вугілля, найдешевше й найбрудніше паливо, є найбільшим джерелом вуглецевих викидів, відповідальним більш ніж за 0,3 °C зі зростання середньої глобальної температури на 1,2 °C з часів індустріальної революції [25]. Попри загальносвітовий негативний тренд, не всі країни нарощують використання викопних палив. У Європі їхня частка вперше знизилася нижче 70%, а в США споживання вугілля за останнє десятиліття скоротилося удвічі, що зменшило викиди CO₂: у ЄС — на 6,6%, у США — на 2,7%.

Лідером споживання вугілля залишається Китай, який спалює його більше, ніж решта світу разом узята, а також Індія, що нині перевищила Європу та Північну Америку разом. Водночас Китай є лідером і у сфері відновлюваної енергетики, забезпечивши 55% глобального приросту у 2023 р. Це створює можливість утримати збільшити світові потужності ВДЕ до 2030 р., як передбачено на кліматичному саміті COP28 у Дубаї. Однак частка чистої енергії досі становить лише 15% світового енергобалансу (сонце й вітер — 8%). Частка чистої енергії зросла до 15%, але викопні ресурси досі дають понад 80%. MEA (International Energy Analysis – Міжнародне енергетичне агентство) прогнозує значне зростання інвестицій у чисті технології, а G7 домовилися відмовитися від вугілля у 2030-х роках, що є важливим кроком до скорочення викидів і виконання кліматичних зобов'язань.

Країни з високим рівнем розвитку (Європа / Північна Америка) характеризуються тим, що тут більша доля відновлюваних джерел і ядерної енергії,

дещо нижча залежність від вугілля; але все одно значна частка викопних джерел, особливо для транспорту та опалення. Наприклад, у ЄС частка викопних джерел у “gross available energy” становить близько 70-71 % у деякі останні роки.

Країни, що розвиваються, – великі споживачі викопних ресурсів (Китай, Індія, країни Азії, Близького Сходу). Тут дуже висока залежність викопних джерел, часто понад світовий середній, з поступовим ростом використання відновлюваних джерел, але не в тій мірі, щоб швидко зменшити абсолютні обсяги викопного палива.

Країни з великим потенціалом відновлюваної енергії чи сильними політиками “зеленого переходу” (Скандинавія, деякі країни ЄС, Норвегія, Ісландія, деякі країни з високим гідропотенціалом) показують значно меншу частку викопних джерел у загальному споживанні енергії, особливо в електроенергетиці.

Сфера енергетики викликає зацікавлення у дослідників в усьому світі. Існують численні інформаційні ресурси, що розкривають стан справ у світовій енергетиці. Our World in Data має готовий набір «Share of primary energy consumption that comes from fossil fuels» (покриває 1965–2024, метод — substitution method). На сторінці можна вибрати країну, побудувати графік і завантажити CSV. Джерело даних — Energy Institute / Statistical Review (обробка OWID). Візуалізація даних наведена на рис.1.1. На сайті <https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuels-share-energy?time=2024> можна переглянути дані за будь-який момент від 1965 до 2024 року, на рисунку показано лише три роки: 1965, 1990 та 2024 роки.

Бачимо, що у більшості регіонів світу, по яких є дані (наприклад, по Африці і центру Південної Америки дані відсутні) частка викопного палива домінує. Дещо покращується ситуація у країнах Скандинавії і у Бразилії; також у центральній Європі маємо стабільне зниження частки викопного палива; порівняно невисока частка викопного палива у Новій Зеландії. Ситуація з використанням викопного палива у Канаді за другу половину XX

століття покращилася (помітні зміни мали місце біля 1980 року), проте в подальшому суттєвих змін тут не відбувалося. Що цікаво, зміни не обов'язково були однонапрямлені: так, у Норвегії у 1990-2000 роках частка викопного палива декілька раз як знижувалась, так і підвищувалась, перетинаючи межу у 30%.



Рис.1.1. Частка споживання первинної енергії з викопного палива: 1965, 1990, 2024

Цікавими є показники динаміки споживання енергетичних ресурсів. На Рис.1.2 показано такі зміни у 1966-2024 роках для Китаю, США та України (для України починаючи із 1987 року) за даними інтернет-ресурсу: <https://ourworldindata.org/energy/country/>. Положення графіка біля нуля свідчить про стабільний рівень. Бачимо, що найбільше зростання споживання енергії мало місце у 1970 році в Китаї – на 27,99%, також значний ріст у Китаї у 2003 (+16,48%) та 2004 (+17,01%) та в Україні у 1990 (+16,93%).

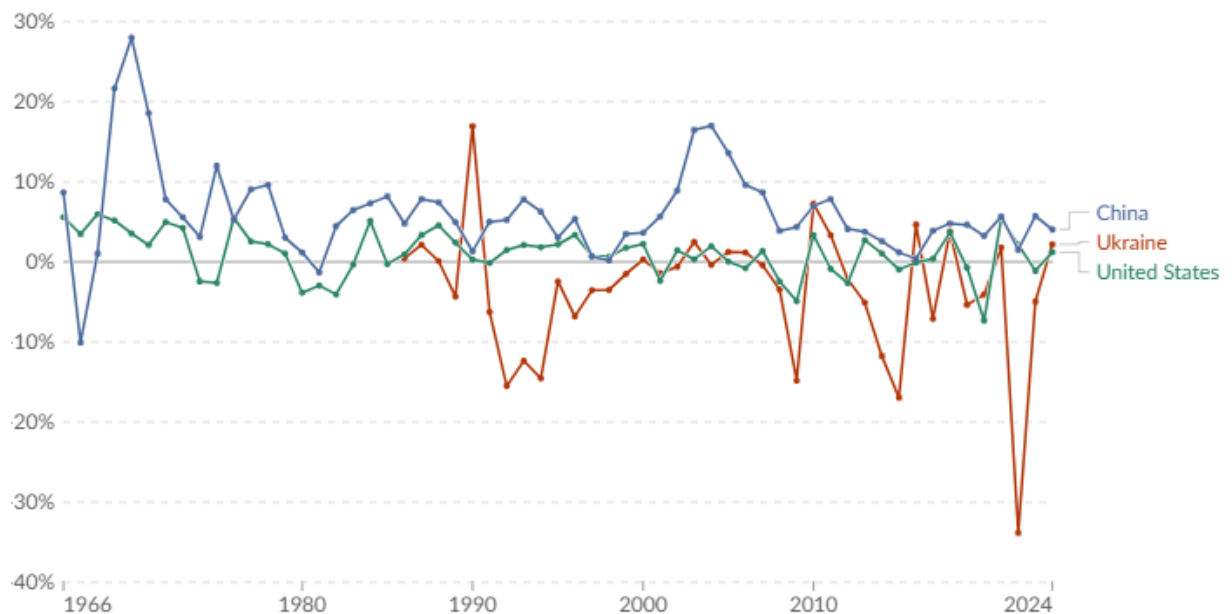


Рис.1.2. Динаміка споживання первинної енергії
(Annual change in primary energy consumption)

Важливо відмітити, що падінь річного споживання енергії у Китаї практично не було (винятки: 1967 – 10,08%, 1981 – 1,32%), тоді як у США спостерігаємо як ріст споживання (щонайбільше біля 6%), так і спад (щонайбільше – 7% у 2020). Найбільше падіння зафіксовано в Україні у 2022 році – 33,82% – рік широкомасштабної агресії РФ, хоча помітні падіння були і раніше (2015 – 16,96%, 2009 – 14,82%, 1992 – 15,50%)

Аналіз підтверджує, що енергетика України історично тісно прив'язана до викопних джерел (вугілля, газ, нафта; плюс частка ядерної генерації в електроенергетиці). Після розпаду СРСР спостерігалися зміни в обсягах і структурі (зниження споживання у 1990-ті, поступове відновлення й модифікація структури у 2000-х). У останнє десятиліття частка викопних

джерел у первинній енергії залишається високою. Китай історично (від промислового розвитку й особливо в другій половині XX ст.) був і залишається дуже залежним від викопних джерел, особливо від вугільної складової. У XXI ст., разом зі стрімким зростанням загального енергоспоживання, частка викопних джерел за відносним показником залишалась високою (великі абсолютні обсяги вугілля/нафти/газу), хоча частка джерел відновлюваних і ядерної енергії зростає у виробництві електроенергії. У США в другій половині XX ст. викопні джерела домінували; у XXI столітті відсоток викопних джерел у первинній енергетиці поступово знижувався завдяки зростанню частки газу (перехід від вугілля в електроенергетиці), розвитку відновлюваних джерел і деякому нарощуванню ядерної генерації. Проте викопні палива все ще складають значну більшість загального енергоспоживання (80,33% у 2024, 84% 10 років тому і 88% 20 років тому).

Здійснимо короткий географічний екскурс по енергетичним ресурсах та їхній локалізації на планеті. Відзначимо попередньо, що такий ресурс як доступ до сонячної енергії розподілений рівномірно вздовж паралелей і зростає при руху до екватора, проте локальні, зокрема погодні умови, можуть суттєво впливати на його доступність.

- Викопні невідновлювані енергетичні ресурси – нафта, природний газ, вугілля, уран.

Нафта (найбільші запаси: Близький Схід (Саудівська Аравія, Ірак, Іран, Кувейт, ОАЕ), Венесуела, Канада, Росія; використовують для транспорту, хімічної промисловості, виробництва електроенергії; цей ресурс зконцентровано у кількох регіонах, а тому багато країн залежать від експорту).

Природний газ (основні запаси: Росія, Іран, Катар, США, Туркменістан; різний за доступністю та має модифікації (сланцевий газ); основне його використання – електроенергетика, опалення, хімія, добрива. Зараз активно розвивають ринок зрідженого газу, що зменшує регіональну залежність).

Вугілля (найбільші поклади: США, Росія, Китай, Індія, Австралія, ПАР. Використання ресурсу переважно у електроенергетиці та металургії, у багатьох локаціях його активно використовують зимою для опалення житла. Це найдешевше паливо, але найбрудніше з точки зору екології; може суттєво відрізнятись за якістю та енергоемністю; умовна одиниця енергії кг у.п. «прив'язана» якраз до вугілля.

Уран (основні родовища: Казахстан, Канада, Австралія, Намібія, Росія. Використовують практично виключно як паливо для АЕС. Обсяги споживання його формально невеликі, але це стратегічно важливий ресурс).

- Відновлювані енергоресурси – гідро-, сонячна, вітрова, геоенергія, біоенергетика

Гідроенергія (найбільший потенціал: Китай, Бразилія, Канада, Росія, країни Центральної Африки; сильно залежить від клімату, при посухах можлива криза генерації).

Сонячна енергія (більший потенціал у країнах з високою інсоляцією – Близький Схід, Північна Африка, Індія, Австралія, південні штати США).

Вітрова енергія (сьогодні лідери: Китай, США, Німеччина, Іспанія, Данія; великий потенціал – узбережжя океанів. Недоліками є нерівномірність виробництва та потреба в акумуляції і зберіганні енергії).

Біоенергетика (біомаса, біогаз, біопаливо – основні регіони: США, Бразилія, ЄС, Китай, Індія. Можна розвивати практично у будь-якому куточку світу, де ростуть рослини (у т.ч. водорості))

Геотермальна енергія (може бути використана у регіонах із високою вулканічною активністю: Ісландія, Італія, Філіппіни, Індонезія, Каліфорнія у США. Особливістю цієї енергії є те, що вона обмежена географічно, але дуже стабільна).

Відзначимо, що країни Глобального Півдня (переважно Африка (крім ПАР), багато країн Азії, Близького Сходу та Латинської Америки) мають величезний потенціал ВДЕ, але бракує інвестицій і технологій.

1.2. Особливості енергетичної кризи в умовах глобалізації

Протягом тисячоліть людство задовольняло свої потреби в енергії завдяки відновлюваним джерелам — сонячному випромінюванню, біомасі, силі води та вітру. До настання індустріальної епохи вже робилися спроби перетворювати теплову енергію на механічну. Проте справжнім переломним моментом стала індустріальна революція, яка ознаменувала перехід до використання викопного палива як головного джерела енергії. Цей процес відбувався поступово: спершу люди експлуатували місцеві поклади вугілля, згодом розпочалося широкомасштабне використання нафти й природного газу на глобальному рівні. Приблизно пів століття тому у світовій енергетиці з'явився ще один потужний напрям — ядерна енергія. Нині ж людство знову активно звертається до відновлюваних джерел енергії, прагнучи поєднати історичний досвід з новітніми технологіями та мінімізувати залежність від викопного палива [8].

Наслідками такого розвою, коли прогрес відбувається екстенсивним шляхом, є екологічні проблеми та кризові явища у багатьох галузях господарства та соціальної сфери, адже експоненційний ріст буде впирається у природні бар'єри та обмеження. Маємо різні темпи розвитку сфери ресурсного забезпечення, сфери споживання, окремих галузей, факторів індустріальних та технологічних. Зростають як потужності енергетики у світі та інші показники (див. рис.1.3).

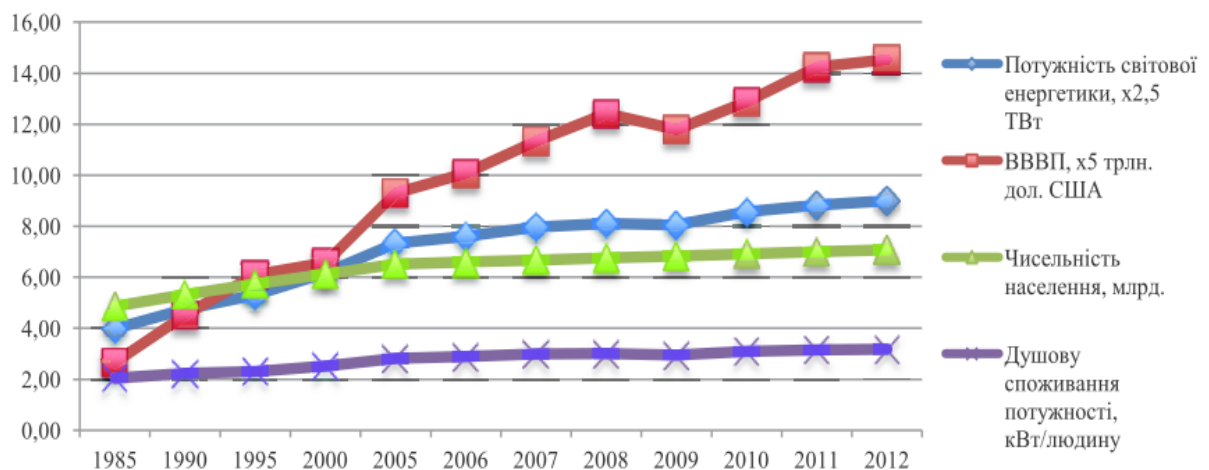


Рис.1.3. Глобальна динаміка світової економіки у 1985–2012 рр. [9]

Проте, не зважаючи на зростання виробленої потужності, потреби людства зростають швидшими темпами. У світовому масштабі протягом ХХ століття та на початку ХХІ століття попит на енергію зростав дуже швидкими темпами — внаслідок демографічного вибуху, індустріалізації, урбанізації та зростання рівня життя. В окремі десятиліття (особливо 1950–1970-ті) споживання енергії зростало швидше, ніж можливості її стабільного виробництва та транспортування, що призводило до енергетичних криз, наприклад, **нафтова криза 1973 року**. Цю кризу прийнято вважати першою і найбільшою енергетичною кризою, і що цікаво її причини були політичні, а не екологічні чи технологічні. Нафтова криза 1973 року — це глобальна енергетична криза, спричинена різким скороченням поставок нафти країнами ОПЕК, що призвело до стрибка цін на нафту та масштабних економічних потрясінь у світі.

Причини:

Арабсько-ізраїльська війна (Війна Судного дня): після початку війни 6 жовтня 1973 року між Ізраїлем та коаліцією арабських держав на чолі з Єгиптом і Сирією країни — члени ОПЕК (переважно арабські) запровадили нафтове ембарго проти держав, які підтримували Ізраїль (США, Канада, Японія, країни Західної Європи). Політичний тиск: ембарго мало на меті змусити Захід змінити політику щодо конфлікту на Близькому Сході. Залежність розвинених країн від імпорту нафти: у 1970-х більшість західних економік залежала від дешевого імпорту близькосхідної нафти.

Прояви:

Ціна на нафту зросла вчетверо: з приблизно 3 до 12 доларів за барель упродовж кількох місяців. У країнах Заходу виникли дефіцити пального, черги на автозаправках, обмеження продажу бензину. Введено енергозберігаючі заходи: обмеження швидкості на автошляхах, “вихідні без автомобілів”, економія електроенергії. Почалася рецесія: сплеск інфляції, зниження виробництва та зростання безробіття.

Наслідки: Розвинені країни переосмислили свою енергетичну політику, почали диверсифікувати джерела постачання та нарощувати стратегічні запаси. Активізувався розвиток альтернативних джерел енергії (атомна, вугільна, відновлювана). Створено Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) у 1974 році для координації енергетичної безпеки. Криза змінила геополітичну роль нафтовидобувних країн, посиливши їхній вплив на світову економіку.

Таким чином, нафтова криза 1973 року стала переломним моментом, що показав уразливість світової економіки перед енергетичними шоками та започаткував нову епоху енергетичної політики.

Проте в останні десятиліття ситуація стала більш збалансованою: темпи зростання виробництва енергії (зокрема завдяки розвитку відновлюваних джерел — сонця, вітру, гідроенергетики) в багатьох країнах наближаються або навіть випереджають темпи зростання попиту, особливо у розвинених економіках, де спостерігається стабілізація або уповільнення споживання через підвищення енергоефективності.

Натомість у країнах, що розвиваються, попит і далі зростає швидше, ніж можливості енергетичної інфраструктури — це створює дефіцити та перебої. Також глобальні виклики, як-от декарбонізація та відмова від викопного палива, ставлять нові вимоги до систем енергопостачання, які не завжди встигають за темпами зростання потреб.

Отже, загальна тенденція така: у минулому — попит зростає швидше; нині — ситуація вирівнюється в глобальному масштабі, але регіональні дисбаланси залишаються значними.

Психологічний чинник відіграє значну, хоч може і не вирішальну роль в енергетичних кризах. Психологічні чинники часто “підсилюють” або навіть запускають кризу. Очікування дефіциту може спричинити панічну поведінку. Коли учасники ринку (держави, компанії, споживачі) очікують нестачі енергії, вони починають скуповувати або накопичувати ресурси “про запас”. Це саме по собі створює штучний дефіцит і підвищує ціни.

Приклад: у 1973 році країни імпортери нафти різко збільшили закупівлі після оголошення ембарго, що поглибило кризу. Ринки енергоресурсів дуже чутливі до політичних заяв, воєнних загроз чи чуток. Навіть невелика подія може викликати лавиноподібну реакцію через очікування подорожчання або дефіциту.

Масові черги на АЗС, панічні закупівлі палива чи газу, переключення на альтернативні джерела — усе це може тимчасово розбалансувати систему постачання, навіть якщо реальних обсягів вистачає.

Через глобалізацію, біржові механізми та швидкість поширення інформації навіть очікування майбутніх подій (наприклад, санкцій, страйків, зими) можуть суттєво впливати на ціни та постачання. Тому в умовах глобалізації та інформаційного суспільства, коли поширити недостовірну, проте суспільно чутливу інформацію вкрай легко, часто створюються передумови для нових енергетичних та інших криз.

Втім такі спекуляції не скасовують інші причини енергетичних криз, основною із яких вважають обмеженість енергетичних ресурсів.

Згідно класичної концепції, що сформувалась у другій половині ХХ століття, усі енергетичні ресурси на Землі є обмежені і можуть бути вичерпані практично упродовж життя одного покоління. Винятком є ймовірне опанування реакцією термоядерного синтезу та використання енергії сонця (у прямому вигляді чи у контрольованих умовах). Реакція термоядерного синтезу — це процес злиття легких ядер (зазвичай ізотопів Гідрогену — дейтерію та тритію) в одне важче ядро (наприклад, Гелію) при дуже високих температурах і тисках. У результаті такого злиття вивільняється велика кількість енергії, бо маса продуктів реакції трохи менша за суму мас вихідних ядер, а різниця перетворюється на енергію за формулою $E = m c^2$. Це той самий механізм, який живить зорі, зокрема Сонце, і перспективна технологія для майбутніх чистих джерел енергії на Землі. Більшість інших викопних ресурсів — вуглецеве паливо, утворилось із енергії Сонця, поглинутої рослинами Землі у прадавні часи.

Ресурси вуглецевого палива (вугілля, нафти, природного газу) сьогодні вичерпуються в мільйони разів швидше, ніж формувалися природним шляхом.

Вугілля, нафта й газ утворилися з органічних решток рослин і мікро-організмів у товщах земної кори за умов високого тиску й температури. Формування значних покладів відбувалося протягом десятків — сотень мільйонів років (переважно в палеозойську та мезозойську ери). Наприклад, нафтові родовища, які ми використовуємо сьогодні, формувалися 100–300 млн років.

Людство почало масово використовувати викопне паливо лише з XIX століття, а особливо інтенсивно — після Другої світової війни. За менше ніж 200 років людство вже використало значну частину легкодоступних запасів. Щорічно спалюється понад 8 млрд тонн вугілля, близько 4 млрд тонн нафти та 4 трлн м³ природного газу.

Якщо процес утворення тривав 100 млн років, а видобуток — 100 років, то швидкість вичерпання приблизно: $100 \text{ млн років} / 100 \text{ років} = 1\,000\,000$. Тобто ресурси зникають у мільйон разів швидше, ніж утворювалися.

Вуглецеве паливо — невідновлюваний ресурс у масштабах людської цивілізації. Темпи його споживання абсолютно не співставні з природними темпами відновлення, тому довгостроково воно приречене на виснаження.

У цьому відношенні біомаса (деревина, сільськогосподарські відходи, спеціальні енергетичні культури, біогаз тощо — формується із енергії Сонця зараз) загалом вважається відновлюваним енергетичним ресурсом, але з важливими застереженнями. Біомаса формується за рахунок сучасного біологічного кругообігу, а не геологічних процесів. Рослини накопичують енергію через фотосинтез протягом місяців або років, а не мільйонів років. За умови сталого землекористування та повторного висаджування біомаса може відновлюватися впродовж коротких циклів, тому вона належить до відновлюваних джерел енергії.

Тим не менш наразі біомаса не стала повноцінною заміною викопного палива. Щоб замінити нафту чи газ біомасою у масштабах всієї енергетики, знадобилися б величезні сільськогосподарські площі, що конкурували б з виробництвом продуктів харчування, збереженням природних екосистем та іншими потребами.

Біомаса має значно меншу теплоту згоряння на одиницю об'єму/маси, ніж вугілля, нафта чи газ. Це означає більші обсяги транспортування, складніша логістика й вищі витрати.

Сучасна енергетика побудована навколо викопного палива (ТЕС, НПЗ, транспорт). Масовий перехід на біомасу вимагає перебудови інфраструктури та інвестицій.

Неконтрольоване використання біомаси може призвести до вирубки лісів, деградації ґрунтів, втрати біорізноманіття та навіть збільшення викидів CO₂ (якщо не дотримуватися принципу відновлення). Тому не вся біомаса — «чиста».

За останні десятиліття сонячна та вітрова енергетика стали дешевшими та ефективнішими, ніж масштабне використання біомаси для електрики чи тепла. Біомаса натомість часто використовується у нішевих секторах (опалення, біогаз, біопаливо для транспорту).

Біомаса — дійсно відновлюване джерело енергії, але вона не здатна самотійно замінити викопне паливо на глобальному рівні без серйозних екологічних і соціальних наслідків. Тому її розглядають як один із елементів енергетичного балансу, особливо в аграрних регіонах або як резервне джерело, а не як повну заміну нафти, газу й вугілля.

Світова енергетика протягом останніх десятиліть постійно перебуває у стані підвищеної уваги до проблеми енергетичної безпеки та потенційної кризи ресурсів. Ідея про те, що людство може стикнутися з обмеженістю енергетичних ресурсів, не є новою. Ще наприкінці XX століття, коли відбувався інтенсивний розвиток промисловості та енергетичного сектору, експерти та аналітики прогнозували, що запаси традиційних викопних

джерел енергії не безмежні. За даними опублікованих на той час розвідок, передбачалося, що запасів нафти вистачить приблизно на 30–40 років, природного газу — на 40–60 років, а вугілля — на 70–100 років. При цьому запаси урану, який використовується в ядерній енергетиці, оцінювалися як значно більш довготривалі, перевищуючи 100 років при збереженні існуючих темпів споживання.

Ці цифри, здавалося б, свідчили про наближення до межі ресурсного забезпечення енергетичних потреб світу. Проте, пройшло вже кілька десятиліть, а прогнози не тільки не підтвердилися у негативному сенсі, але й деякі з оцінок залишилися стабільними або навіть трохи зросли. Така динаміка обумовлена низкою факторів, які формують сучасний стан енергетичних ресурсів. Основним інструментом оцінки, на який орієнтуються експерти, є метрика R/P (reserves-to-production), тобто співвідношення розвіданих запасів до річного рівня споживання. Цей показник дає змогу приблизно визначити, скільки років ще вистачить певного ресурсу, якщо зберігати поточні темпи видобутку і споживання. Протягом 1987-2017 років значення метрики R/P у деяких регіонах світу та по деяких видах корисних копалин зменшувалось, по інших — зростало (див. рис.1.4) [37]. У згаданій роботі розглядають характеристики CNG (зріджений природний газ) у порівнянні з дизельним паливом, способи його застосування в автомобільних двигунах, процеси горіння, експлуатаційні параметри та вплив на екологічність двигуна двопаливного типу. Вказано, що через виснаження традиційних енергетичних ресурсів і негативний вплив на довкілля технологія двопаливних двигунів, яка поєднує дизель і природний газ, стає все більш актуальною. Вона дозволяє значно зменшити викиди твердих частинок і диму, зберігаючи ефективність дизельного спалювання. Раніше двопаливні системи використовували переважно для великих стаціонарних або транспортних двигунів (морських і локомотивних), тоді як застосування в автомобільних двигунах було обмежене через недостатню доступність альтернативних видів палива. Природний газ (CNG) підходить для

двопаливного режиму, проте при його використанні виникають технічні складнощі. Впуск газу без попереднього змішування з повітрям зменшує об'ємну ефективність і викликає втрату потужності на високих обертах. При низьких і середніх навантаженнях двигуна знижується рівень NO_x , але зростають викиди вуглеводнів та оксиду вуглецю.

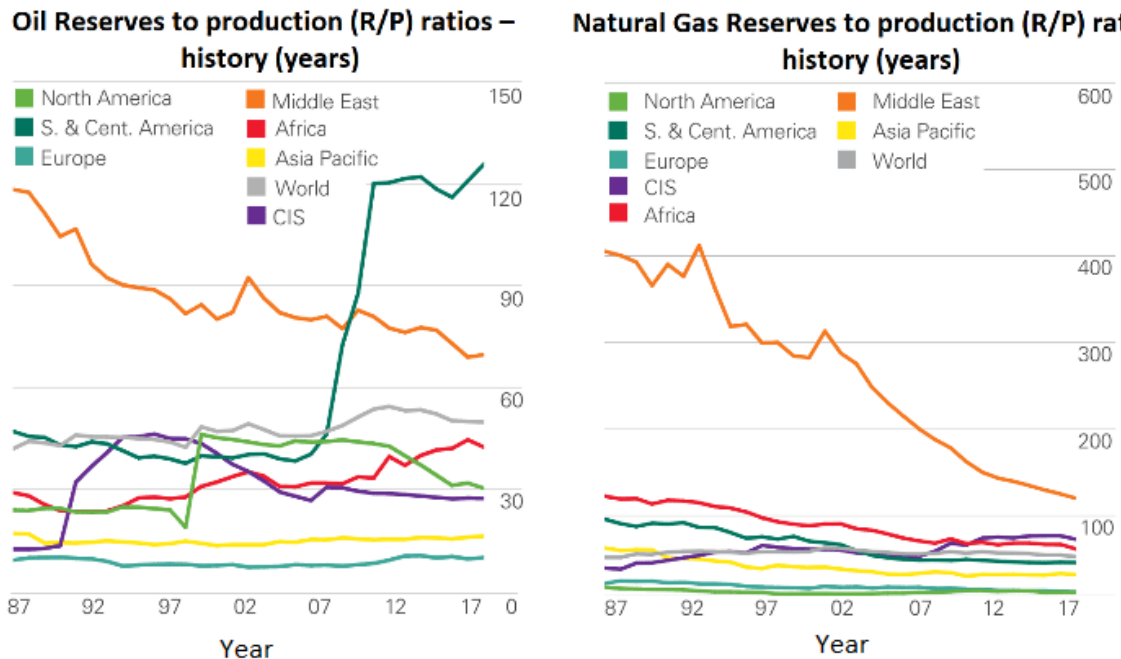


Рис.1.4 Динаміка метрики R/P [37]

Варто зазначити, що R/P є дуже динамічною величиною. Вона змінюється не лише через видобуток ресурсів, але й через відкриття нових родовищ, переоцінку існуючих запасів та впровадження новітніх технологій видобутку. Наприклад, у випадку нафти розвиток технологій глибоководного буріння, видобутку сланцевих ресурсів і інтенсивного використання вторинних методів вилучення дозволив значно розширити доступні запаси. Подібні технологічні досягнення у видобутку газу та вугілля також сприяли збереженню стабільності R/P, незважаючи на постійне зростання світового споживання енергоресурсів.

Окрім технологічного фактора, на доступність енергетичних ресурсів значно впливають політичні, економічні та соціальні чинники. Так, геополітичні кризи, військові конфлікти, санкції, обмеження на експорт або

націоналізація видобувних підприємств можуть створити ситуації штучного дефіциту, навіть якщо реальні запаси ресурсів достатні. Наприклад, нафтові кризи 1973 та 1979 років показали, що політичні рішення та ембарго можуть значно впливати на глобальні енергетичні ринки, викликаючи різке зростання цін та дефіцит палива. Схожі ефекти спостерігаються і сьогодні, коли регіональні конфлікти або обмеження на поставки газу і нафти призводять до тимчасових стрибків цін і напруженості на ринку.

Крім того, слід враховувати вплив економічного розвитку та структурних змін у світовій економіці. Зі зростанням населення та промислової активності зростає потреба у транспорті, електроенергії та теплі, що, у свою чергу, збільшує навантаження на наявні ресурси. Водночас розвиток відновлюваних джерел енергії — сонячної, вітрової, гідроенергетики, геотермальної та біоенергетики — поступово змінює баланс споживання, знижуючи залежність від викопного палива. Це також впливає на показник R/P, оскільки відстрочує використання традиційних ресурсів і, по суті, продовжує “життєвий цикл” запасів.

Особливо важливим аспектом є екологічна обмеженість використання викопного палива. Навіть якщо технічно і економічно запаси достатні, обмеження викидів парникових газів та прагнення до декарбонізації глобальної економіки ставлять додаткові рамки на використання нафти, газу та вугілля. Це означає, що частина ресурсів фактично залишатиметься невикористаною, щоб уникнути катастрофічних змін клімату та деградації екосистем.

У підсумку можна сказати, що оцінки запасів викопного палива та прогнозованого часу їхнього використання є сумішшю фізичних, технологічних і соціально-політичних факторів. Сам по собі факт того, що числові прогнози R/P залишаються стабільними протягом десятиліть, не означає, що світ повністю захищений від енергетичної кризи. Навпаки, постійне зростання споживання, політична нестабільність у регіонах

видобутку, коливання цін і глобальні екологічні обмеження роблять питання енергетичної безпеки ключовим для майбутнього розвитку цивілізації.

Таким чином, сучасна ситуація демонструє, що світ перебуває у стані постійного балансу між забезпеченістю ресурсами та ризиками їх дефіциту, де наявність технологій і запасів дозволяє уникнути миттєвої кризи, але не усуває необхідності стратегічного планування, впровадження відновлюваних джерел і енергоефективних рішень. Відтак, питання, «на скільки вистачить енергетичних ресурсів», залишається актуальним і багатоаспектним, поєднуючи фізичну наявність палива, технологічні можливості його видобутку, економічні чинники та геополітичну стабільність.

Ядерна енергетика (ЯЕ), заснована на спалюванні урану в ядерних реакторах, є однією з найбільш ефективних технологій для виробництва електроенергії без викидів CO₂ під час експлуатації. Сучасні реактори забезпечують високу потужність при відносно невеликій займаній площі, що робить їх привабливими для густонаселених регіонів і країн із обмеженими природними ресурсами. Попри це, у світі існують суттєві виклики. Основні проблеми пов'язані з високою вартістю будівництва та обслуговування АЕС, довготривалим радіоактивним забрудненням від відпрацьованого палива, а також ризиком аварій (Чорнобильська та Фукусімська катастрофи). Крім того, розвиток відновлюваних джерел енергії – сонячної і вітрової – створює конкуренцію, особливо у країнах, що прагнуть скоротити залежність від централізованих технологій. Проте ЯЕ має значні перспективи завдяки новим технологіям безпечних реакторів покоління IV, малих модульних реакторів і можливості використання торію як палива. Такі розробки знижують ризики аварій, зменшують обсяги відходів і підвищують економічну ефективність. Отже, у довгостроковій перспективі ЯЕ здатна залишатися ключовим компонентом стабільного та низьковуглецевого енергетичного балансу, особливо для країн із високим споживанням енергії та обмеженими відновлюваними ресурсами. Проте її розвиток залежить від суспільної довіри, інвестицій і міжнародних стандартів безпеки.

1.3. Роль відновлюваних джерел та перспективи зменшення екологічних ризиків

Переважна більшість економічно розвинених держав у відповідь на ріст енергетичних ризиків, виклики глобальної безпеки були змушені сформувати нові довгострокові енергетичні стратегії. Їхня головна мета полягає у забезпеченні стійкого функціонування енергетичних систем шляхом диверсифікації джерел енергії [9], підвищення рівня енергоефективності та активного впровадження технологій використання альтернативних і відновлюваних енергоресурсів. Важливою складовою цих стратегій стало створення нормативно-правової бази, яка зобов'язує енергопостачальні компанії приймати до мережі електроенергію, вироблену з нетрадиційних джерел. Це дозволило інтегрувати децентралізовані джерела генерації в національні енергетичні системи та стимулювати розвиток «зеленої» енергетики.

Для забезпечення належного рівня енергозбереження в розвинених країнах запроваджено широкий спектр економічних стимулів. Серед них — податкові пільги, пільгове кредитування, прямі дотації виробникам енергії з нетрадиційних джерел, а також державна підтримка інноваційних проєктів. Важливу роль відіграють науково-дослідні програми, фінансування яких сягає щонайменше 1 млрд доларів США щорічно. Ці програми спрямовані на вдосконалення технологій генерації, зберігання і розподілу енергії з урахуванням екологічних і соціально-економічних пріоритетів (Шпілевський, 2013).

В умовах глобалізації економічних процесів та посилення взаємозалежності світових енергетичних ринків актуальна енергетична ситуація набуває особливої складності та тривожності. Провідні держави світу — зокрема США, країни Європейського Союзу та Китай — оголосили масштабні програми, спрямовані на зниження залежності від імпорту енергоносіїв. Ключовими напрямками цих програм є розвиток видобутку місцевих нетрадиційних вуглеводневих ресурсів (зокрема сланцевого газу та

нафти) та розширення частки відновлюваних джерел енергії у загальному енергетичному балансі.

Паралельно відбувається загострення геополітичної конкуренції за доступ до енергетичних ресурсів та контроль над транспортною інфраструктурою. Так звана «війна трубопроводів» демонструє обмеженість традиційних підходів до забезпечення глобальної енергетичної безпеки [9]. Результатом стає реалізація дублюючих й економічно сумнівних інфраструктурних проєктів, у яких політичні інтереси домінують над економічною та енергетичною доцільністю.

Багато енергодефіцитних країн, керуючись міркуваннями національної безпеки, обирають стратегію встановлення ексклюзивних відносин з постачальниками первинних енергетичних ресурсів. Часто це передбачає придбання не лише готової енергетичної продукції, а й прав на розробку родовищ та контроль над видобувними активами. У короткостроковій перспективі така політика може забезпечити стабільність постачання, однак у довгостроковому вимірі вона створює ризики консервації існуючої структури енергопостачання. Це, своєю чергою, може гальмувати технологічну модернізацію як країн-імпортерів, так і експортерів ресурсів, знижуючи їхню гнучкість у відповідь на зміни світового енергетичного середовища.

Перелік відновлюваних джерел енергії можна представити відповідно до їх глобального технічно досяжного енергетичного потенціалу (оцінки за даними Міжнародного енергетичного агентства, IRENA, ООН). Орієнтовно вони розташовуються так:

Сонячна енергія – має найбільший потенціал серед усіх ВДЕ; теоретично сонячна радіація, що надходить на Землю, у тисячі разів перевищує сучасні потреби людства.

Вітрова енергія – друге за значенням джерело; великі перспективи як на суходолі, так і на шельфі (офшорні вітрові електростанції).

Гідроенергія – найбільш освоєне відновлюване джерело, однак глобальний потенціал уже значною мірою використаний (понад 70 % технічно придатних ресурсів).

Біоенергетика (біомаса, біогаз, біопаливо) – значний, але обмежений сталими темпами відновлення біомаси та конкуренцією з аграрним сектором.

Геотермальна енергія – потенціал локалізований у регіонах з високою тектонічною активністю (Ісландія, Італія, Філіппіни, США).

Припливна та хвильова енергетика, енергія морських течій – перспективні, але ще технологічно малорозвинені джерела; реальний внесок поки що обмежений.

Енергія океанічних термальних градієнтів (ОТЕС) – має значний теоретичний потенціал, однак перебуває на стадії експериментальних розробок.

Для окремих регіонів співвідношення потенціалів різних відновлюваних джерел енергії може істотно відрізнятися від загальносвітових тенденцій. Це зумовлено природно-географічними, кліматичними, геологічними та соціально-економічними особливостями території.

Наприклад, в Ісландії провідну роль відіграє геотермальна енергетика, оскільки країна розташована в зоні активного вулканізму та тектонічних розломів. Геотермальні ресурси тут забезпечують значну частину потреб у теплопостачанні та виробництві електроенергії. Водночас потенціал сонячної енергетики обмежений через північне розташування та значну тривалість темного періоду року, а вітрова енергетика, хоч і перспективна, займає другорядне місце через пріоритет геотермальних проєктів.

Аналогічно, у країнах із великими річковими системами (наприклад, Бразилія, Норвегія, Канада) гідроенергетика є базовим джерелом відновлюваної енергії, тоді як у пустельних і субтропічних регіонах (Північна Африка, Близький Схід, південний захід США) домінує сонячна енергетика, доповнена вітровими установками.

Таким чином, структура використання ВДЕ має регіональну специфіку, яка визначає пріоритети енергетичної політики, вибір технологій та обсяги інвестицій у відповідні галузі. Це підкреслює важливість проведення регіональних оцінок потенціалу відновлюваних ресурсів для формування ефективних стратегій енергетичного розвитку.

Для України у першу чергу застосовний досвід Європейського Союзу через схожість природних і кліматичних умов. Протягом останнього року Європейський Союз не лише зберіг стратегічний курс на декарбонізацію, а й суттєво прискорив трансформаційні процеси в економіці та промисловості, розглядаючи їх як ключовий чинник зміцнення енергетичної незалежності та безпеки. Восени 2022 року на позачерговому засіданні Ради ЄС з питань транспорту, телекомунікацій та енергетики особливу увагу було приділено зменшенню залежності від викопних енергоресурсів, зокрема з Російської Федерації, а також необхідності пришвидшення декарбонізації енергетичної системи ЄС.

У кризових умовах 2022 року Європа послідовно реалізує дві взаємопов'язані стратегічні лінії у сфері енергетики [1]:

- Диверсифікацію, що передбачає розширення та збалансування структури джерел енергії з метою підвищення стійкості та безпеки енергетичної системи;
- Декарбонізацію, спрямовану на поетапну відмову від традиційних джерел енергії (природний газ, нафта, кам'яне вугілля, торф), скорочення викидів вуглекислого газу та активне впровадження відновлюваних джерел енергії — сонячної, вітрової, припливної, біоенергетики тощо.

Фактично, сучасний кліматичний енергетичний перехід є першою в історії людства свідомою трансформацією, коли суспільство цілеспрямовано переходить від більш енергетично щільних, але невідновлюваних ресурсів до менш ефективних у короткостроковому вимірі, проте екологічно стійких і відновлюваних джерел енергії. Такий вибір відображає зміну пріоритетів від

максимізації короткотермінової ефективності до забезпечення довгострокової безпеки, екологічної збалансованості та технологічної автономії.

У лютому 2022 року ЄС ухвалив так звану «Зелену таксономію», яка визначає перелік низьковуглецевих джерел енергії. Важливим елементом майбутньої енергетичної системи визначено екологічно чистий водень. Згідно з Європейською водневою стратегією (2020), розрізняють три основні типи водню [1]:

- «Зелений» — виробляється електролізом води з використанням енергії ВДЕ;
- «Блакитний» — отримується з природного газу з уловлюванням і зберіганням CO₂;
- «Сірий» — виробництво супроводжується викидами CO₂ в атмосферу.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, прогнозна потреба у водні для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року скоригована з 530 млн т (2021 р.) до 450 млн т (2022 р.), тобто на 15 % менше. Частка «блакитного» водню у прогнозах зменшена з 38 % до близько 21 %, тоді як основний обсяг — понад 330 млн т — планується виробляти шляхом електролізу. Для цього вже до 2030 року необхідно забезпечити роботу електролізерів загальною потужністю близько 720 ГВт.

Оцінка впливу переходу з традиційних джерел енергії на відновлювані на екологічні ризики зазвичай проводиться кількісно через

- ✓ показники викидів,
- ✓ екологічний слід та
- ✓ ризики для здоров'я населення.

Розглянемо деякі приклади:

Викиди парникових газів та шкідливих речовин. Ключовим показником є зменшення викидів CO₂, NO_x, SO₂, твердих часток (PM_{2.5}/PM₁₀). Нехай електростанція на вугіллі потужністю 500 МВт викидає близько 3,5 млн тонн

CO₂ на рік. Встановлення сонячної або вітрової генерації такої ж потужності зменшує ці викиди майже до нуля. Кількісна оцінка дає 100 % зниження викидів парникових газів та шкідливих речовин. Зауважимо, що інші альтернативи, наприклад перехід на біогаз, можуть давати менший або відмінний ефект; зокрема при цьому викиди оксидів сірки і азоту можуть знизитись, а викиди вуглекислого газу і метану – навпаки зрости.

Екологічний слід та забруднення повітря – можна оцінити кількість еквівалентних забруднень на одиницю виробленої енергії. Для прикладу розглянемо виробництво 1 МВт·год енергії на вугіллі. При цьому викиди орієнтовно становлять 0,9 кг SO₂, 0,6 кг NO_x, 0,4 кг РМ. Встановлення сонячної панелі для виробництва тієї ж 1 МВт·год зменшує ці значення до 0,05–0,1 кг (виключно за рахунок виробництва панелей).

Ризики для здоров'я – зниження забруднення безпосередньо зменшує рівень хронічних захворювань, смертність та витрати на охорону здоров'я. Приклад: заміна енергоблоків на вугіллі в Львівській області на сонячні або біоенергетичні потужності може знизити концентрацію дрібних часток РМ_{2.5} на 30–50%, що відповідно зменшує кількість респіраторних хвороб та передчасних смертей.

Очікується [8], що подальший розвиток енергетики відбуватиметься насамперед за рахунок відновлюваних джерел енергії та поступового розширення атомної енергетики, що забезпечить стабільне та безпечне енергопостачання. У більш віддаленій перспективі перспективним напрямом є освоєння термоядерної енергії, яка потенційно здатна забезпечити майже необмежене джерело чистої енергії. Одночасно слід враховувати роль енергоефективних технологій, цифровізації енергомереж та інтеграції «розумних» систем управління, що дозволить підвищити ефективність використання всіх типів джерел енергії та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Системи моніторингу якості атмосферного повітря

Системи моніторингу якості атмосферного повітря — це організовані у єдину систему комплекси технічних засобів, методів і процедур, призначені для неперервного або періодичного спостереження за станом повітряного середовища, збору та аналізу даних про рівень забруднення, а також для інформування населення й органів влади (В. Бахарєв, 2018; О. Ткачук, О. Мазур, 2024; Karagulian et al., 2019; Motlagh et al., 2020).

Сьогодні існує велике різноманіття систем моніторингу, які можна класифікувати за ознаками, наведеними у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Класифікація систем моніторингу

Критерій	Види систем
Масштаб дії	Глобальні, національні, регіональні, локальні
Тип організації	Державні, муніципальні, відомчі, громадські
Режим роботи	Безперервні (автоматизовані) / періодичні (ручний відбір проб)
Призначення	Контроль за дотриманням нормативів, наукові дослідження, прогнозування, оповіщення

Основна мета систем моніторингу

- ✓ Виявлення та контроль концентрацій шкідливих речовин у повітрі.
- ✓ Оцінювання стану атмосферного повітря порівняно з гранично допустимими нормативами.
- ✓ Виявлення тенденцій та прогнозування можливих змін якості повітря.
- ✓ Забезпечення прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля, планування міст, промислової політики тощо.
- ✓ Оповіщення населення про небезпечні рівні забруднення та ризики для здоров'я.

Основні складові системи моніторингу:

- Спостережна мережа (пости моніторингу)
- Засоби вимірювання
- Система збору, передавання та збереження даних
- Аналітичні та програмні модулі
- Система інформування та оповіщення

У цій роботі аналіз якості атмосферного повітря було виконано на основі даних із глобальних мереж (Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network [50]), національних (Міндовкілля, Гідрометслужба – Український гідрометеорологічний центр [16]) і регіональних баз даних (Головне управління статистики у Львівській області [6]).

Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network — це глобальна мережа сенсорів для моніторингу якості атмосферного повітря в реальному часі. Її основна мета – забезпечити детальне, оперативне та доступне спостереження за станом повітря у різних частинах світу [50]. На рис. 2.1. зображено стартову сторінку сайту цієї системи.

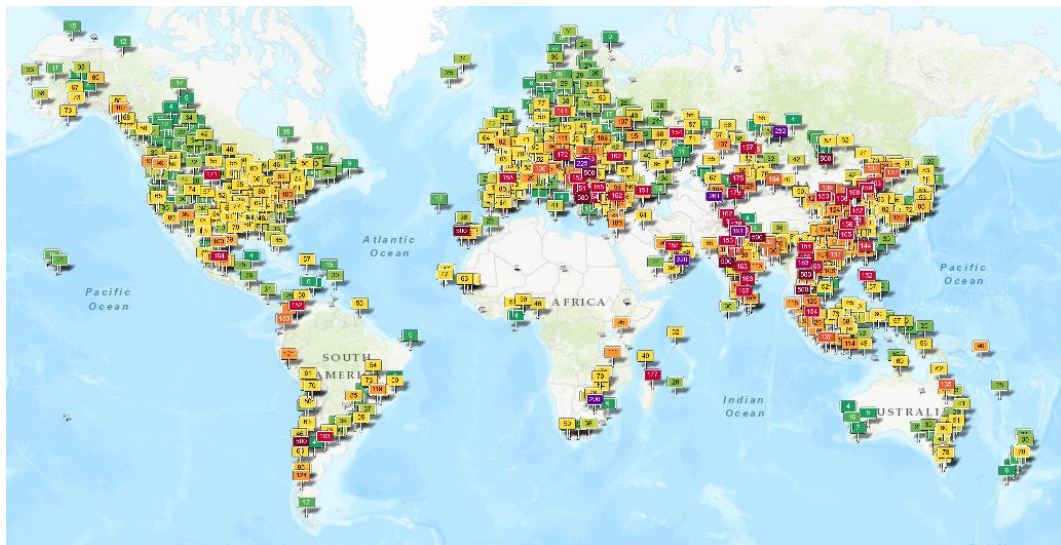


Рис.2.1. Розміщення станцій Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network – стартова сторінка сервісу <https://aqicn.org/station/> [50]

Аналіз системи показує, що мережа станцій вкриває зараз більшість континентів світу. Станціями спостереження за якістю повітря фактично не охоплені залишаються значні простори Африки (за винятком індійського

узбережжя та кількох станцій на Атлантичному узбережжі), Сибіру у РФ, півночі Канади і центру Південноамериканського континенту. Також мало пунктів спостереження у Австралії, за винятком тихоокеанського узбережжя та декількох ділянок на індійському узбережжі. Крім того, у онлайн режимі можна спостерігати, що на момент отримання цього зображення (жовтень 2025) найгірша якість повітря була у країнах Азії (Китай, Індія), у Східній та Центральній Європі (домінують червоні рівні якості). Також жовті показники було помітно у центральній частині США. Натомість варто відзначити, що найкраща якість повітря глобально у Канаді, Скандинавії, на західному узбережжі Австралії.

Розглядаючи більш детально розміщення станцій моніторингу в нашому регіоні (див. рис. 2.2), слід відмітити, що в Україні мережа цих станцій є доволі щільною, хоча меншою аніж у Туреччині та центральній Європі.

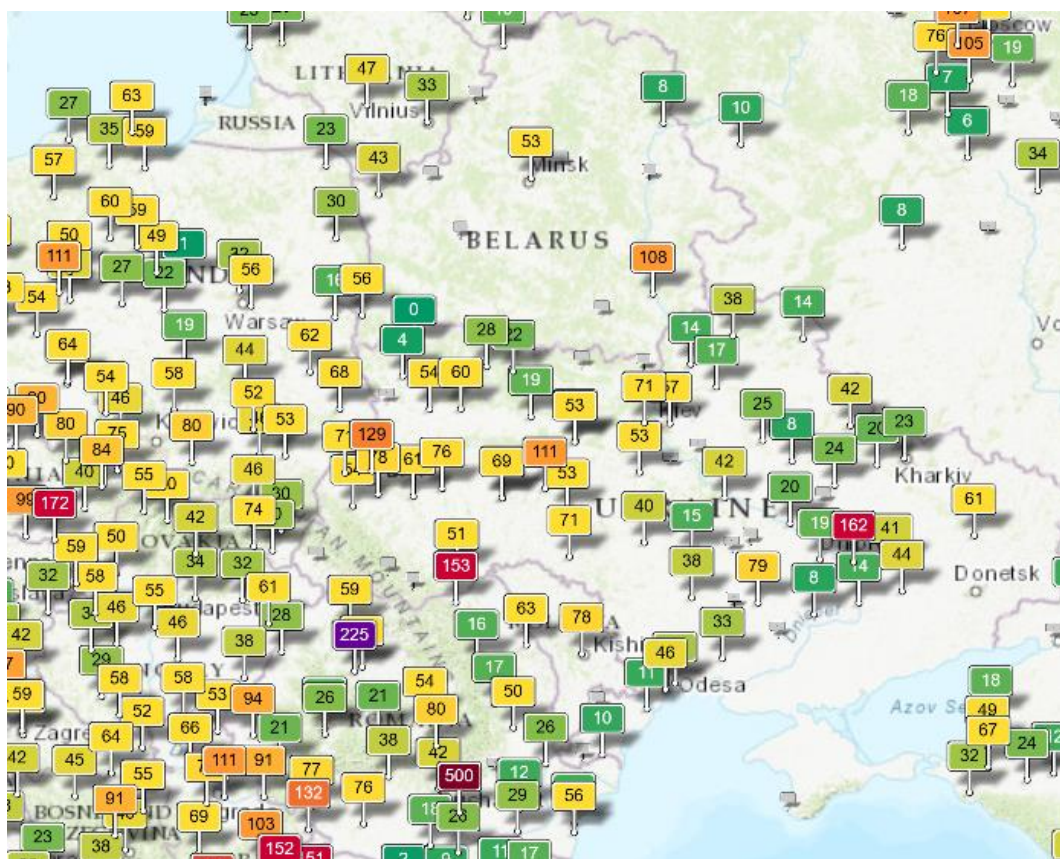


Рис.2.2. Розміщення станцій Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network в Україні та у сусідніх країнах

Деякі частини нашої країни мають низьку щільність станцій цієї мережі моніторингу: це частина України, що розміщена у Карпатах та райони, що межують із Молдовою. Зовсім відсутні станції у Криму та на окупованих територіях. Мало станцій у Молдові (7 штук у Кишиневі і одна на кордоні з Румунією). На території Білорусі налічується порядку шести станцій спостереження. У РФ станцій чимало, але щільність їх мережі низька, вони зосереджені переважно в районі Москви. Зовсім такі станції відсутні у Калінінградській області, доволі небагато їх у Польщі у воєводстві, що прилягає до цієї області.

У цій роботі нас найбільше буде цікавити стан якості повітря у західних областях України (передусім у Львівській) та у сусідній Польщі. Вплив стану атмосферного повітря в Польщі на якість повітря у Львівській та інших західних областях України є реальним і суттєвим, особливо у холодний період року. Це пов'язано з поєднанням метеорологічних, географічних та антропогенних чинників. У середніх широтах Європи переважають західні та північно-західні вітри, які приносять повітряні маси з території Польщі в бік західних областей України (Львівська, Волинська, Закарпатська, Івано-Франківська). Забруднюючі речовини, особливо дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$ і PM_{10} , можуть переноситися на сотні кілометрів, не втрачаючи концентрації. Такі переноси можуть тривати від кількох годин до 1–2 діб, залежно від швидкості та напрямку вітру, температурної стратифікації атмосфери та наявності опадів. Наслідок: коли в Польщі підвищений рівень забруднення (наприклад, під час смогу), у прикордонних українських регіонах також фіксуються одночасні піки концентрацій пилу та газоподібних домішок.

Рис. 2.3 змогу відстежити розміщення вже окремих станцій моніторингу у регіоні, що нас цікавить. Легко побачити, що щільність розміщення станцій у Львівській області суттєво переважає кількість та щільність таких станцій у Волинській, Тернопільській, Івано-Франківській та Закарпатській областях і незначно поступається щільності станцій у Польщі та Словаччині.

На момент спостереження найнижчий показники забруднення (9-13) у трикутнику Польща–Львівська область–Словаччина: тут маємо чисте повітря – зелений рівень індексу забруднення. Трохи гірша ситуація у інших регіонах Польщі й України – переважно індекс якості перебуває у жовтому діапазоні (від 42 до 70), набагато гірша ситуація у Львові (129) та місті Pilotów (околиці Кракова, 497). Також червоний рівень забруднення у місті Jaska Malczewskiego, Kielce (151).

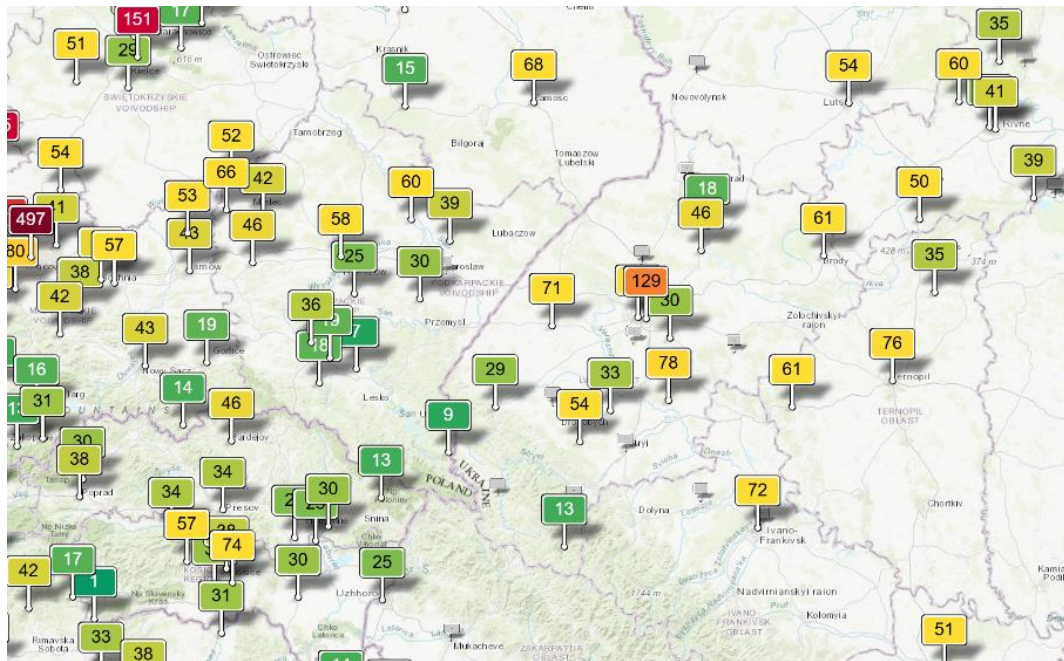


Рис.2.3. Станції Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network на Львівщині, у сусідніх областях та у Республіці Польща

Між центром Львівщини і кордоном РП перебувають два невеликих містечка (Судова Вишня, 71 та Старий Самбір, 29), якість повітря у яких ймовірно буде значно залежати від руху повітряних мас через кордон, адже у цих містах та їхніх околицях відсутні великі підприємства, електростанції та значні транспортні потоки, що б впливали на якість повітря (про Львів та станції у Львові такого сказати не можна, бо тут є власні потужні джерела забруднення – див. дані ГУСуЛО [6]).

Зауважимо, що крім Worldwide Air Quality AirNet Sensor Network (WAQ ASN) можна скористатись і іншими сервісами, наприклад SaveEcoBot [19]. На рис.2.4 показано карту Львівщини, отриману за допомогою даного сервісу. Бачимо, що тут присутні дані з тих самих станцій і з близькими

показниками (Судова Вишня – 64, Старий Самбір – 28; через дрібний масштаб на рисунку відображаються неякісно). На відміну від попередньої мережі, сервіс SaveEcoBot надає далі лише в межах України. Фактично використовуються дані тих же сенсорів. Деякі елементи інтерфейсу кращі у SaveEcoBot, інші у WAQ ASN. Зокрема остання надає миттєві річні дані по різних країнах, а перший – дані за декілька днів і лише в Україні.

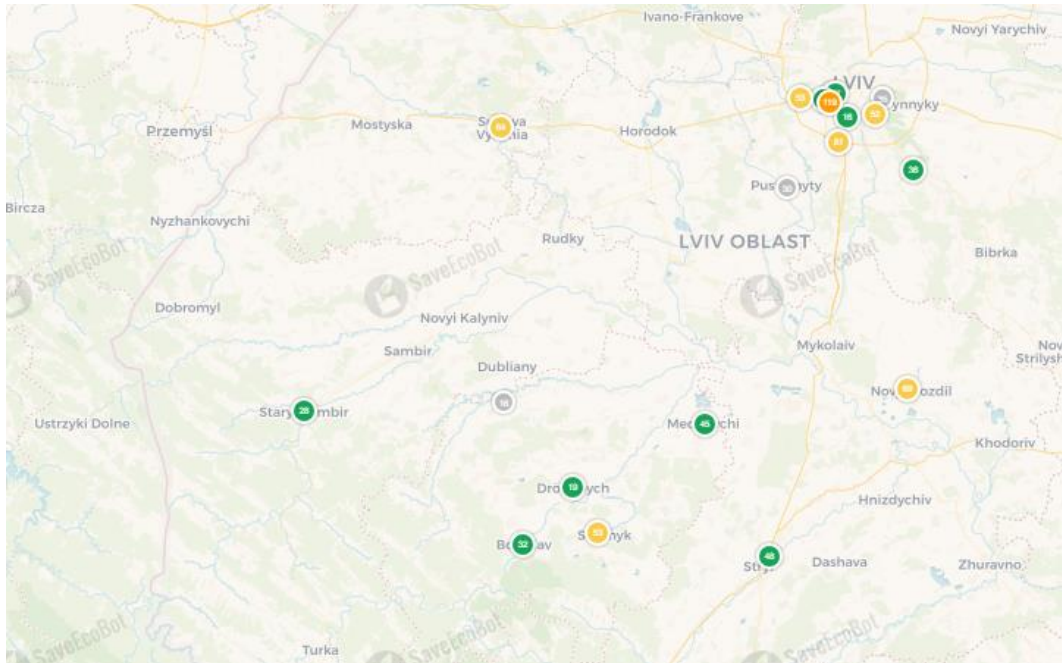


Рис.2.4. Дані мережі saveecobot

Порівняти інформаційну картку цих двох сервісів можна за допомогою рис. 2.5. Як бачимо, цих два зображення, отримані із мінімальним інтервалом у декілька хвилин, показують приблизно однаковий рівень якості повітря і стосуються одного населеного пункту (а саме м. Старий Самбір у Львівській області), де пункт моніторингу розташований на вул. Лева Галицького, 40.

Також нижче відображається зміна кількох показників упродовж двох останніх діб. Зрозуміло, що можна отримати доступ до більш повної інформації, вибравши «детальна інформація» ліворуч чи «click for more information» праворуч. Разом з тим другий сервіс є зручніший, оскільки він дозволяє динамічно відображати унизу інформаційної картки річні дані, що є зручно для аналізу сезонних коливань рівня забруднення повітря. Варто відзначити, що у даному конкретному випадку дані за листопад, січень,

більшу частину березня відсутні як і дані за більшість днів у грудні. Тобто, по окремих пунктах спостереження можуть бути відсутні дані за певні значні проміжки часу, що потрібно враховувати при виборі даних для дослідження.

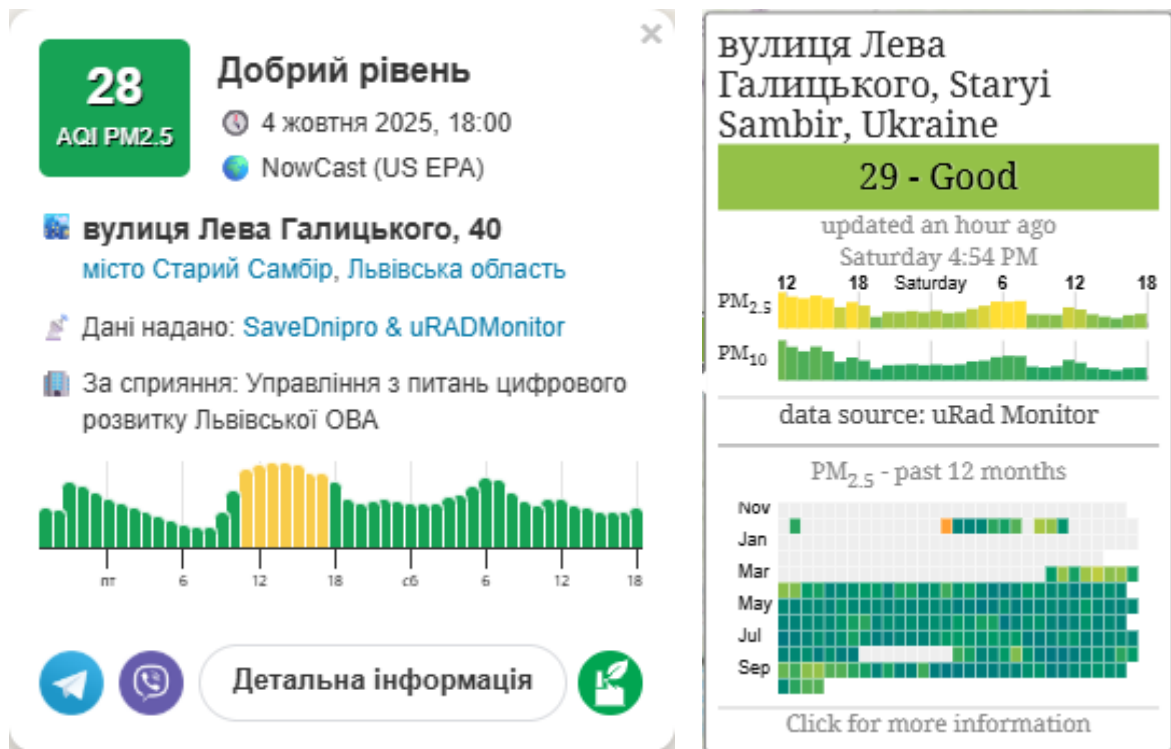


Рис.2.5. Інформаційна картка даних пункту моніторингу (ліворуч SaveEcoBot, праворуч WAQ ASN)

Відзначимо також, що тут також наведено мережу моніторів звідки отримано дані, у даному випадку **uRad Monitor** (www.uradmonitor.com/). У інших випадках джерелом може бути **SaveDnipro** (www.saveecobot.com/platform/save-dnipro), **ЛУН Micro** (www.saveecobot.com/platform/lun_misto), **Citizen Science project sensor.community** та інші.

uRADMonitor — це міжнародна мережа автоматизованих станцій для моніторингу стану довкілля, насамперед якості атмосферного повітря та радіаційного фону, яка поєднує власні датчики, онлайн-платформу та глобальну спільноту користувачів. Заснована інженером Radu Motisan у Румунії (приблизно з 2012 року). Початково проєкт був орієнтований на вимірювання радіаційного фону після аварії на Фукусімі, а згодом зріс до моніторингу повітря та кліматичних параметрів. Назва «uRAD» походить від universal radiation / air data monitor

Дані з усіх станцій з усього світу надходять у єдину базу й відображаються на інтерактивній карті <https://www.uradmonitor.com>. Інформація доступна у реальному часі, з історією вимірювань, графіками та експортом. Користувачі можуть купувати станції, встановлювати їх у себе вдома чи в установах і підключати до глобальної мережі. Станції uRADMonitor встановлені більш ніж у 40 країнах світу, зокрема в країнах ЄС, США, Канаді, Індії, Україні тощо. У Польщі, Румунії та Україні існують локальні мережі, що доповнюють державні системи спостереження. Дані можуть інтегруватися з відкритими платформами (наприклад, Sensor.Community, OpenAQ) або використовуватися самостійно.

Отже, uRADMonitor — це глобальна мережа недорогих, але точних станцій, що вимірюють радіаційний фон та якість повітря, передають дані онлайн і формують відкриту екологічну інфраструктуру, корисну як для громадян, так і для фахівців та державних структур. Такі мережі надзвичайно корисні та їхня кількість і якість стрімко зростають останнім часом (див. Karagulian et al., 2019).

uRADMonitor виробляє власні прилади різних моделей (наприклад, Model A, Model B, Model D, Model SMOGGIE), які можуть вимірювати:

- Радіаційний фон (γ-випромінювання, мкЗв/год).
- Концентрації пилу — PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0}.
- Газоподібні забруднювачі — NO₂, SO₂, CO, O₃, VOC, формальдегід тощо.
- Метеопараметри — температура, вологість, атмосферний тиск, рівень шуму.

Вимірювані параметри у мережі AirNet можуть включати:

- концентрації твердих частинок (PM₁₀, PM_{2.5});
- газоподібні забруднювачі (NO₂, SO₂, CO, O₃, VOC тощо);
- метеорологічні дані (температура, вологість, тиск, швидкість вітру).

Для мережі AirNet характерна висока частота оновлення — дані надходять з інтервалом від 1 хвилини до 1 години.

Деякі мережі, наприклад дані надані Департаментом екології та природних ресурсів Львівської ОВА, можуть містити дані про рівень озону та інших речовин. Якщо пунктів, що визначають показники $PM_{2,5}$ на Львівщині декілька десятків, то рівень озону можна визначити лише на кількох станціях:

- місто Борислав (вулиця Тараса Шевченко, 42)
- село Шабельня (вулиця Польова)
- місто Стрий (вулиця Ольги Басараб, 15)
- село Сокільники (вулиця Зубрівська, 27)

ще 4 пункти є у Івано-Франківській області, декілька пунктів у Кривому Розі та чимало станцій у Києві.

Якщо вибрати задачу моніторингу рівню CO , то залишаються в усій Україні лише чотири станції на Івано-Франківщині (міста Калуш і Бурштин, села Ямниця та Тустань) та станції у Києві. Ці станції об'єднано у мережі Управління екології та природних ресурсів Івано-Франківської ОВА та Київської міської державної адміністрації відповідно і їх дані можна отримати через SaveEcoBot [19].

Вміст газів SO_2 та NO_2 надають переважно ті ж станції, що моніторять вміст O_3 за певними винятками (станції Кривого Рогу вміст оксиду азону моніторять, а оксиду сірки — ні; також вибірковий моніторинг є у станцій міста Києва).

Таким чином, база аналізу якості повітря за вмістом пилу різних фракцій та індексом якості є доволі детальна, тоді як постійного і всеохоплюючого моніторингу вмісту NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , VOC (леткі органічні сполуки — бензол, ацетон, ефіри тощо), формальдегіду немає, як і вмісту аміаку, хлору, сірководню, закису азоту, метану, радону та деяких інших.

2.2. Методи та індикатори оцінки якості повітря

Для оцінки якості повітря використовують переважно фізико-хімічні методи вимірювань та біоіндикаторні методи. Для отримання повної картини ці спостереження не повинні бути ізольованими, тому їх об'єднують завдяки мережам моніторингу якості повітря (Стаціонарні державні мережі, напр. GIOŚ у Польщі, MENR в Україні, локальні муніципальні станції, громадські сенсорні мережі, напр. AirNet, uRadMonitor). Метеорологічні та дисперсійні моделі враховують вітер, температуру, вологість, висоту змішування тощо для моделювання поширення забруднювачів у просторі та часі. Такі моделі застосовуються для прогнозів, ретроспективного аналізу та оцінки впливу джерел у поєднанні із даними сенсорних мереж, що надають просторово-часове покриття та дають змогу обчислювати індекси якості повітря. Усе більше зростає роль дистанційного зондування (супутникове та наземне), яке використовується для оцінки фонових концентрацій, транспортних потоків забруднення та покриття великих територій. Воно доповнює дані наземних вимірювань, особливо в місцях без станцій.

Фізико-хімічні методи вимірювань використовують як стаціонарні, так і мобільні лабораторії для безпосереднього вимірювання концентрацій забруднювачів (NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, VOC тощо). Вони можуть бути автоматизовані (безперервний моніторинг) або періодичні (відбір проб з подальшим аналізом у лабораторії). Їх доповнюють біоіндикаторні методи, а саме використання стану рослин, лишайників або інших організмів як індикаторів довготривалого впливу забруднення. Останні дають інтегральну оцінку екологічного навантаження, особливо для важких металів та газів.

Сучасні фізико-хімічні методи вимірювання концентрацій забруднювачів відзначаються високою точністю та оперативністю, але ці характеристики залежать від типу приладу, середовища та речовини, яку вимірюють. Автоматизовані стаціонарні аналізатори (референсні / сертифіковані) мають точність вимірювань, що характеризується похибкою вимірювань зазвичай $\pm 5\text{--}10\%$ або краще від реального значення. Вони переважно відповідають

стандартам ЄС (EN), США (EPA), ВООЗ. Для $PM_{2.5}/PM_{10}$ застосовують стандартні гравіметричні або TEOM/ β -absorption методи; для газів — УФ-, ІЧ- та хемілюмінесцентні детектори. Сучасні лабораторні методи відбору проб мають вищу точність (дуже висока для специфічних сполук (особливо для VOC, важких металів, діоксинів тощо), бо проби аналізують у лабораторіях з використанням хроматографії, мас-спектрометрії тощо; похибка може бути менше 2-5 % при належному калібруванні, проте мають порівняно низьку оперативність: результати отримують через дні або тижні, бо потрібен відбір, транспортування й аналітика. Їх використовуються для ретроспективних оцінок, валідації сенсорів і складу частинок.

Для інформування населення та широких мас громадськості доцільно використовувати спрощені шкали, наприклад кольорова легенду індексу якості повітря. Air Quality Index (AQI) Scale and Color Legend – це шкала індексу якості повітря та пов’язана з нею кольорова легенда, яку використовують для швидкого і наочного інформування населення про стан повітря.

AQI – числовий показник, що інтегрує концентрації основних агентів забруднення повітря (NO_2 , SO_2 , CO, O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, VOC тощо) у зручну для сприйняття шкалу. Він дозволяє визначити ступінь небезпеки повітря для здоров’я людей. Зазвичай шкала AQI коливається від 0 до 500 (у США) або до 200–300 у деяких країнах; чим вище число, тим гірша якість повітря.

Щоб швидко передавати інформацію, AQI зазвичай поєднують із кольоровими категоріями, що відображають рівень небезпеки, як показано у табл.2.2.

Для обчислення індексу AQI зазвичай використовують не всі можливі забруднювачі, а лише основні, які мають прямий і добре вивчений вплив на здоров’я, наприклад леткі органічні сполуки зазвичай опускають: AQI розраховують для кожного забруднювача окремо, потім береться максимум значення серед них як загальний AQI для конкретної локації. Зрозуміло, що якщо якийсь із показників немає змоги фіксувати – його просто опускають. Тому значення AQI може бути дуже неповне.

Таблиця 2.2. Індекс якості повітря

Категорія (англ.)	Приблизний AQI	Значення для здоров'я	Колір
Good	0–50	Повітря чисте, безпечне	Зелений
Moderate	51–100	Задовільно; чутливі групи можуть відчувати легкий дискомфорт	Жовтий
Unhealthy for Sensitive Groups	101–150	Можуть постраждати діти, люди з хворобами серця або легень	Помаранчевий
Unhealthy	151–200	Вплив на здоров'я значний для всіх	Червоний
Very Unhealthy	201–300	Високий ризик для всіх	Фіолетовий
Hazardous	301–500	Серйозний ризик, небезпечно	Темно-фіолетовий / бордовий

Один із найбільш важливих показників забруднення є PM2.5. PM2.5 за визначенням — це частинки менші за 2,5 мікрметра, тому вони, безумовно, також входять у категорію частинок менших за 10 мікрметрів (PM10), отже чисто математично має бути $PM2.5 \leq PM10$, проте зазвичай є навпаки.

Це тому, що припущення щодо порядку концентрацій є неправильним: концентрація PM2.5 може бути меншою за PM10, але при цьому перетворене значення AQI для PM2.5 може бути вищим. Наприклад: AQI = 50 для PM2.5 відповідає $15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, тоді як AQI = 50 для PM10 відповідає $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Тому навіть якщо всю концентрацію PM2.5 ($15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) додати до PM10, AQI для PM10 все одно залишатиметься значно нижчим, ніж для PM2.5. Наприклад, коли в Dong Cheng Dong Si (东城东四) концентрація PM10 становила $366 \mu\text{g}/\text{m}^3$, що дало AQI = 216, а концентрація PM2.5 — $348 \mu\text{g}/\text{m}^3$, що дало AQI = 398.

Чому AQI для PM2.5 може бути вищим – AQI не вимірює просто концентрацію, він перетворює масу забруднювача ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) у шкалу ризику для здоров'я. Поріг ризику для PM2.5 нижчий, ніж для PM10. Тобто за тією ж масою частинок дрібніші частинки завдають більшого ризику, тому AQI швидше «зростає».

Приклад:

$\text{PM}_{2.5} = 15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow \text{AQI} = 50$ (умовно «помірно»).

$\text{PM}_{10} = 55 \mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow \text{AQI} = 50$.

Отже, менша концентрація дрібних частинок може давати вищий AQI, ніж більша концентрація великих частинок. AQI перетворює концентрації на шкалу ризику, а не просто порівнює масу частинок.

Також важливо мати на думці, що показник PM2.5 дуже варіабельний за вітряної погоди: за вітру середньої інтенсивності зазвичай достатньо до 30 хв щоб суттєво замінити повітря у локації.

Концентрації NO_2 , SO_2 , CO здаються низькими – ці гази в атмосфері зазвичай мають низькі абсолютні концентрації порівняно з дрібнодисперсними частинками ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}). Але навіть такі «низькі» значення можуть мати серйозний вплив на здоров'я при тривалому або піковому впливі.

NO_2 : основний газ, що виділяється транспортом, електростанціями та промисловими процесами. Впливає на дихальні шляхи, підвищує ризик астми, хронічних бронхітів, і сприяє утворенню озону та вторинних аерозолів. SO_2 : виділяється при спалюванні викопного палива (вугілля, нафта), може подразнювати дихальні шляхи та спричиняти кислотні дощі. CO : токсичний газ, що погіршує перенос кисню кров'ю, особливо небезпечний для людей із серцево-судинними захворюваннями. Вибір NO_2 як прикладу обумовлений його поширеністю в містах, високою токсичністю і тим, що він часто використовується як індикатор транспортного забруднення. Вимірювання NO_2 дозволяє оцінити вплив автотранспорту та планувати заходи для покращення якості повітря.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Загальна характеристика якості атмосферного повітря

Стан повітря Львівщини

На якість атмосферного повітря регіону впливають природні та антропогенні фактори, які визначають як склад забруднюючих речовин, так і їхню концентрацію та просторово-часовий розподіл. До основних належать: промислові викиди (від стаціонарних джерел – теплоелектростанції (Добро-твірська і Львівська ТЕС-1), підприємства хімічної (JSC Lviv Chemical Plant, Компанія «Śnieżka», Стебницьке державне гірничо-хімічне підприємство «Полімінерал», Роздільське ДГХП «Сірка», Дрогобицький солевиварювальний завод «Саліна»), металургійної (відсутні), цементної (ПрАТ «Миколаїв-цемент») промисловості тощо); транспорт — особливо автомобільний, який є джерелом оксидів азоту, чадного газу, дрібнодисперсного пилу та летких органічних сполук; комунально-побутовий сектор — опалення приватних будинків твердим паливом, спалювання відходів, робота котелень; сільське господарство — викиди амоніаку, пилу з полів, продукти згоряння від спалювання стерні; природні джерела забруднення— пилові бурі, лісові пожежі, біогенні викиди, вивітрювання ґрунтів. Також варто пам'ятати про метеорологічні та географічні умови — швидкість і напрямок вітру, температура, інверсії, рельєф, наявність гір або долин, що впливають на розсіювання або накопичення забруднень; транскордонний перенос забруднень — переміщення повітряних мас з сусідніх регіонів чи країн, що може суттєво впливати на якість повітря навіть за відсутності локальних джерел. У сукупності ці чинники формують реальний стан атмосферного повітря, який може значно відрізнятися в різні сезони, пори доби та метеоумови.

Згідно даних ГУСуЛЮ у 2024 році у повітря Львівщини викинуто 55 374 тон забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення, у тому числі [6]: метали та їх сполуки – 21, метан – 29 399, неметанові леткі

органічні сполуки – 1 871, оксид вуглецю – 4 115; діоксид та інші сполуки сірки – 9 694 (у т.ч. діоксид сірки – 9 609); сполуки азоту – 3 164 (у т.ч. діоксид азоту – 2 894, оксид азоту – 46). Речовин у вигляді твердих суспендованих частинок викинуто 7 059 т. порівняно із попереднім, 2023 роком маємо зменшення в усіх категоріях, окрім метану (його викиди практично не змінилися) та речовини у вигляді твердих суспендованих частинок (їх викиди зросли із 3,7 тис.тон до 7,1 тис. тон).

За показниками індексу якості повітря стан повітряного басейну перебуває переважно у доброму (Good – зелений сектор, індекс від 0 до 50) та посередньому (Moderate – жовтий сектор, індекс від 51 до 100), рідше у нездоровому для чутливих груп (Unhealthy for Sensitive Groups – оранжевий сектор, індекс від 101-150) статусі.

На рис.3.1-3.5 наведено річну динаміку таких показників як тверді частинки (аерозолі) . Це один з найважливіших показників, особливо для міських територій: PM_{10} — частинки діаметром ≤ 10 мкм; проникають у верхні дихальні шляхи; $PM_{2.5}$ — дрібні частинки ≤ 2.5 мкм; проникають глибоко в легені, потрапляють у кров; PM_1 — ультрадрібні частинки, що можуть проникати у клітини та мозок.

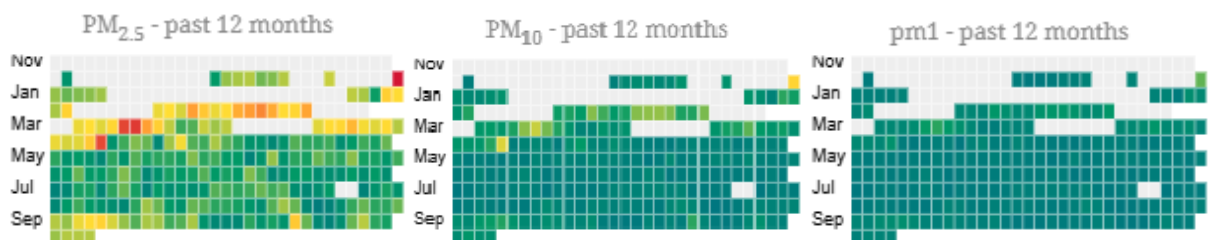


Рис.3.1. Показники пилу у Судовій Вишні $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{1.0}$

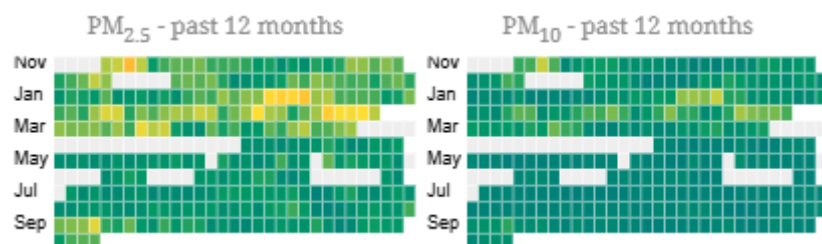


Рис.3.2. Показники пилу на вул. Городоцькій у Львові $PM_{2.5}$, PM_{10}

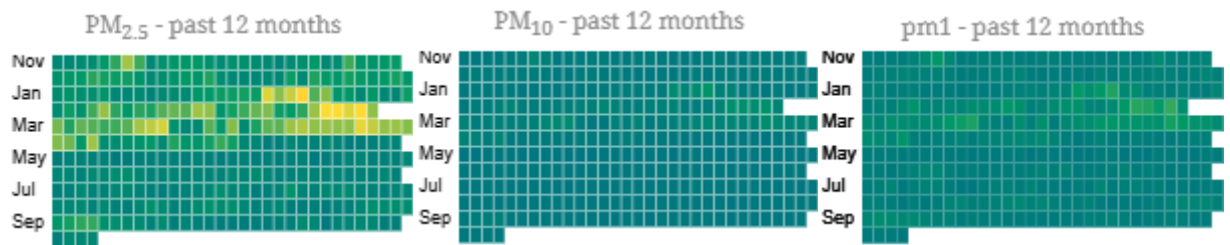


Рис.3.3. Показники пилу на вул. Стрийській у Львові $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{1.0}$

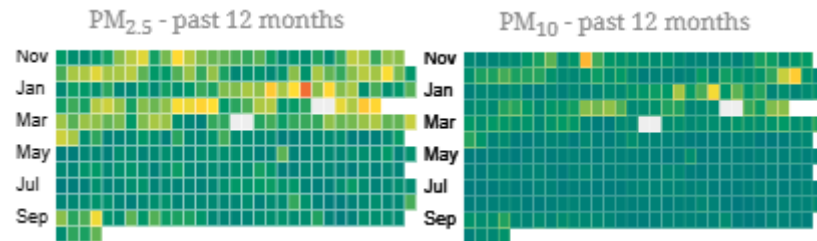


Рис.3.4. Показники пилу на вул. Пасічній у Львові $PM_{2.5}$, PM_{10}

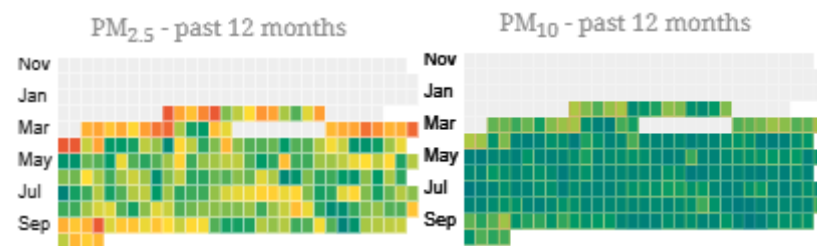


Рис.3.5. Показники пилу на вул. Кульпарківській у Львові $PM_{2.5}$, PM_{10}

Дані у Судовій Вишні надходять із джерела uRad Monitor, на вул. Стрийській – з LUN City Air, на вул. Городоцькій – з SaveDnipro, на вул. Пасічній та вул. Кульпарківській – з Citizen Science project sensor.community. Перших два збирають дані щодо дрібнодисперсного пилу $PM_{1.0}$, решта – ні, тому у відповідних масивах дані відсутні.

Аналіз рисунків 3.1–3.5 показує, що найгірша якість повітря є саме за показником $PM_{2.5}$. Також видно, що інші показники змінюються синхронно (корелюють) із цим показником, проте змінюється у меншій мірі. Також дуже важливим висновком є те, що в усіх випадках спостерігаємо найгіршу якість повітря у період січня-березня.

Скориставшись детальною інформацією із інформаційної картки станції моніторингу, отримаємо доступ до детальної інформації щодо якості повітря. На рисунку наведено структуру даних на сайті <https://aqicn.org/station/ukraine-lviv-kulparkivska-street/> щодо вул. Кульпарківській у Львові за показниками

PM_{2.5}, PM₁₀. Дані проілюстровано графічно і є доступ до числових даних, фрагмент яких наведено у додатку А.

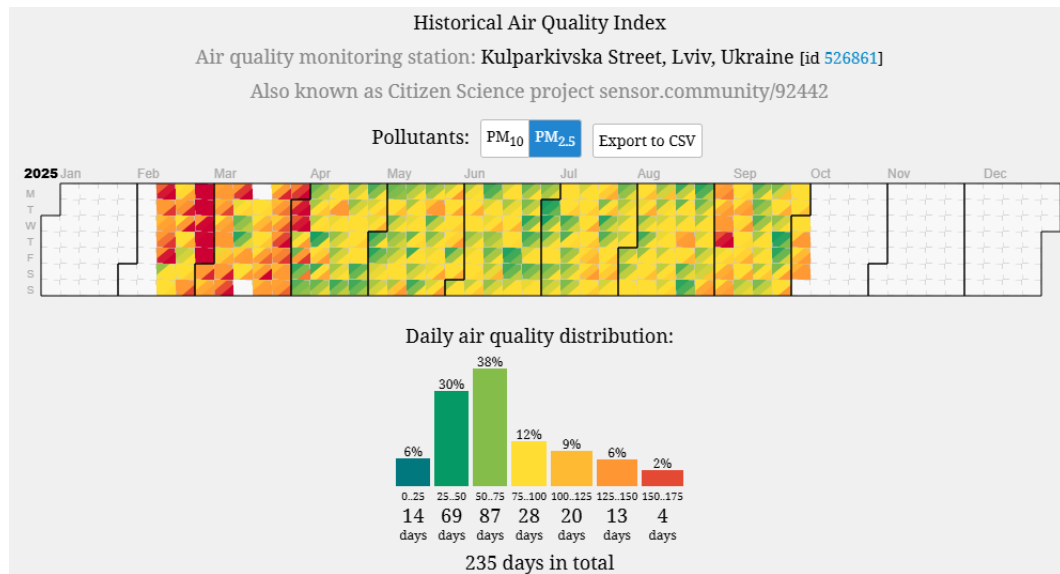


Рис.3.6. Показники пилу на вул. Кульпарківській у Львові PM_{2.5}

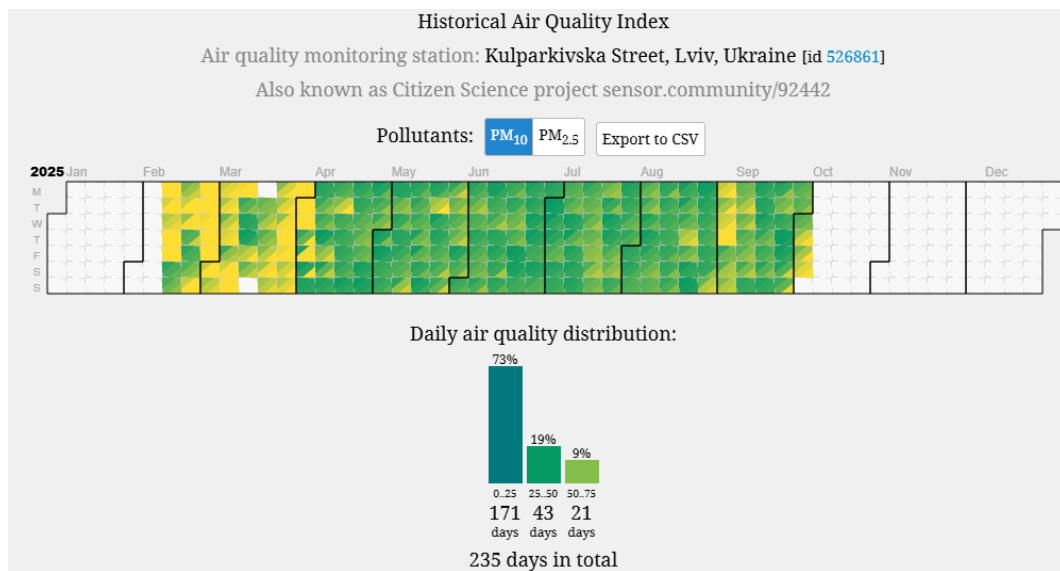


Рис.3.7. Показники пилу на вул. Кульпарківській у Львові PM₁₀

Як видно із розподілу значень індексу якості повітря (гістограма унизу рис.3.6), найбільша частка днів (87 днів, $\approx 38\%$) припадає на інтервал 50–75. Це означає, що впродовж року якість повітря найчастіше була задовільною, але не ідеальною. У цей період концентрації забрудників близькі до гранично допустимих значень. Показники свідчать про помірне, але стабільне фонове забруднення, з періодичними епізодами підвищених концентрацій.

Середнє значення $AQI \approx 65$, що відповідає нижній межі «задовільного» рівня якості повітря. Медіанний інтервал: 50–75, бо в ньому накопичена частота перетинає 117.5. Медіана ≈ 60 , що дуже близько до середини інтервалу 50–75. Мода ≈ 55.8 , тобто найбільш типовий рівень AQI — середина інтервалу 50–75. Стандартне відхилення ≈ 33 AQI — розподіл досить широкий. Асиметрія додатна, помірна (0,29) — розподіл трохи зміщений вправо (у бік гірших показників AQI), але не різко. Експес додатний ($Kurt \approx 0.8$) — розподіл трохи «гостровершинний» (leptokurtic) порівняно з нормальним.

Даних на рис. 3.7 недостатньо (і вони недостатньо різноманітні) для повного аналізу, тому в подальшому увагу зосередимо на аналізі показника $PM_{2,5}$ і розрахованих на цій основі показників якості, хоча слід пам'ятати, що аналіз, що базується лише на одному показнику у жодному разі не претендує на повноту і вичерпність.

По деяких станціях даних є значно більше, наприклад, станція:

Vygovskogo 5, Lviv, Ukraine [id [234688](#)]

має накопичені дані за 1248 днів (станом на 05/10/2025), у тому числі AQI у діапазоні (кількість днів):

0-25.....	129
25-50.....	322
50-75.....	441
75-100.....	235
100-125.....	86
125-150.....	23
150-175.....	12

Розподіл сконцентрований у середніх значеннях AQI (50–75), які відповідають задовільній якості повітря. Мода, медіана та середнє практично збігаються, отже розподіл близький до нормального. Асиметрія незначна, експес невеликий — дані мають стабільний характер без сильних перекосів у

бік забруднень. Більшість днів мають $AQI < 75$, тобто у середньому менше епізодів поганої якості повітря, ніж у попередній вибірці. Графічно дані за 2022-2025 роки по цій станції у тому, що стосується забруднення $PM_{2.5}$ та температури повітря наведено на рис. 3.8, 3.9.

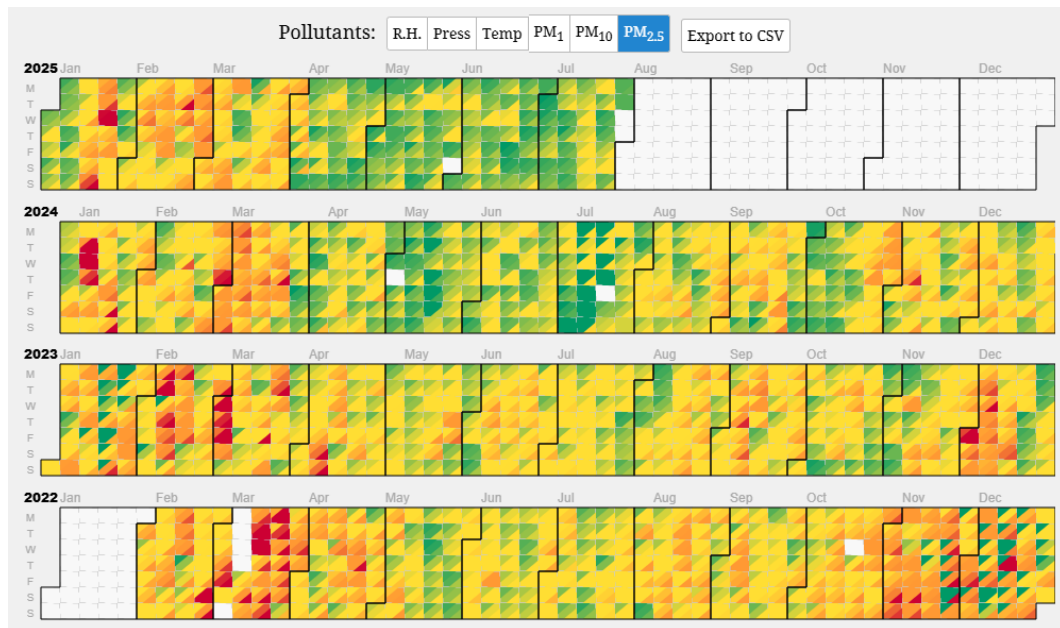


Рис.3.8. Показники пилу на вул. Виговського у Львові $PM_{2.5}$

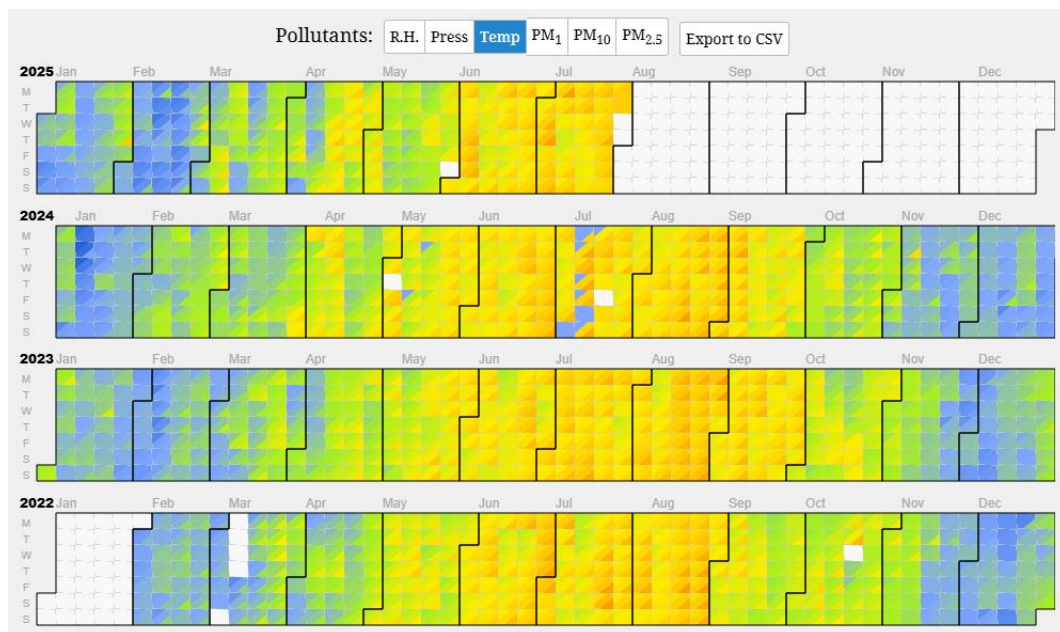


Рис.3.9. Показники температури на вул. Виговського у Львові

Візуально спостерігаємо, що періоди із значним погіршенням індексу якості повітря (червоні клітинки на діаграмі 3.8) корелюють і з зниженням температури повітря (сині клітинки на рисунку 3.9) із деякою затримкою.

Отже, можна попередньо зробити висновок, що із похолоданням більша кількість організацій, підприємств, домогосподарств тощо вмикають опалення, що впродовж кількох днів призводить до помітної динаміки у сторону підвищення, щодо вмісту пилу із діаметром часток до 2,5 мікрон у повітрі; відзначимо, що подібний ефект для пилу із діаметром до одного мікрону та до 10 мікрон спостерігається значно слабше.

Зауважимо, що цей ефект по-різному виражається у різних станціях спостереження: до прикладу на вулиці Кульпарківській та Виговського, а також у Судовій Вишні він виражений, тоді як по вулицях Городоцькій, Стрийській, Пасічній та у Старому Самборі він виражений значно слабше.

Сезонні похолодання призводять до підвищення концентрацій $PM_{2.5}$ через поєднання зростання джерел викиду (опалення, спалювання) і негативних метеоумов для розсіювання (інверсії, знижена турбулентність, низька висота змішування). Сила цього взаємозв'язку відрізняється між станціями через різні джерельні профілі, мікрометеоумови та ступінь локальної експозиції індивідуальним джерелам (вулиця, приватні печі, промисловість, транзит).

У великому місті сезонність $PM_{2.5}$ слабша за рахунок постійних великомасштабних джерел (транспорт, промисловість, ТЕЦ), які дають значний базовий рівень забруднення протягом року; сезонні ефекти (опалення) додають, але відносно менше змінюють загальний рівень. Окрім того, урбанічна термальна інерція й густий трафік формують власну сезонну структуру. У малих містечках сезонне погіршення $PM_{2.5}$ менше керується індивідуальним опаленням приватних будинків (твердопаливні котли, печі, спалювання відходів), бо частка таких будинків та їх густина на одиницю площі менша. Тому найбільша залежність спостерігається на околиці великого міста, ще щільність локальних джерел забруднення достатньо висока, а позитивні ефекти від централізованого теплопостачання великих міст не поширені. Інакше кажучи, передмістя концентрує саме ті сезонні джерела, які максимально реагують на похолодання, але ще не має

інфраструктури великого міста, яка зменшує потребу в них. Малі містечка — дійсно можуть мати нижчу щільність населення і будинків, отже сезонний приріст $PM_{2.5}$ менший, навіть якщо відносна частка твердопаливного опалення висока. Тут важливим є саме фактор густоти джерел на одиницю площі, який ти вдало згадав.

У великих містах сезонний ефект слабший, бо: значна частка будівель підключена до централізованого теплопостачання; є стабільний фоновий рівень від транспорту, ТЕЦ, промисловості; тепловий острів і вентиляція можуть послаблювати концентрації. Таким чином, схема утворює градієнт сили температурного сигналу: велике місто → передмістя → мале містечко, де максимум припадає на передмістя — саме через поєднання високої щільності індивідуальних сезонних джерел та відсутності централізованого теплопостачання.

Це спостереження добре узгоджується з даними багатьох європейських досліджень: піки $PM_{2.5}$ взимку часто спостерігають не в самому місті, а на його периферії, де масово опалюють приватні будинки твердим паливом (приклад — Краків і його агломерація, південна Польща).

Стан повітря у Східній Польщі

На рис.3.10 показано розподіл станцій моніторингу сервісу Worldwide Air Quality – AirNet Sensor Network [50] у східній Польщі – найближче до кордону Львівщини розміщено станцію у Пшемислі – відзначено цифрою 1. Дані на північ та північний захід є поодинокі станції Dobkowice, Jarosław-PWSTE-WIOS, Czerwona Wola, Bronisława Markiewicza (Pruchnik). Ще далі на захід лежить ціла група станцій у околицях великого міста Жешув – Ряшів (Rzeszów), одну із них (Zaczernie, Poland – приблизно 8 км на північ від Жешува) відзначено цифрою 2. Також північніше цієї групи розміщено станції Korczyna (27), Krosno (15), Zrecin (29), Haczow (27), Rymanów-Zdrój (44), Strachocina (25). Для аналізу відібрано відзначені цифрами станції в Seweryna Goszczyńskiego, Przemyśl, Poland [id 195457] та в Zaczernie, Poland [id 230545].

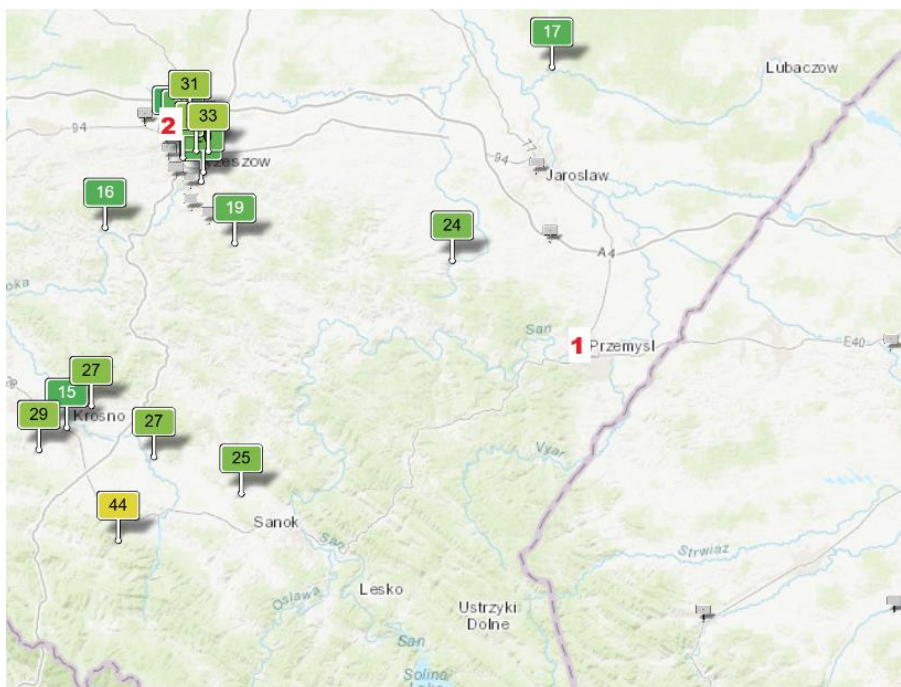


Рис.3.10. Розміщення станцій моніторингу у східній Польщі

Рис.3.11 та 3.13 ілюструє динаміку забруднень у 2021-2025 роках у пунктах 1 і 2 відповідно, а рис.3.12 та 3.14 – статистику (гістограму) рівнів забруднення.

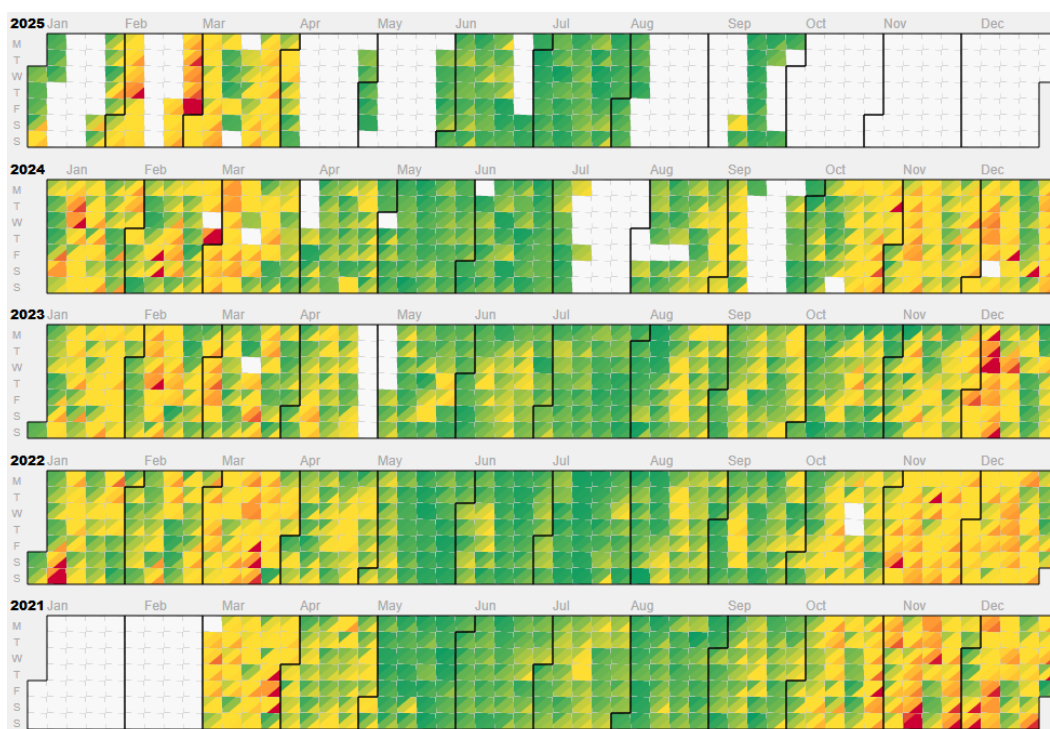


Рис.3.11. Показники пилу ($PM_{2.5}$) в Seweryna Goszczyńskiego, Przemysł, Poland [id 195457] – пункт 1

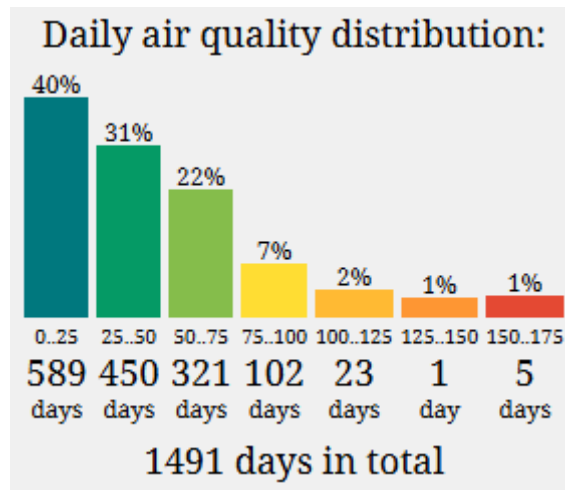


Рис.3.12. Статистика AQI в Seweryna Goszczyńskiego, Przemysł, Poland [id 195457] – пункт 1

Зауважимо, що розподіл на рис.3.12 суттєво відрізняється від розподілу, наприклад на рис.3.6 тим, що медіанне значення AQI лежить у проміжку 25-50, а не 50-75, а модальний інтервал – взагалі 0-25 для станції 1 та 25-50 для станції 2. Тобто можна стверджувати, що загалом якість повітря за цим показником у РП краща, аніж на Львівщині.

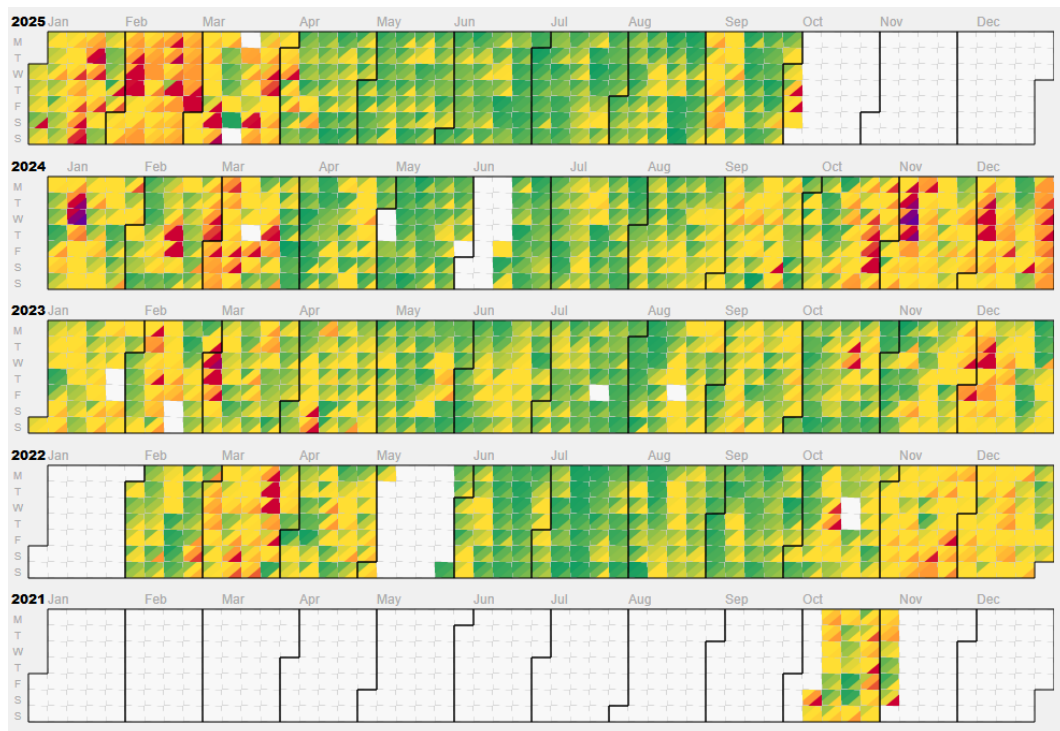


Рис.3.13. Показники пилу (PM_{2.5}) в Zaczernie, Poland [id 230545] – пункт 2

Більшість днів ($589+450 = 1039$ днів $\approx 70\%$) припадає на AQI нижче 50, тобто якість повітря добра. 321 днів (21.5%) — у межах 50–75 (задовільна

якість). Лише 131 день ($\approx 8.8\%$) — AQI вище 75, тобто помітне забруднення було рідкісним. Дуже високі значення (понад 125) спостерігалися всього 6 днів, тобто екстремальні епізоди поодинокі. Розподіл має сильний перекид у бік низьких значень (чисте повітря) — типова картина для малих містечок, природних територій або ефективно вентиляованих зон.

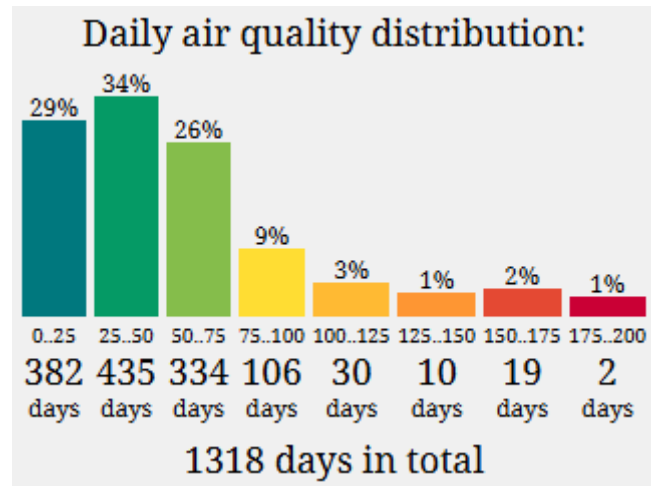


Рис.3.14. Статистика AQI в Zaczernie, Poland [id 230545] – пункт 2

Середнє (38,1), медіана (45,5) та мода (20,2) зміщені у бік низьких значень, але позитивна асиметрія (0,68) вказує на іноді помітні епізоди забруднення. Розподіл має виражену праву асиметрію і гостровершинність ($Kurt \approx 1.3$), що типово для територій з хорошим базовим станом повітря і рідкісними, але сильними епізодами забруднення (наприклад, зимові смоги, пилові викиди тощо).

Для якості повітря на станції 2, що проілюстрована рис.3.13 та 3.14. Загальний опис розподілу – дні з $AQI < 50$: $382+435 = 817$ днів ($\approx 62\%$) – отже домінують чисті та добрі дні; $AQI 50-75$: 334 днів (25%) – задовільна якість повітря; $AQI > 75$: $106+30+10+19+2 = 167$ днів ($\approx 13\%$) – відносно небагато епізодів погіршення; епізоди з $AQI > 150$ — лише 21 день ($\approx 1.6\%$) – рідкісні пікові забруднення (яких, утім не було у жодному із попередніх випадків). Розподіл зміщений у бік низьких значень з правим «хвостом» — типова ситуація для помірно чистих територій, можливо, передмістя або невеликого міста з періодичними смогами.

Середнє $AQI \approx 45$ — у межах «доброї» якості повітря. Медіана ≈ 41 — нижча за середнє, отже розподіл трохи асиметричний вправо. Мода ≈ 33.6 — найтипівіші дні мають AQI на нижній межі доброї якості. Стандартне відхилення ≈ 31 AQI , помітна варіативність через правий хвіст (пікові забруднення). Асиметрія помірно позитивна ($+0.37$) — розподіл з правим хвостом, але менш виражений, ніж у попередньому прикладі з дуже чистим повітрям. Позитивний ексцес ($0,9$), розподіл гостровершинний, але не екстремально. Варіативність відносно середнього — висока ($CV = 68\%$), зумовлена невеликою кількістю днів з високим AQI .

Багато польських досліджень показують, що головний локальний фактор зимових піків — індивідуальне опалення (тверде паливо, біомаса) плюс сильні метеоумови (інверсія, низький PBL), що збільшують концентрації РМ. Рогула-Козловська (Rogula-Kozłowska et al.) — класичне польське дослідження сезонних змін складу $PM_{2.5}$ у декількох локаціях.

Дослідження по Кракову підкреслюють сильні зимові смоги і внесок опалення та транспортних джерел; аналізи джерел (source apportionment: PM chemical markers, organic carbon, black carbon, PAHs) показують великий вклад палива для опалення у холодний період. Подібні дослідження є для Сілезького агломерату і Варшави (Rys, Samek et al., 2022).

У літній сезон фотохімічні процеси змінюють склад аерозолі (більше вторинних нітратів/сульфатів і органіки), а в зимовий — більший вклад первинних частинок від спалювання (Trusz, Ghazal, Piekarska, 2020).

Подібні дослідження мають місце і у світовій літературі (C.S. Liang et al., 2016; H. Ahn, J. Lee, A. Hong, 2022; Zhao et al., 2018). Не менш численні публікації щодо новітніх методів ідентифікації забруднень (із використанням супутників — Van Donkelaar et al., 2019; Guo et al., 2021) та впливу забруднень повітря на здоров'я людей (Mainka, Fantke, 2022; He et al., 2022 та багато інших).

3.2. Розвиток енергетики Львівщини та якість повітря

У таблиці 3.1. наведено статистичні дані [6] щодо викидів у 2021 році забруднюючих речовин у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення у районах Львівської області. Дані про викиди забруднюючих речовин від стаціонарних джерел збирають за встановленою процедурою, згідно вимог екологічного законодавства та міжнародних зобов'язань держави. Збір таких даних — це обов'язковий елемент системи екологічного моніторингу, без якого неможливо ефективно планувати природоохоронні заходи, оцінювати екологічні ризики та контролювати забруднення повітря.

Таблиця 3.1. Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря у 2021 році від стаціонарних джерел забруднення у районах Львівської області (т)

Показник	Львівська область	район						
		Дрогобицький	Золочівський	Львівський	Самбірський	Стрийський	Червоноградський	Яворівський
Викиди забруднюючих речовин - усього	75 433	2 402	1 250	4 428	421	5 444	59 199	2 289
Діоксид сірки	19 586	38	38	93	25	114	19 226	52
Оксид вуглецю	4 315	213	108	1 450	53	1 439	907	145
Діоксид азоту	5 609	138	40	861	20	545	3 723	282
Метан	36 894	1 200	393	1 137	130	2 461	29 923	1 650
Неметанові леткі органічні сполуки	2 172	727	452	175	100	111	585	22
Речовини у вигляді тв. суспендованих частинок	6 076	67	181	461	75	650	4 515	127
Інші	781	19	38	251	18	124	320	11
У розрахунку на 1 кв.км	3,5	1,7	0,4	0,9	0,1	1,4	19,8	1,0
У розрахунку на 1 особу, кг	30,3	10,3	7,8	3,9	1,9	17,0	260,2	12,8

Підприємства — стаціонарні джерела (ТЕС, котельні, промислові підприємства, шахти тощо) ведуть первинний облік обсягів викидів. Обсяги визначаються за допомогою: приладів безперервного контролю; лабораторних вимірювань; розрахункових методик (коли прямих вимірів немає). Щороку підприємства подають форми державної статистичної звітності (зокрема форма № 2-ТП (повітря) «Звіт про охорону атмосферного повітря»). Обласні та державні органи статистики (Держстат) перевіряють дані, узагальнюють їх по районах, областях і країні. Паралельно дані використовує Державна екологічна інспекція та Міндовкілля для контролю за дотриманням лімітів та дозволів на викиди.

Ці дані потрібні для:

- Моніторингу стану довкілля: визначають основні забруднювачі і “гарячі точки” з підвищеними обсягами викидів; порівнюють динаміку по роках і районах.
- Розробки природоохоронної політики: планування заходів з охорони атмосферного повітря; обґрунтування програм з модернізації виробництв, зменшення шкідливих викидів.
- Видачі дозволів і контролю: на основі цих даних визначають допустимі обсяги викидів для кожного джерела; контролюють виконання підприємствами природоохоронних норм.
- Оцінки впливу на здоров’я та екосистеми — дані використовують для моделювання розсіювання забруднювачів, прогнозування якості повітря та ризиків для населення.
- Звітності перед міжнародними організаціями — Україна зобов’язана подавати статистику за міжнародними конвенціями (наприклад, Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані, Європейська програма ЕМЕР).

У таблиці 3.2. проведено порівняння площі району, чисельності його населення та кількості викидів.

Таблиця 3.2. Статистика районів Львівської області

Район	Площа, км ² /%		Чисельність населення, ос/%		Викиди, т/%	
Львівський	3 196	23%	1 142 570	46%	4428	6%
Дрогобицький	720	5%	234 125	9%	2402	3%
Золочівський	1 660	12%	159 882	6%	1250	2%
Самбірський	2 200	16%	223 082	9%	421	1%
Стрийський	2 314	17%	321 296	13%	5444	7%
Червоноградський	2 140	16%	227 756	9%	59199	78%
Яворівський	1 520	11%	178 453	7%	2289	3%
Разом	13 750	100%	2 487 164	100%	75433	100%

Бачимо значну диспропорцію між площею, населенням і викидами речовин у атмосферу. Така диспропорція має цілком конкретні економічні та технологічні причини.

1. Висока концентрація промислових підприємств ПЕК

Червоноградський район — це центр вуглевидобувної промисловості Львівсько-Волинського басейну. Тут розташовані: шахти ДП «Львіввугілля» (великі обсяги видобутку та вентиляційні викиди метану), вугільні збагачувальні фабрики, допоміжна енергетична та ремонтна інфраструктура. Усі ці об'єкти належать до категорії стаціонарних джерел, що генерують великі обсяги: метану (CH₄) — як побічного газу шахт (у табл.3.1 видно: 29 923 т метану з 36 894 т по області припадає саме на Червоноградський район), діоксиду сірки, твердих частинок, оксиду вуглецю, тощо.

2. Специфіка викидів метану

Метан є основним забруднювачем за масою у цьому районі, але не пов'язаний безпосередньо зі спалюванням. Шахти постійно вентилують виробки для запобігання вибухам, у результаті — в атмосферу надходять тисячі тонн метану, який обліковується як викид забруднюючої речовини. Це пояснює чому навіть без численних великих заводів, район має колосальні загальні обсяги викидів.

3. Обмежена кількість великих промислових підприємств в інших районах

Більшість інших районів Львівщини — переважно аграрні або мають малу частку важкої промисловості. Львівський район має значне населення, але промислові викиди там розосереджені та часто менш інтенсивні (більше сервісна економіка, транспорт, мале виробництво).

4. Історична промислова спадщина

У радянський період Червоноградський промвузол розвивався як вугільний енергетичний кластер. Після реформи 2020 р. район охопив більшу територію колишнього Сокальського району, де зосереджені основні шахти й промислові об'єкти. Це історично закріпило дисбаланс між населенням і обсягами промвипусків.

Отже 78 % промислових викидів у Червоноградському районі зумовлені не його площею чи населенням, а концентрацією підприємств вугільної промисловості та специфікою метанових викидів шахт. Це типовий приклад, коли екологічне навантаження концентрується у промислових вузлах, а не розподіляється пропорційно до території чи чисельності населення. Тому розвиток традиційної енергетики також впливає на якість атмосферного повітря, навіть якщо не йдеться про спалювання паливних корисних копалин.

Розглянемо ретроспективно динаміку розвитку енергетики Львівської області із середини ХХ ст. до наших днів.

- 1950–1970-ті роки — становлення вугільної енергетики

Після Другої світової війни у Львівсько-Волинському басейні активно розвивається вугільна промисловість, зокрема навколо м. Червоноград та Сокальського району. У 1950-х–1960-х рр. відкриваються нові шахти, формується енергетичний кластер, що забезпечує паливом ТЕС Західної України. Основний енергоресурс — кам'яне вугілля. Наслідки для повітря: різке зростання викидів метану, твердих частинок, SO₂, NO_x від шахт, збагачувальних фабрик та котелень; погіршення якості повітря у Червоноградському промвузлі.

- 1970–1980-ті — індустріальний пік

Це період максимальних обсягів видобутку вугілля. Вводять в експлуатацію нові енергетичні об'єкти, розбудовується промислова інфраструктура. Переважає вугільна теплова генерація (ТЕС, котельні промислових підприємств). Викиди шкідливих речовин досягають пікових значень — десятки тисяч тонн щороку, особливо в районах видобутку та навколо великих міст (Львів, Червоноград, Новий Розділ). Якість повітря різко погіршується, спостерігається стабільне перевищення ГДК для SO₂ і пилу.

- 1990-ті — спад виробництва та скорочення викидів

Після розпаду СРСР відбувається різке зниження промислового виробництва та енергоспоживання. Частина шахт і підприємств закривається або працює з мінімальним навантаженням. Основні ресурси залишаються тими самими — вугілля та природний газ, який починає відігравати помітнішу роль у комунальній енергетиці. Викиди в атмосферу значно зменшуються, що фіксується статистикою Держкомстату: у 1990-х рр. обсяги шкідливих викидів у регіоні зменшилися приблизно в 2–3 рази порівняно з 1980-ми.

- 2000–2010-ті — стабілізація та поява альтернативних джерел

Вугільна галузь зберігає провідну роль у Червоноградському регіоні, але обсяги видобутку менші, ніж у радянський період. Значну частку в енергобалансі займає природний газ, особливо в комунальному секторі. Починають розвиватися відновлювані джерела енергії (ВДЕ) — малі ГЕС, перші вітрові та сонячні установки, переважно у гірських та південних районах області. Викиди стабілізуються на рівні 70–90 тис. т/рік від стаціонарних джерел; якість повітря поступово покращується у містах, але промвузли залишаються проблемними зонами.

- 2020-ті — поступовий енергетичний перехід

Після 2015 р. активізується політика з енергоефективності та розвитку ВДЕ (відповідно до зобов'язань України перед ЄС). Поряд із вугіллям і газом зростає частка біоенергетики, сонячних і вітрових електростанцій. Проте

Червоноградський район досі дає більшість промислових викидів через діючі шахти (метан). Загальна тенденція — зниження питомих викидів, але збереження локальних зон високого забруднення.

Статистичні дані [6] обмежено підтверджують описані тенденції, бо ГУСуЛО надає лише наступну статистичну інформацію:

❖ Про використання палива

- Використання палива за видами, 2005–2020
- Витрати основних видів палива за напрямками використання, 2010–2020
- Використання палива за видами економічної діяльності (КВЕД 2010), 2013–2020
- Реалізація населенню окремих видів палива, 2000–2020
- Продаж світлих нафтопродуктів і газу через мережу АЗС, 2010—2021

❖ Про використання енергії

- Використання теплоенергії та електроенергії за видами економічної діяльності (КВЕД 2010), 2013–2020
- Потужність і відпуск енергії за джерелами постачання, 2016–2020

Єдиної зведеної бази по енергетиці з 1990 року ресурс [6] не надає.

Використання теплоенергії та електроенергії у області на обласному центрі ілюструють рис.3.15 та 3.16. Аналіз даних, наданих [6] дає змогу стверджувати, що у Львівській області 2000-2005 рр. спостерігаємо зростання споживання теплоенергії з 2,69 млн Гкал до 3,27 млн Гкал, що становить приріст приблизно 22 %. Це пов'язано з післякризовим відновленням економіки та стабілізацією роботи систем централізованого тепlopостачання. У наступний період 2005-2014 рр. — поступове зниження з 3,27 млн Гкал до 2,40 млн Гкал (–27 %). Основні чинники ймовірно скорочення споживання тепла населенням через встановлення лічильників і енергозбереження; зменшення обсягів тепlopостачання промисловості; поступовий перехід частини споживачів на індивідуальне опалення. У проміжку 2014-2015 рр. — різке падіння з 2,40 млн Гкал до 1,80 млн Гкал (–25 %). Це збігається з

економічною кризою 2014–2015 рр., підвищенням тарифів та скороченням централізованого теплопостачання. 2015–2018 рр. — стабілізація споживання і коливання в межах 1,95–2,00 млн Гкал без вираженого тренду зростання. Це свідчить про перехід до нової структури теплопостачання з меншою роллю централізованого опалення.

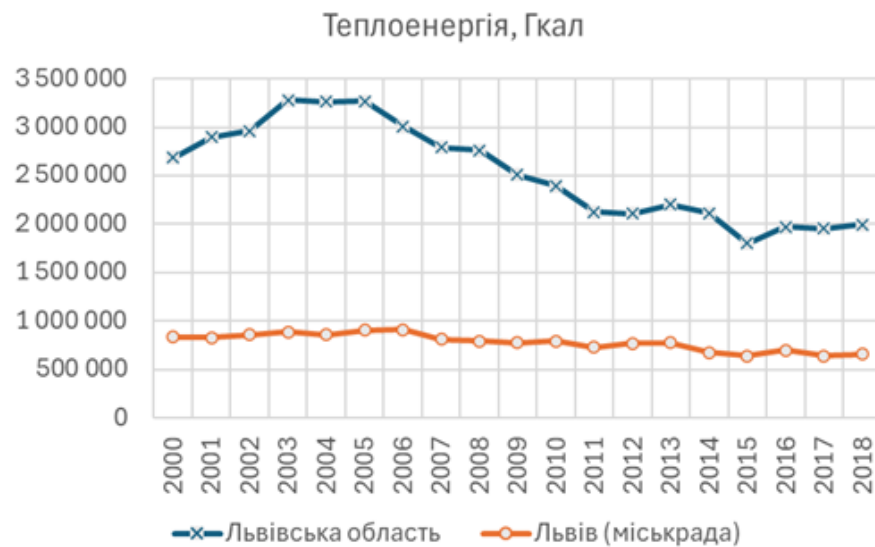


Рис.3.15. Використання теплоенергії у місті Львові та області

У Львові динаміка подібна, але набагато менш різка: 2000–2005 рр. — помірне зростання (+9 %); 2005–2010 рр. — зниження на ≈ 12 %, зумовлене модернізацією мереж, утепленням будинків і встановленням ІТП; 2010–2015 рр. падіння на ≈ 19 %, що відповідає загальнообласним тенденціям; 2015–2018 рр. — стабілізація на рівні ≈ 650 – 660 тис. Гкал з незначним зростанням після 2016 року.

Львів залишається найбільшим споживачем тепла в області – приблизно 33 % загальнообласного обсягу у 2018 р. – що менше 2012 року (37%), проте більше 2004 року (26%). Отже, у 2000–2018 рр. використання теплоенергії у Львівській області пройшло шлях від зростання у першій половині 2000-х до стійкого скорочення й стабілізації після 2015 року. У Львові тренд подібний, але більш плавний. Це відображає структурну трансформацію систем теплопостачання, підвищення енергоефективності та зміну споживчої поведінки.

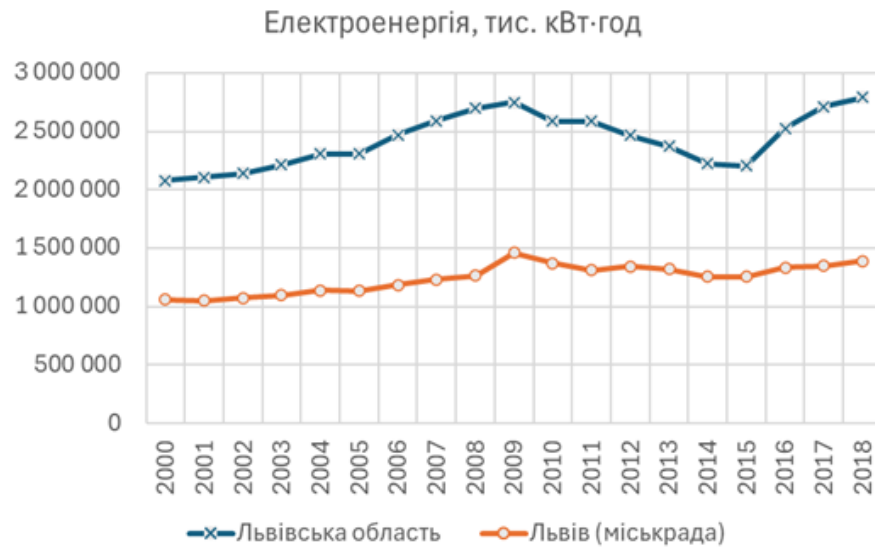


Рис.3.16. Використання електроенергії у місті Львові та області

Аналіз даних, наданих [6] щодо використання електроенергії дає змогу стверджувати, що у Львівській області 2000-2009 рр. маємо стійке зростання споживання (з 2,08 до 2,75 млрд кВт·год, приріст +32%). Це пов'язано з економічним підйомом, розширенням промисловості й збільшенням електрифікації побуту. 2010-2015 рр. — поступове зниження (мінімум у 2015 р. — 2,21 млрд кВт·год), що корелює з економічною кризою 2008–2009 рр. і подальшими воєнно-економічними подіями 2014 р. 2016-2018 рр. — нова хвиля зростання: відновлення економічної активності, розвиток малого бізнесу, зростання побутового споживання. У місті Львові можна відзначити наступні ключові тенденції: до 2009 р. — стабільне зростання (+37% порівняно з 2000 р.); 2010-2015 рр. — помітне скорочення споживання (криза, оптимізація виробництва, енергозбереження, закриття деяких промислових підприємств); 2016-2018 рр. — відновлення споживання на фоні розвитку сфери послуг, житлового будівництва та ІТ-сектору.

Частка м. Львова у споживанні області коливалась у межах $\approx 48\text{--}52\%$, що відображає концентрацію промисловості, інфраструктури та населення в обласному центрі. Після 2009 року зростання області сповільнилось через структурні зміни: зменшення частки енергоємної промисловості, розвиток побутового та комерційного сектору. Збільшення споживання в 2016–2018

пр. пов'язане з економічним пожвавленням та зростанням добробуту, але також частково — із переходом на електроопалення у приватному секторі.

Зростання електроспоживання традиційно означало підвищення викидів на ТЕС (зокрема Добротвірської ТЕС та інші джерела), які історично працювали на вугіллі, сприяючи зростанню обсягів SO_2 , NO_2 та твердих частинок. Проте з 2010-х років завдяки модернізації, частковому імпорту електроенергії та розвитку ВДЕ вплив дещо зменшився, хоча залишався значним. Для Львівської області ключовим джерелом електроенергії завжди була Добротвірська ТЕС (Кам'янка-Бузький район, нині Червоноградський), введена в експлуатацію у 1950-х — 1960-х роках. Вона працює переважно на вугіллі Львівсько-Волинського басейну, реалізуючи таким чином енергетичну самодостатність регіону. У 1970–1980-х роках була головним виробником електроенергії області. Є одним із найбільших стаціонарних джерел викидів SO_2 , NO_x та пилу в регіоні. Також у області діяли: менші котельні та теплоелектроцентралі у Львові (Львівська ТЕЦ-1, ТЕЦ-2), які забезпечували комунальне тепло та електроенергію; кілька невеликих гідроелектростанцій, але їхня частка залишалася незначною; введені у експлуатацію декілька ВЕС, переважно на Самбірщині; чимало приватних домогосподарств встановили елементи енергозабезпечення, що базуються на сонячній енергії. Отже, у контексті впливу на повітря саме Добротвірська ТЕС є головним джерелом промислових викидів у Червоноградському районі, що й пояснює велику частку цього району у загальнообласних викидах.

У екологічному паспорті Львівщини за даними 2024 року [10] першою із найважливіших екологічних проблем області названо «Забруднення атмосферного повітря викидами забруднюючих речовин від промислових підприємств та автотранспорту» (інші проблеми: 2. забруднення водойм; 3. скидання шахтних вод; 4. забруднення підземних вод; 5. порушення режиму малих річок; 6. підтоплення; 7. поводження з небезпечними відходами; 8. відходи гірничодобувної та енергетичної галузі; 9. контроль радіаційної безпеки; 10. екзогенні геологічні процеси; 11. збереження рослинного та тваринного світу; 12. проблеми ПЗФ), що підкреслює роль проблеми.

У 2024 році обсяги викидів від стаціонарних джерел у Львівській області становили 55,4 тис. тонн, що на 4,4% менше, ніж у 2023 році. На 1 км² припадало 2,5 т забруднюючих речовин.

Найбільшу частку становив метан — 29,4 тис. т, далі діоксид сірки — 9,6 тис. т. Викиди вуглекислого газу були значно більшими — 1822,1 тис. т.

Основні причини значного забруднення:

- недотримання правил експлуатації пилогазоочисного устаткування;
- затримки в реалізації заходів зі зменшення викидів;
- низькі темпи впровадження сучасних технологій очищення;
- використання неякісного альтернативного палива;
- застаріле або несертифіковане обладнання, що не забезпечує оптимальних режимів горіння;
- відсутність ефективного очищення газоподібних домішок.

Зниження на 4,4% свідчить або про певні заходи зі зменшення забруднення, або про зниження виробничої активності (що часто буває у кризові роки). Сам по собі цей показник ще не свідчить про стабільне екологічне покращення — потрібен аналіз тенденцій за кілька років. Основну частку становили метан (29,4 тис. т) та діоксид сірки (9,6 тис. т), а також значні обсяги вуглекислого газу (1,82 млн т), що свідчить про вагомий внесок у зміну клімату. Незважаючи на певну позитивну динаміку, забруднення залишається значним через технічну зношеність підприємств, невиконання природоохоронних заходів, використання неякісного палива та відсутність ефективних систем очищення газопилових викидів. Це вказує на розрив між нормативними вимогами та реальною практикою природоохоронної діяльності. Для зменшення негативного впливу необхідне впровадження сучасних технологій, модернізація обладнання та посилення контролю за дотриманням екологічних стандартів.

У екопаспорті [10] також розглянуто проблему пересувних джерел забруднення атмосферного повітря, зокрема автотранспорту. Це окреслює класичну проблему українських міст і регіонів: автотранспорт є одним із

головних джерел забруднення, а технічний стан транспортного парку часто є незадовільним. Особливо важливою є теза про низьку поширеність систем нейтралізації відпрацьованих газів — це свідчить про відставання у впровадженні екологічних стандартів Євро, що у країнах ЄС стали обов'язковими вже багато років тому.

Також актуальним є акцент на інфраструктурних проблемах — відсутності об'їзних доріг та автомагістралей, через що значний потік транспорту проходить безпосередньо через населені пункти, концентруючи викиди у житлових зонах. Транспортна система Львова стикається з низкою системних проблем, що мають як інфраструктурний, так і екологічний вимір.

Насамперед спостерігається висока інтенсивність руху в центральній частині міста, яка поєднується з відсутністю ефективної мережі об'їзних доріг та автомагістралей. Через це значна частина транзитного транспорту проходить через житлові райони, що спричиняє затори, шумове навантаження та локальне забруднення повітря. Загалом архітектура центральної частини міста не пристосована до значних транспортних потоків.

Додатковим викликом стало зростання вантажних перевезень унаслідок воєнної переорієнтації логістики на автомобільний транспорт, що збільшує навантаження на дорожню мережу. У результаті транспортна система Львова перебуває у стані перевантаження, що веде до заторів, погіршення екологічного стану, втрат часу та зниження якості життя мешканців. Для вирішення проблем необхідні комплексні заходи: розвиток інфраструктури, модернізація громадського транспорту та впровадження екологічних стандартів.

Усі зазначені фактори (інфраструктурна відсталість, зростання автопарку без оновлення, вплив війни тощо) нині діють одночасно, створюючи кумулятивний ефект — особливо в урбанізованих територіях. Без комплексної політики (оновлення автопарку, розвитку інфраструктури, посилення контролю) ситуація може погіршуватись навіть при загальному зниженні промислових викидів.

3.3. Перспективи екологізації енергетики регіону

Стратегія розвитку енергетики Львівської області та сусідніх територій може базуватись на заходах, двоякого спрямування: консервативна реакція на найбільш гострі проблеми (очистка викидів ТЕС, більш ефективні технології у гірничій справі тощо), та пошук альтернативних рішень (сонячна, вітрова і гідроенергетика, ймовірно виробництво біомаси і т.п.).

Перспективи екологізації енергетики Львівської області є розмаїтими та обумовлені поєднанням наявного природно-ресурсного потенціалу, технічних можливостей та стратегічних ініціатив. Нижче наведено основні напрямки та перспективи розвитку екологічно чистої енергетики в регіоні:

- ***Сонячна енергетика***

Львівська область має значний потенціал для розвитку сонячної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам. Зокрема, місто Самбір характеризується високими показниками інсоляції, що робить його перспективним для встановлення сонячних панелей

- ***Вітрова енергетика***

Регіон демонструє потенціал для розвитку вітрової енергетики, зокрема в гірських районах, де спостерігаються сприятливі вітрові умови для розміщення вітрових турбін.

- ***Біоенергетика***

Використання біомаси, зокрема відходів сільського господарства, є перспективним напрямком для виробництва енергії. Це дозволяє не лише зменшити залежність від традиційних енергоресурсів, а й сприяє утилізації органічних відходів.

- ***Мала гідроенергетика***

Наявність численних річок та водотоків у регіоні створює умови для розвитку малої гідроенергетики. Однак необхідно враховувати екологічні аспекти та вплив на водні екосистеми при реалізації таких проєктів.

- ***Воднева енергетика***

Розвиток водневої енергетики у Львівській області має перспективи завдяки наявності потенціалу для виробництва водню з використанням відновлюваних джерел енергії. Це включає використання біогазу та інших відновлюваних джерел для виробництва водню

Планується активніше долучатися до проєктів, пов'язаних із «зеленим переходом». У жовтні 2022 року Укргідроенерго та Концерн Галнафтогаз підписали меморандум про співпрацю для реалізації водневої стратегії України, що покликана зміцнити стабільність та енергетичну незалежність держави. Як найбільша гідрогенеруюча компанія країни, Укргідроенерго планує розвивати виробництво «зеленого» водню як альтернативного палива та інтегрувати Україну в європейські енергетичні процеси [1].

У джерелі [9] визначено три можливі сценарії розвитку енергетичної ситуації у світі та регіоні — як щодо подолання кризового періоду, так і щодо переходу до нової, неминучої фази енергетичного розвитку, — інерційний, стагнаційний та інноваційний.

Інерційний сценарій передбачає відсутність реальних змін і загострення кризи. Це може спричинити економічний спад у розвинених країнах, поширення кризи на країни, що розвиваються, політичну дестабілізацію, зростання радикальних рухів і «відкат глобалізації» — розвал Єврозони, спад міжнародної торгівлі та фінансові потрясіння.

Стагнаційний сценарій передбачає уповільнення економічного росту та зниження попиту на енергоносії. Його активно підтримують екологічні рухи, і він вважається найбільш імовірним. Для розвинених країн це означає «втрачене десятиліття» із низькими темпами розвитку, кризами, безробіттям і політичними труднощами.

Інноваційний сценарій передбачає глибоку трансформацію світової системи та перехід на новий рівень розвитку з ефективнішою взаємодією з природою. Його основа — технологічний прорив у провідних країнах, що

знизить енергоємність індустріалізації інших держав. Головний виклик — швидкість науково-технічного прогресу, яка випереджає адаптаційні можливості суспільства. Це найбільш бажаний сценарій розвитку енергетики.

Перспективи розвитку енергетики регіону безпосередньо пов'язані із зміцненням енергетичної безпеки. Екологізація енергетичного сектору Львівщини відіграє ключову роль у цьому процесі, оскільки сприяє зменшенню залежності від імпортованих енергоносіїв, підвищенню ефективності використання місцевих ресурсів та зниженню рівня техногенного навантаження на довкілля. Розвиток відновлюваних джерел енергії, модернізація інфраструктури та впровадження енергоощадних технологій здатні не лише забезпечити стабільне енергопостачання, а й стимулювати інноваційний розвиток регіону, створення нових робочих місць і підвищення якості життя населення.

Енергетичну безпеку традиційно розглядають як аспект національної або транснаціональної безпеки, оскільки стабільні поставки викопного палива залишаються важливими для функціонування економіки, обороноздатності держави та інших критичних сфер. Водночас через зростаюче занепокоєння впливом використання викопних енергоресурсів на довкілля та здоров'я людей виникає потреба у збалансованому підході до забезпечення енергетичної безпеки [7].

Сьогодні енергетична безпека вже не обмежується лише доступністю енергії, хоча цей критерій і надалі залишається першочерговим. Акцент у сучасних політичних документах робиться на безперебійному доступі до джерел енергії, диверсифікації постачань, стійкості до зовнішніх загроз, енергетичній самодостатності та екологічності. Це свідчить про розширення концепції енергетичної безпеки та її адаптацію до сучасних викликів.

Варто враховувати, що універсальної методології оцінки енергетичної безпеки, придатної для всіх країн, не існує [7]. Кожна держава має різні обсяги національних енергетичних ресурсів, темпи економічного розвитку, кліматичні умови, демографічні показники та геополітичне положення. Тому

зміст поняття «енергетична безпека» та пріоритети його забезпечення значно відрізняються залежно від конкретного національного контексту.

Для України енергетична безпека передбачає здатність держави забезпечувати безперебійне, доступне та стає постачання енергоносіїв, захищаючи економіку, інфраструктуру та населення від зовнішніх та внутрішніх ризиків. Це включає диверсифікацію джерел енергії, зменшення залежності від імпорту викопного палива, розвиток відновлюваних джерел та підвищення енергоефективності. Крім того, енергетична безпека пов'язана з екологічною стабільністю, оскільки використання чистих технологій зменшує негативний вплив на довкілля та здоров'я населення.

Для Львівської області енергетична безпека має регіональний характер і визначається здатністю забезпечити стабільне енергопостачання при одночасному розвитку місцевих відновлюваних ресурсів (сонячна, вітрова, біоенергетика, мала гідроенергетика). Вона включає:

- Надійне постачання електроенергії й тепла для населення і підприємств;
- Зменшення залежності від імпорту викопного палива;
- Підвищення енергоефективності у комунальному та промисловому секторах;
- Розвиток «зеленої» енергетики для зменшення екологічного тиску;
- Стійкість енергомережі до кризових ситуацій, включно з військовими та техногенними ризиками.

Кількісну оцінку впливу переходу з традиційних джерел енергії на відновлювані на екологічні ризики для Львівської області можна зробити лише орієнтовну, оскільки суттєво залежатиме як від деталей переходу на альтернативні джерела, так і від методик оцінки ефективності. Розглянемо декілька варіантів реалізації джерел енергії: вугільна, газова, вітрова, сонячна, біоенергетична (див. табл.3.3). Оцінку вугільної ТЕС виконано на основі робіт Браташа (2024) та Кошлак і Павленко (2017). Дані щодо газової ТЕС отримано з роботи Вольчин, Гапонич (2019), Новаківського (2022) та ін.

Таблиця 3.3. До оцінки впливу переходу
з традиційних джерел енергії на відновлювані

Джерело енергії	В-во енергії, МВт·год/рік	CO ₂ , т/рік	SO ₂ , т/рік	NO _x , т/рік	PM _{2.5} , т/рік	Примітки
Вугільна ТЕС (традиційна)	1 000 000	3 500 000	9000	6000	4000	Основне джерело тепла та електроенергії, значний вплив на повітря
Газова ТЕС	1 000 000	900 000	1500	1200	200	Менше забруднень, але залежність від імпорту газу
Сонячна електростанція	1 000 000	0–50	0–10	0–10	0–5	Викиди враховують лише виробництво панелей і технічне обслуговування
Вітрова електростанція	1 000 000	0–20	0–5	0–5	0–2	Мінімальні викиди, враховані при виробництві турбін
Біоенергетика	1 000 000	100 000	200	150	50	Викиди залежать від типу біомаси та технології спалювання

Отже перехід на ВДЕ майже повністю знижує викиди шкідливих речовин і парникових газів у порівнянні з традиційними ТЕС. Найбільший ефект дає комбінація сонця та вітру, а біоенергетика є додатковим джерелом з меншими, але все ж значущими викидами. Зниження екологічного ризику прямо впливає на здоров'я населення та якість атмосферного повітря, що робить ВДЕ стратегічно важливими для Львівщини.

У контексті актуальних проблем Львівщини, що мають пряме відношення до енергетики та якості атмосферного повітря слід звернути увагу на проблему утилізації відходів. Спалювання побутових відходів може розглядатися як допоміжний енергетичний ресурс, але його екологічна доцільність та практична реалізація залежать від технологій, обсягів відходів і системи контролю за викидами.

Енергетичний потенціал спалювання відходів

Тверді побутові відходи (ТПВ) містять значну частку горючих компонентів — папір, пластик, текстиль, органічні рештки, які при спалюванні дають теплову енергію, що може бути використана для: виробництва електроенергії; централізованого тепlopостачання; комбінованого виробництва (ТЕЦ).

Середня теплотворна здатність змішаних ТПВ в Україні становить 7–10 МДж/кг, що порівняно з низькоякісним бурим вугіллям. У ЄС спалювання відходів часто є частиною системи енергетичної утилізації (waste-to-energy, WtE), що поєднує енергогенерацію з обов’язковим очищенням димових газів. Заводи зі спалювання відходів як джерела енергогенерації (технології waste-to-energy, WtE) поширені у багатьох країнах Європи, особливо в тих, де обмежені можливості для полігонного захоронення, діють суворі екологічні норми, існують розвинені системи тепlopостачання.

Німеччина має понад 90 WtE-заводів, які утилізують більшість не сортованих залишкових відходів. Більшість установок працюють у режимі когенерації (електроенергія + теплова енергія). Приклад: завод MVA Bielefeld забезпечує енергією частину міської мережі централізованого опалення.

Швеція — це один із лідерів Європи за часткою спалювання у системі поводження з відходами: понад 50% ТПВ спалюється з енергетичною утилізацією. 34 WtE-заводи постачають тепло у міські тепломережі та виробляють електроенергію. Приклад: Högdalenverket (Стокгольм) — виробляє ~1,7 ТВт·год тепла і ~0,3 ТВт·год електроенергії на рік.

Данія — понад 20% тепла в централізованих мережах країни надходить від WtE-заводів. Приклад: Copenhill (Копенгаген) — сучасний архітектурно-екологічний завод, який утилізує 400 тис. тонн сміття щорічно, забезпечуючи 30 тис. домогосподарств електроенергією та 72 тис. — теплом.

Нідерланди — тут розвинена система WtE з акцентом на енергогенерацію та зменшення полігонів. Приклад: AEB Amsterdam — один із найбільших у

світі заводів, спалює понад 1,4 млн тонн відходів на рік, виробляючи електроенергію, тепло і навіть відновлюючи метали зі шлаку.

Швейцарія – усі муніципальні відходи спалюються (захоронення не застосовується). Більшість з 30+ WtE-заводів інтегровані у міські системи теплопостачання та електромережі.

Франція – понад 120 установок спалювання, значна частина з яких виробляє тепло для міст (наприклад, Париж має власну мережу централізованого опалення від WtE-заводів).

Австрія має потужний приклад — завод Spittelau у Відні, який не лише переробляє відходи, а й є частиною теплової системи міста; спроектований із урахуванням архітектурної естетики (Ф. Гундертвассер).

Польща наразі, останніми роками активно розвиває WtE. Тут діє понад 10 сучасних заводів, зокрема в Познані, Бидгощі, Щецині, Бялостоці. Познанський завод виробляє електроенергію і тепло для міської мережі, обслуговуючи понад 20% потреб у теплі. Наразі ця система у наших сусідів перебуває на стадії формування.

Львівська область має достатні обсяги ТПВ (понад 500 тис. тонн щороку), а також розвинену систему теплопостачання у містах, що відкриває можливості для будівництва сучасного заводу з енергетичної утилізації відходів, зокрема: у форматі комбінованого виробництва тепла й електроенергії, що могло б частково компенсувати дефіцит палива в опалювальний сезон; із суворим дотриманням екологічних норм та впровадженням європейських технологій очищення. Водночас, перед реалізацією такого проєкту необхідно: провести екологічну оцінку впливу; забезпечити сортування відходів, щоб зменшити обсяг небезпечних фракцій; передбачити систему моніторингу викидів у реальному часі; врахувати соціальну прийнятність (прозорість, участь громад).

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці спрямована на захист життя, здоров'я та працездатності людини під час виконання трудових обов'язків. Основні положення законодавства України з охорони праці закріплені у Конституції України, Кодексі законів про працю, а також у Типових положеннях щодо організації навчання і перевірки знань з охорони праці, затверджених наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 26.01.2005 № 15 та зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 15.02.2005 за № 231/10511.

Під час укладання трудового договору та при виконанні трудових обов'язків працівник ознайомлюється з правами та обов'язками у сфері охорони праці, що є частиною інструктажу при прийомі на роботу. До нього входять: державний нагляд та громадський контроль за охороною праці; обов'язки роботодавця щодо забезпечення безпечних умов праці; організація системи управління охороною праці в апараті відповідного відомства; обов'язки працівника щодо дотримання законодавчих та нормативно-правових актів у сфері охорони праці; відповідальність працівника за порушення правил охорони праці; соціальне страхування від нещасних випадків та професійних захворювань.

Таким чином, охорона праці забезпечує системний підхід до безпеки трудової діяльності, поєднуючи правові, організаційні та навчальні заходи для мінімізації ризиків на робочому місці.

Для працівників енергетичної галузі правила охорони праці розробляють згідно Закону України «Про охорону праці» та затверджують наказом Державного нагляду за охороною праці. Державна політика України у сфері охорони здоров'я та праці базується на принципах:

- ✓ пріоритету життя та здоров'я працівників над виробничими показниками;
- ✓ повної відповідальності власника або керівника підприємства за створення безпечних та нешкідливих умов праці;

- ✓ зниження виробничих ризиків, включно з ризиками нещасних випадків та професійних захворювань.

Для підприємств енергетики це означає необхідність:

- системного аналізу та контролю потенційно небезпечних виробничих процесів;
- забезпечення захисними засобами, сигналізаціями та інженерними бар'єрами при роботі з електроустановками, високими напругами та паливними матеріалами;
- регулярного навчання та інструктажу персоналу з питань безпеки на робочих місцях;
- впровадження програм профілактики аварій та планів дій на випадок надзвичайних ситуацій.

Таким чином, охорона праці на енергетичних підприємствах є заходом комплексним, що поєднує правові, організаційні та технологічні рішення для забезпечення безпеки працівників, відвідувачів та довкілля.

Норми охорони праці, виробничої санітарії, робочого часу, відпочинку, переведення на іншу роботу, а також спеціальні вимоги до жінок і молоді визначаються чинним законодавством. Загальний нагляд за дотриманням норм покладено на прокуратуру, спеціальний – на профспілки, а контроль за безпекою праці здійснюють державні та відомчі інспекції, зокрема Енергонагляд. Управління охороною праці включає правові, організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи, спрямовані на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників.

У разі аварійних ситуацій працівники повинні неухильно виконувати встановлені правила поведінки. По закінченні роботи необхідно вимкнути електроустаткування, прибрати відходи та забезпечити безпеку на ділянці. Робочі зони повинні мати попереджувальні знаки, відповідне забарвлення обладнання, розмітку проїздів і проходів. Відстані між обладнанням, ширина проходів та проїздів мають відповідати нормам техніки безпеки.

РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНА ОБОРОНА

Цивільна оборона – це система організацій, сил і засобів, що забезпечує безпеку населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, екологічного, природного чи воєнного характеру. Інколи її також називають цивільним захистом – механізмом, основним призначенням якого є захист людей, майна та економічних цінностей під час надзвичайних подій.

У сучасних умовах глобальної енергетичної нестабільності цивільна оборона набуває особливої актуальності. Порушення постачання енергоресурсів, аварії на електростанціях, транспортні перебої та наслідки військових конфліктів створюють серйозні загрози для безпеки населення та функціонування критичної інфраструктури. Цивільна оборона, або цивільний захист, у цьому контексті виступає як система організацій, сил і засобів, що забезпечує захист людей, майна та економічних цінностей під час надзвичайних ситуацій, пов'язаних із енергетичною кризою.

Ефективна цивільна оборона включає превентивні заходи, підготовку персоналу та населення до аварійних ситуацій, організацію резервних джерел енергії та координацію дій між енергетичними підприємствами, органами влади та службами екстреного реагування. У період енергетичних потрясінь такі заходи дозволяють мінімізувати негативний вплив на економіку, соціальну сферу та екологію, забезпечуючи стійкість критичної інфраструктури та безпеку громадян.

Система цивільного захисту (ЦЗ) в Україні є невід'ємною частиною системи національної безпеки, спрямованою на захист населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій. Вона охоплює запобігання, реагування та ліквідацію наслідків техногенних, природних, екологічних та воєнних надзвичайних ситуацій.

У Львівській області функціонує Департамент з питань цивільного захисту, який координує діяльність місцевих органів виконавчої влади, силових структур та інших суб'єктів у сфері цивільного захисту. Основні завдання департаменту включають:

- Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій;
- Організацію заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- Підготовку населення до дій у надзвичайних ситуаціях;
- Координацію діяльності органів і підрозділів цивільного захисту.

Цивільний захист тісно інтегрований з енергетичним сектором області. Зокрема, у серпні 2025 року на Львівщині відбулися масштабні навчання з реагування на надзвичайні ситуації на об'єктах енергетичної інфраструктури. Участь у заходах брали представники Департаменту з питань цивільного захисту, територіальних та функціональних підсистем Єдиної державної системи цивільного захисту, а також енергетичних компаній. Навчання були спрямовані на відпрацювання злагоджених дій у разі надзвичайних ситуацій на об'єктах паливно-енергетичного комплексу, зокрема в умовах воєнних дій. Такі заходи сприяють підвищенню рівня готовності енергетичних об'єктів до надзвичайних ситуацій, забезпеченню безперервності енергопостачання та зменшенню ризиків для населення та навколишнього середовища.

У контексті сучасних загроз для енергетичної інфраструктури Львівської області пріоритети системи цивільного захисту визначаються необхідністю забезпечення безпеки населення, безперервності енергопостачання та мінімізації шкоди для довкілля. Основні напрями такі:

- Захист населення та персоналу енергетичних об'єктів
 - Евакуація людей із зон підвищеного ризику.
 - Організація укриттів та безпечних зон на території енергетичних підприємств.
 - Забезпечення оперативного інформування населення про небезпеку.
- Забезпечення безперервності енергопостачання
 - Робота резервних потужностей електростанцій і систем генерації.
 - Підтримка альтернативних джерел енергії та аварійних резервів палива.

- Координація між державними службами та приватними енергетичними компаніями для швидкого відновлення енергопостачання.
- Попередження та локалізація аварій
 - Оперативне реагування на пошкодження енергетичних об'єктів (підстанції, ЛЕП, ТЕС).
 - Виявлення та усунення загроз займання, вибухів або витоку небезпечних речовин.
 - Застосування систем дистанційного контролю та моніторингу критичних вузлів енергосистеми.
- Зменшення екологічних та соціальних ризиків
 - Контроль за забрудненням повітря, води та ґрунту у разі аварій.
 - Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій на енергетичних об'єктах.
 - Забезпечення безпечного поводження з відходами та небезпечними матеріалами.
- Підготовка та навчання персоналу
 - Регулярні тренування з реагування на атаки або аварії на енергетичних об'єктах.
 - Проведення інструктажів і навчальних занять для всіх співробітників енергетичних підприємств.
 - Розробка і відпрацювання планів дій на випадок надзвичайних ситуацій.

Система моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій в енергетиці регулюється Кабінетом Міністрів України. На регіональному, місцевому та об'єктовому рівнях конкретні суб'єкти спостереження, контролю та прогнозування визначаються місцевими адміністраціями, органами самоврядування та енергетичними підприємствами. Це забезпечує своєчасне виявлення ризиків та оперативне реагування на надзвичайні ситуації.

ВИСНОВКИ

Людство використовує широкий спектр енергетичних ресурсів, серед яких: викопні паливні (вугілля, нафта, природний газ), викопні неуглецеві (радіоактивні ізотопи — уран, плутоній, торій), біоенергетичні (біогаз, біоетанол, біодизель), а також сонячна, вітрова, гідроенергія та геотермальні ресурси.

Енергетична криза зазвичай виникає внаслідок дефіциту енергетичних ресурсів на значних територіях або у глобальному масштабі, що призводить до обмеження певних видів діяльності чи вимушеного переходу на альтернативні, економічно менш вигідні джерела енергії.

Об'єкти енергетичного сектору мають суттєвий вплив на стан атмосферного повітря, спричиняючи його забруднення як на етапах видобутку, так і використання енергетичних ресурсів. Зокрема, вугледобувні шахти є джерелами значних обсягів метану та інших газів, які викидаються в атмосферу під час видобутку. Теплові електростанції, що наразі залишаються основним типом потужностей електро генерації, спалюють великі кількості викопного вуглецевого палива. У результаті цього в повітря надходять значні обсяги оксидів вуглецю, азоту та сірки, а також твердих зважених частинок, які погіршують якість атмосферного середовища. Виробництво та використання біопалива також супроводжується викидами у атмосферу.

Погіршення якості повітря є не лише екологічною проблемою, а й важливим фактором соціально-економічної безпеки, що потребує системного управління та інтегрованих політик у сфері енергетики, охорони здоров'я та довкілля. В умовах енергетичної та економічної кризи часто вимушено переходять на менш екологічне паливо, наприклад з газу на вугілля, наслідком чого є зростання викидів у повітря, а погіршення якості атмосферного повітря має комплексні екологічні та соціально-економічні наслідки (зростання концентрацій забруднювальних речовин, порушення екосистемної рівноваги, зміни клімату, зростання захворюваності населення, погіршення якості життя, економічні збитки та потребу додаткових витрат).

У Львові, Львівській області та східних регіонах Польщі, які характеризуються спільними атмосферними потоками, якість повітря за індексом AQI переважно перебуває на межі зеленої та жовтої зон, що свідчить про відносно задовільний стан атмосферного середовища.

У всьому регіоні щороку фіксується помітне погіршення якості повітря з початком опалювального сезону, насамперед через зростання концентрацій дрібнодисперсного пилу PM_{2.5}.

У середньому показники якості повітря в Польщі є дещо кращими, однак на початку опалювального періоду спостерігається більш різке (аж до червоних зон індексу) погіршення, ніж на Львівщині, де сезонні коливання індексу AQI мають помірніший характер.

Основні викиди у атмосферу Львівщини походять від стаціонарних та пересувних джерел у порівнянних обсягах. Серед перших переважають метан, дані із значним відривом сполуки сірки, тверді суспендовані частки, оксиди вуглецю та сполуки азоту. Серед других основними компонентами є CO, CO₂, NO_x, вуглеводні, тверді частинки та в менших кількостях SO_x та токсичні органічні сполуки. Їхній вплив є комплексним — вони погіршують якість повітря, становлять загрозу для здоров'я та беруть участь у формуванні вторинних забруднювачів (зокрема фотохімічного смогу).

Для зниження негативного впливу енергетичної кризи та покращення стану атмосферного повітря варто дотримуватись таких рекомендацій:

- ✓ Оптимізувати структуру енергетичного балансу (у т.ч. шляхом збільшення частки відновлюваних джерел енергії, декарбонізації);
- ✓ Модернізувати енергетичну інфраструктуру (очисні системи, канали передачі, більш ефективні технології)
- ✓ Стимулювати енергозбереження та зменшення споживання
- ✓ Зменшувати транспортні викиди
- ✓ Підвищувати ефективність моніторингу та управління

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабаченко О. І., Нестеров О. С. Гармаш, Л. І. (2022). Декарбонізація та енергетична криза. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*, (36), 35-48.
2. Бахарєв В.С. Комплексна система екологічного моніторингу атмосферного повітря урбосистем [Текст]: дисертація ... д-ра техн. наук, спец.: 21.06.01 - екологічна безпека / В.С. Бахарєв; наук. консультант В.М. Шмандій. - Кременчук: Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського, 2018. - 402 с.
3. Браташ А. Екологічна оцінка впливу Добротвірської ТЕС та розробка науково-обґрунтованих природоохоронних заходів. Кваліфікаційна робота. Кафедра екології. Львів-Дубляни, Львівський НУП, 2024, 69 с.
4. Вакерич М. М., Гасинець Я. С., Гедзур Т. І. Практична реалізація інноваційних технологій навчання у закладах вищої освіти України в умовах енергетичної кризи: відповідь на сучасні виклики. *Академічні візії*. 2023. Вип. 17.
5. Вольчин І. А., Гапонич Л. С. (2019). Оцінка викидів забруднюючих речовин на теплових електростанціях України. *Проблеми загальної енергетики*, (4), 45-53.
6. Головне управління статистики у Львівській області [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/>
7. Горбатенко В. П. Енергетична безпека: зміна підходів до розуміння / В. П. Горбатенко, О. В. Кукуруз // Політикус : наук. журнал. – 2023. – № 4. – С. 37-42.
8. Драганов, Б. Х. (2012). Енергетичні ресурси і еволюція їхнього розвитку. *Науково-технічна інформація*, (4), 40-45.
9. Дугінець, Г. В. (2014). Дослідження проявів енергетичної кризи в умовах глобалізації. *Економічний простір*, (90), 23-31.

10. Екологічний паспорт Львівської області за даними 2024 року [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://deplv.gov.ua/ekologichnyj-rasport/>
11. Забруднення повітря в Польщі. [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://aqicn.org/country/poland/uk/>
12. Кошлак Г. В., Павленко А. М. (2017). Зменшення техногенного впливу вугільних ТЕС на довкілля (на прикладі Бурштинської ТЕС). *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, (2), 108-118.
13. Новаківський Є. В. Захист навколишнього середовища. Розрахунок викидів на ТЕС [Електронний ресурс] : навч. посіб. для виконання розрахункової роботи для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування» освітньо-професійної програми «Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем» / Є. В. Новаківський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 65 с.
14. Соловей О.І. та ін. Нетрадиційні поновлювальні джерела енергії: Навч. посіб. / О.І. Соловей, О.Г. Леча, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В. Чернявський, Г.В. Курбака; за заг. ред. О.І. Солов'я. – Черкаси: ЧДГ, 2007. – 483 с.
15. Ткачук, О. П., & Мазур, О. В. (2024). Проблеми адаптації системи моніторингу атмосферного повітря в Україні до вимог Європейського Союзу. *Екологічні науки*. 2024. Т. 1. № 1 (52). С. 65-70. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.9>.
16. УкрГМЦ - Погода в Україні, гідрологічна та радіаційна ситуація [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://www.meteo.gov.ua/>
17. Шпілевський В. В. Аналітичні аспекти оцінки енергетичної залежності в нафтодефіцитних країнах / В. В. Шпілевський, Ю. А. Сапронов, Т. І. Салашенко // Проблеми економіки №1. – 2013. – С. 14–21.
18. Як Європа позбувається залежності від російських енергоресурсів. [Електронний ресурс]. – Доступний з: https://finance.ua/saving/jak-evropa-pozbuvaetsia-zalezhnosti-vid-rosijskyh-energoresursiv#headline_4.

19. Якість повітря в Україні онлайн – карта моніторингу якості повітря - SaveEcoBot [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://www.saveecobot.com/>
20. Abbas, S., Ali, G., Qamer, F. M., & Irteza, S. M. (2022). Associations of air pollution concentrations and energy production dynamics in Pakistan during lockdown. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(23), 35036–35047.
21. Ahn, H., Lee, J., & Hong, A. (2022). Urban form and air pollution: Clustering patterns of urban form factors related to particulate matter in Seoul, Korea. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103859.
22. Axon C. J., Darton R. C. Sustainability and Risk – A Review of Energy Security. *Sustainable Production and Consumption*. 2021. Vol. 27. P. 1195–1204.
23. Bera, M., Das, S., Garai, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Tripathi, S., & Chatterjee, G. (2025). Advancing energy efficiency: innovative technologies and strategic measures for achieving net zero emissions. *Carbon Footprints*, 4(1), N-A.
24. Feygin M., Satkin R. The oil reserves-to-production ratio and its proper interpretation. *Natural Resources Research*. – 2004, 13(1). P. 57-60.
25. Fossil Fuels Accounted for 82% of Global Energy Mix in 2023 Amid Record Consumption: Report [Електронний ресурс]. – Доступний з: <https://earth.org/fossil-fuel-accounted-for-82-of-global-energy-mix-in-2023-amid-record-consumption-report/>
26. Guo, B., Zhang, D., Pei, L., Su, Y., Wang, X., Bian, Y., ... & Guo, L. (2021). Estimating PM_{2.5} concentrations via random forest method using satellite, auxiliary, and ground-level station dataset at multiple temporal scales across China in 2017. *Science of The Total Environment*, 778, 146288.
27. He, C., Liu, C., Chen, R., Meng, X., Wang, W., Ji, J., ... & Kan, H. (2022). Fine particulate matter air pollution and under-5 children mortality in China: a national time-stratified case-crossover study. *Environment International*, 159, 107022.

28. Hu, F., & Guo, Y. (2021). Impacts of electricity generation on air pollution: Evidence from data on air quality index and six criteria pollutants. *SN Applied Sciences*, 3(1), 4.
29. Jassim, T. L. (2024, November). The Renewable Energy Investments for Sustainable Economic Growth in the Developing Countries: The Energy Cost Reduction Perspective. In *The Global Conference on Entrepreneurship and the Economy in an Era of Uncertainty* (pp. 1135-1149). Singapore: Springer Nature Singapore.
30. Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., ... & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506.
31. Kot, M. (2025). Energy Transition of Poland Supports the Dynamic Development of Photovoltaics-Quantitative Analysis. *Acta Montanistica Slovaca*, 30(1).
32. Kuzemko C., Blondeel M., Dupont C., Brisbois M. C. Russia's war on Ukraine, European energy policy responses & implications for sustainable transformations. *Energy Research & Social Science*. 2022. Vol. 93, article 102842.
33. Liang, C. S., Duan, F. K., He, K. B., & Ma, Y. L. (2016). Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5}. *Environment International*, 86, 150-170.
34. Liu, J., Opoku, A., Karikari, F. A., Fumey, M. P., & Boateng, S. A. (2025). Green energy vs. fossil fuels: their impact on agricultural productivity in the renewable energy pioneers. *Environment, Development and Sustainability*, 1-31.
35. Mainka, A., & Fantke, P. (2022). Preschool children health impacts from indoor exposure to PM_{2.5} and metals. *Environment international*, 160, 107062.
36. Motlagh, N. H., Lagerspetz, E., Nurmi, P., Li, X., Varjonen, S., Mineraud, J., ... & Tarkoma, S. (2020). Toward massive scale air quality monitoring. *IEEE Communications Magazine*, 58(2), 54-59.

37. Muralidharan M., Srivastava A., Subramanian M., A Technical Review on Performance and Emissions of Compressed Natural Gas - Diesel Dual Fuel Engine, SAE Technical Paper 2019-28-2390, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-28-2390>.
38. Nica, I., Georgescu, I., & Kinnunen, J. (2024). Evaluating Renewable Energy's Role in Mitigating CO₂ Emissions: A Case Study of Solar Power in Finland Using the ARDL Approach. *Energies*, 17(16), 4152.
39. Ogbu, A. D., Ozowe, W., & Ikevuje, A. H. (2024). Data science's pivotal role in enhancing oil recovery methods while minimizing environmental footprints: An insightful review. *Computer Science & IT Research Journal*, 5, 1621-1633.
40. Overland I., Juraev J., Vakulchuk R. Are renewable energy sources more evenly distributed than fossil fuels? *Renewable Energy*. 2022. Vol. 200. P. 379–386.
41. Qiu, M., Zigler, C. M., & Selin, N. E. (2022). Impacts of wind power on air quality, premature mortality, and exposure disparities in the United States. *Science Advances*, 8(48), eabn8762.
42. Rabl, A., & Spadaro, J. V. (2000). Public health impact of air pollution and implications for the energy system. *Annual review of Energy and the Environment*, 25(1), 601-627.
43. Rogula-Kozłowska W, Klejnowski K, Rogula-Kopiec P, Ośródka L, Krajny E, Błaszczak B, Mathews B. Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Poland. *Air Qual Atmos Health*. 2014;7(1):41-58. doi: 10.1007/s11869-013-0222-y. Epub 2013 Dec 8. PMID: 24634701; PMCID: PMC3945481.
44. Rys, A., Samek, L., Stegowski, Z. *et al.* Comparison of concentrations of chemical species and emission sources PM_{2.5} before pandemic and during pandemic in Krakow, Poland. *Sci Rep* 12, 16481 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21012-x>

45. Tripathy, P., Jena, P. K., & Mishra, B. R. (2024). Systematic literature review and bibliometric analysis of energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114583.
46. Trusz, A., Ghazal, H., & Piekarska, K. (2020). Seasonal variability of chemical composition and mutagenic effect of organic PM_{2.5} pollutants collected in the urban area of Wrocław (Poland). *Science of the Total Environment*, 733, 138911.
47. Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., & Boys, B. L. (2015). Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental health perspectives*, 123(2), 135-143.
48. Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience frontiers*, 15(2), 101757.
49. Wang, X. C., Klemeš, J. J., Dong, X., Fan, W., Xu, Z., Wang, Y., & Varbanov, P. S. (2019). Air pollution terrain nexus: A review considering energy generation and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 71-85.
50. Worldwide Air Quality – AirNet Sensor Network [Электронный ресурс]. – Доступный з: <https://aqicn.org/station/>
51. Wu, D., Xie, Y., & Liu, D. (2023). Rethinking the complex effects of the clean energy transition on air pollution abatement: Evidence from China's coal-to-gas policy. *Energy*, 283, 128413.
52. Zhao, R., Gu, X., Xue, B., Zhang, J., & Ren, W. (2018). Short period PM_{2.5} prediction based on multivariate linear regression model. *PloS one*, 13(7), e0201011.

Додаток А

Дані на сайті <https://aqicn.org/station/ukraine-lviv-kulparkivska-street/> щодо вул. Кульпарківській у Львові за показниками $PM_{2.5}$, PM_{10} (фрагмент)

Sensor Kulparkivska Street, Lviv, Ukraine (Citizen Science project sensor.community/92442)

<https://aqicn.org/station/@526861/>

Daily pm25

date,min,max,median,q1,q3,stdev,count

2025-02-10T00:00:00.000Z,42,67,54,49,58,5.541,62

2025-02-11T00:00:00.000Z,24,66,42,36,52,9.267,147

2025-02-12T00:00:00.000Z,13,55,34,30,39,6.116,257

2025-02-13T00:00:00.000Z,31,66,48,45,52,6.78,246

2025-02-14T00:00:00.000Z,7,73,54,46,60,12.643,172

2025-02-15T00:00:00.000Z,0,30,12,7,18,6.682,229

2025-02-16T00:00:00.000Z,7,69,18,13,25,8.372,173

2025-02-17T00:00:00.000Z,10,69,25,19,34,12.193,235

2025-02-18T00:00:00.000Z,13,72,46,34,54,13.524,215

2025-02-19T00:00:00.000Z,15,73,43,24,55,17.03,286

2025-02-20T00:00:00.000Z,7,60,16,12,33,14.34,286

2025-02-21T00:00:00.000Z,4,27,10,9,13,3.959,287

2025-02-22T00:00:00.000Z,4,41,21,13,27,8.726,288

2025-02-23T00:00:00.000Z,21,64,44,36,51,9.643,288

2025-02-24T00:00:00.000Z,45,85,66,60,72,8.307,288

2025-02-25T00:00:00.000Z,26,112,66,58,73,16.183,288

2025-02-26T00:00:00.000Z,26,75,55,40,5,67,14.303,288

2025-02-27T00:00:00.000Z,41,85,72,55,76,11.493,202

2025-02-28T00:00:00.000Z,52,103,60,56,65,8.431,50

2025-03-01T00:00:00.000Z,20,76,45,36,53,11.225,192

2025-03-02T00:00:00.000Z,15,54,33,27,39,7.982,288

2025-03-03T00:00:00.000Z,21,53,39,34,45,7.035,287

2025-03-04T00:00:00.000Z,17,64,42,31,51,11.704,288

2025-03-05T00:00:00.000Z,6,59,33,19,43,13.413,286

2025-03-06T00:00:00.000Z,31,52,41,37,45,5.148,73

2025-03-07T00:00:00.000Z,5,43,27,11,33,11.292,215

2025-03-08T00:00:00.000Z,22,78,44,38,54,11.596,286

2025-03-09T00:00:00.000Z,26,71,50,5,43,55,9.307,274

2025-03-10T00:00:00.000Z,27,61,52,39,56,5,9.728,53

2025-03-11T00:00:00.000Z,5,51,16,11,26,10.368,287

2025-03-12T00:00:00.000Z,2,25,7,5,9,3.581,274

2025-03-13T00:00:00.000Z,0,37,6,2,11,7.032,197

2025-03-14T00:00:00.000Z,11,64,35,27,43,12.312,150

2025-03-15T00:00:00.000Z,15,40,21,5,17,36,5,9.797,8

...

Sensor Kulparkivska Street, Lviv, Ukraine (Citizen Science project sensor.community/92442)

<https://aqicn.org/station/@526861/>

Daily pm10

date,min,max,median,q1,q3,stdev,count

2025-02-10T00:00:00.000Z,55,91,74,66,79,8.375,62

2025-02-11T00:00:00.000Z,31,91,55,46,69,13.493,147

2025-02-12T00:00:00.000Z,22,76,45,39,51,8.399,257

2025-02-13T00:00:00.000Z,35,90,64,57,70,10.247,246

2025-02-14T00:00:00.000Z,13,100,72,60.5,79,17.65,172

2025-02-15T00:00:00.000Z,0,37,15,9,21.5,8.215,229

2025-02-16T00:00:00.000Z,9,96,24,16,31,11.554,173

2025-02-17T00:00:00.000Z,12,94,33,25,44,15.894,235

2025-02-18T00:00:00.000Z,15,97,60,43,75,19.43,215

2025-02-19T00:00:00.000Z,16,100,54,33,75,24.096,286

2025-02-20T00:00:00.000Z,7,87,19,15,45,19.837,286

2025-02-21T00:00:00.000Z,6,33,15,10,18,5.205,287

2025-02-22T00:00:00.000Z,6,49,27,18,34,10.449,288

2025-02-23T00:00:00.000Z,28,85,55,43,67,13.898,288

2025-02-24T00:00:00.000Z,58,115,87,79,96,12.186,288

2025-02-25T00:00:00.000Z,29,133,85.5,74,97,22.103,288

2025-02-26T00:00:00.000Z,28,105,73,51,89,21.256,288

2025-02-27T00:00:00.000Z,54,113,94,73,102,16.05,202

2025-02-28T00:00:00.000Z,61,119,81.5,78,87,10.543,50

2025-03-01T00:00:00.000Z,21,100,57,43,70,16.12,192

2025-03-02T00:00:00.000Z,18,73,42,34,49,11.195,288

2025-03-03T00:00:00.000Z,25,73,49,43,57,9.663,287

2025-03-04T00:00:00.000Z,22,90,50,37,67,17.494,288

2025-03-05T00:00:00.000Z,6,81,40,23,52,17.559,286

2025-03-06T00:00:00.000Z,37,69,50,46,58.5,9.048,73

2025-03-07T00:00:00.000Z,5,57,31,13,39,13.831,215

2025-03-08T00:00:00.000Z,22,102,56,45,69,17.202,286

2025-03-09T00:00:00.000Z,28,91,65,54,73,13.871,274

2025-03-10T00:00:00.000Z,31,82,69,51.5,74,14.606,53

2025-03-11T00:00:00.000Z,5,66,19,12,30,12.879,287

...

Додаток Б

Використання основних видів палива у Львівській області (дані ГУСуЛО)
http://database.ukrcensus.gov.ua/statbank_lviv/Dialog/Saveshow_n.asp

Використано за місяць

	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Вугілля кам'яне, т												
2016	114 380,3	103 473,5	118 501,0	123 948,2	106 334,8	112 646,5	106 607,8	116 302,8	86 632,8	85 063,5	90 183,8	120 838,2
2017	123 179,2	100 371,4	135 863,7	107 409,0	118 481,8	124 686,8	138 003,2	149 837,5	120 635,3	128 695,7	147 172,2	156 213,9
2018	141 719,9	135 677,7	124 396,5	82 651,0	86 539,4	87 313,4	111 224,6	81 156,7	89 863,3	117 445,5	136 913,2	143 355,8
2019	141 924,8	92 533,8	91 024,3	65 681,3	102 301,2	118 832,6	103 724,7	115 766,7	87 602,1	96 396,7	70 518,2	86 045,4
2020	87 231,2	83 401,0	85 605,8	62 631,5	94 147,6	55 509,5	83 641,6	69 661,0	85 278,2	93 356,9	109 330,4	119 855,8
2021	103 157,1	88 692,7	88 485,3	55 070,7	70 973,3	59 897,0	106 784,6	69 960,6	58 377,0	105 507,4	96 238,1	103 671,8
2022	128 380,1	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Нафта сира, включаючи газовий конденсат, т												
2016	151,8	176,6	239,8	216,8	199,2	218,2	208,3	319,2	292,0	294,5	244,5	214,7
2017	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2018	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2019	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2020	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2021	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2022	к	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Газ природний, тис. куб.м												
2016	399 070,0	212 386,8	207 959,1	107 939,6	67 619,2	61 504,0	61 824,0	72 216,8	82 782,2	156 138,2	214 168,9	268 612,3
2017	318 079,9	241 383,2	171 762,0	119 038,8	75 207,4	65 770,1	69 369,1	67 756,9	75 440,4	114 823,0	183 262,0	227 906,6
2018	254 075,5	269 869,0	264 476,0	86 531,8	70 452,3	64 193,8	63 727,8	59 098,1	66 915,1	89 649,3	164 543,1	228 730,3
2019	261 980,7	180 442,6	156 104,9	88 076,6	60 940,8	47 811,6	52 299,0	54 024,1	62 768,7	84 092,8	142 394,8	185 828,4
2020	202 649,5	175 014,8	151 678,6	87 086,7	69 931,9	51 075,3	50 237,8	65 458,6	74 286,4	113 830,1	159 751,3	202 887,1
2021	196 184,5	184 873,7	163 930,1	113 257,6	51 149,3	36 400,7	38 121,3	41 280,5	54 002,9	96 415,9	132 975,3	191 920,7
2022	184 738,4	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Бензин моторний, т												
2016	10 738,7	9 470,1	11 140,8	12 002,6	11 822,9	11 632,5	11 954,8	12 310,9	11 095,2	11 573,8	10 887,7	10 519,9
2017	9 518,7	9 472,2	10 065,7	10 809,1	10 761,6	10 735,5	10 814,0	10 981,2	11 231,7	10 551,3	9 746,9	9 270,5
2018	8 527,4	7 255,0	8 034,8	10 419,2	9 951,0	9 664,9	9 849,2	10 157,0	9 580,6	9 348,1	8 724,6	8 107,4
2019	7 590,3	7 263,8	7 645,0	8 114,0	8 337,8	8 898,4	9 037,6	9 478,1	8 732,7	8 706,5	8 342,3	8 246,2
2020	7 778,9	7 750,5	7 717,0	6 835,0	7 813,6	8 784,6	9 421,9	9 594,2	9 030,1	8 678,1	7 918,8	8 019,5
2021	7 772,2	7 252,1	7 882,5	8 770,3	10 160,6	10 558,9	11 175,9	11 249,3	10 594,7	10 526,9	9 671,7	10 342,8
2022	10 373,4	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Газойлі (паливо дизельне), т												
2016	18686,2	19443,5	24066,1	25129,2	23411,8	22731,8	26521,5	29844,2	28995,2	29378,0	26758,2	24696,1
2017	20049,5	20911,2	23987,8	25913,1	26203,8	23922,6	26720,7	27921,6	27400,3	28284,9	26376,4	23966,3
2018	21539,9	19713,9	22086,5	27852,9	28068,8	25802,1	28387,3	30635,4	30033,2	29978,6	27798,6	24325,8
2019	21291,9	21176,3	25094,2	25349,0	25792,7	27383,2	32028,8	32165,8	31922,9	34235,4	31670,7	28949,0

2020	25706,7	26300,6	26319,0	23619,3	22647,3	24442,3	30739,8	33655,8	31627,2	32190,9	32583,8	30084,1
2021	21267,7	23471,2	25600,4	27921,8	27819,6	27978,7	29876,7	32455,6	32093,0	34887,3	33949,7	31085,4
2022	30546,3	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Мазути паливні важкі, т												
2016	1291,3	3686,3	2276,5	2400,3	775,1	937,1	948,3	950,7	900,6	892,4	2785,6	2515,6
2017	3355,8	2561,7	2046,0	2297,6	5042,0	3527,9	3231,2	4651,1	4501,8	4589,2	7738,2	5562,2
2018	6299,2	5628,7	5739,8	6130,7	5399,1	3799,0	3556,7	1870,1	104,5	68,4	20,2	-
2019	к	к	-	к	-	-	-	к	к	к	к	к
2020	-	-	к	к	к	к	к	к	к	к	к	к
2021	-	-	-	-	-	-	-	к	-	-	-	к
2022	к	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Пропан і бутан скраплені, т												
2016	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2017	2830,8	3025,6	3370,3	3664,4	3761,7	3823,0	3840,9	3579,0	3129,5	3209,2	3091,6	2956,8
2018	2893,6	2488,7	2814,2	3912,9	4014,5	4034,7	4178,5	4334,4	4164,6	4105,5	3980,9	3711,7
2019	3443,3	3204,0	3378,8	3631,0	3826,9	4356,7	4501,7	4851,8	4662,0	4742,5	4602,0	4517,1
2020	4228,3	4452,9	4161,4	3534,0	4143,4	4722,3	4823,1	4977,1	4696,2	4457,8	3784,6	3712,7
2021	4106,8	3931,0	4538,9	4756,2	5399,0	5181,2	к	7058,1	6639,8	5838,3	6106,3	5080,7
2022	5336,8	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

Символ (к) – дані не оприлюднюються з метою забезпечення виконання вимог Закону України ``Про державну статистику`` щодо конфіденційності статистичної інформації;

Тире (–) – явищ не було;

Крапки (...; ...) – відомості відсутні.

Resume

Theme: Impact of the energy crisis on air quality

Goal: study of the impact of the energy sector in the context of the energy crisis on air quality in the conditions of Western Ukraine and adjacent regions

Object: atmospheric air in the Lviv region

Subject: air quality in the context of the impact of energy facilities

Tasks to study:

- To investigate the main types of energy resources and clarify the essence of the energy crisis;
- To characterize the main sources of air pollution associated with energy production and consumption, including traditional and reserve energy capacities.
- To analyze the environmental and socio-economic consequences of air quality deterioration caused by changes in the energy sector.
- To analyze the current state of the energy sector of Western Ukraine and adjacent regions, to determine the dynamics and structure of pollutant emissions
- To develop recommendations for reducing the negative impact of the energy crisis on the state of air;

The first section of the work examines the main energy resources of humanity and the problems associated with their exploitation. The essence and nature of energy crises are analyzed. The environmental consequences of obtaining and using energy resources are studied. The main directions of the transition to renewable energy sources are reviewed and their limitations now are established.

The second section examines the methods, techniques and tools for analyzing atmospheric air quality. The existing monitoring systems, their capabilities and limitations are analyzed in detail. Particular attention is paid to monitoring stations in western Ukraine and eastern Poland and the system of access to information collected by these stations.

The third section provides a description of the quality and studies the dynamics of air pollution indicators in the region. It is established that the main emissions into the atmospheric air from stationary sources of pollution are associated with enterprises that mine coal and generate electricity and heat. A high correlation between the air quality index and the beginning of the heating season in eastern Poland is confirmed. The prospects for strategic greening of the energy sector in the Lviv region and adjacent territories are outlined.

Summary of the Main Attributes of the Paper

Volume -----	93
Tables -----	7
Pictures -----	25
References -----	52