

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА**

Інститут інформаційних технологій в економіці

Кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики

Освітньо-професійна програма «Економічна кібернетика»

Галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Спеціальність 051 «Економіка»

Форма здобуття освіти: очна (денна)

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**на тему «Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку
України»**

здобувача Бондика Павла Дмитровича

(підпис)

Науковий керівник: доктор економічних наук,
професор **Юрій КОЛЯДА**

(підпис)

**Робота допущена до захисту перед екзаменаційною комісією
з атестації здобувачів вищої освіти (ЕК)**

Завідувач кафедри: кандидат фізико-математичних наук,
професор **Галина ВЕЛИКОІВАНЕНКО**

(підпис)

Київ 2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА**

Інститут інформаційних технологій в економіці

Кафедра штучного інтелекту, моделювання та статистики

Освітньо-професійна програма «Економічна кібернетика»

Галузь знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Спеціальність 051 «Економіка»

ПОГОДЖЕНО

Керівник проектної групи (гарант)
освітньо-професійної програми

Ольга ПРИТОМАНОВА

(підпис)

_____ 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри штучного
інтелекту, моделювання та
статистики

Галина ВЕЛИКОІВАНЕНКО

(підпис)

_____ 2026 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

здобувача вищої освіти

Бондика Павла Дмитровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

очної (денної)

форми здобуття освіти

очної (денної), заочної, дистанційної

на підготовку кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему

«Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України»

Тему затверджено наказом ректора Університету від «16» березня 2026 р. № 417-ст

Кваліфікаційна бакалаврська робота виконується на матеріалах

з інтернет-порталу Our World in Data <https://ourworldindata.org/> , сайту Європейської Комісії
https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025 та ін.

План кваліфікаційної бакалаврської роботи

Розділ 1	Теоретичні засади оцінювання обсягів викидів вуглекислого газу
Розділ 2	Застосування методів машинного навчання для прогнозування світового обсягу викидів вуглекислого газу
Розділ 3	Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України

Об'єкт дослідження:	Економічна природа викидів вуглекислого газу
Предмет дослідження:	Методи і моделі машинного навчання для аналізу та прогнозування обсягу викидів вуглекислого газу.
Мета виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи:	Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України на основі світового досвіду та методів машинного навчання.

Конкретні завдання, які здобувач повинен виконати для досягнення поставленої мети:

У розділі 1: 1) розкриття сутності та економічної природи викидів CO₂ як глобального екологічно-економічного показника; 2) аналіз сучасних тенденції зміни світових викидів CO₂ та їх вплив на економіки країн; 3) проведення огляду наукових підходів та методів машинного навчання до прогнозування еколого-економічних показників.

У розділі 2: 1) опис інформаційної бази дослідження; 2) застосування моделей для прогнозування світового рівня викидів CO₂; 3) Порівняння та оцінювання якості моделей; 4) формування прогнозу та аналіз отриманих результатів.

У розділі 3: 1) аналіз динаміки викидів CO₂ в Україні; 2) дослідження структури джерел викидів; 3) прогнозування обсягів викидів CO₂ в Україні; 4) порівняння показників України зі світовими та європейськими; 5) аналіз екологічної політики України; 6) розробка рекомендацій щодо скорочення викидів.

Завдання підготував
науковий керівник

(підпис)

Юрій КОЛЯДА

(ім'я, прізвище)

«__» _____ 2026 р.

Завдання одержав
здобувач

(підпис)

Павло БОНДИК

(ім'я, прізвище)

«__» _____ 2026 р.

Реферат

Кваліфікаційна бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, що містить 31 найменування на 4 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 60 сторінок друкованого тексту, з яких 52 сторінки основної частини. Робота містить 15 рисунків та 13 таблиць.

«Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України»

Об'єктом дослідження кваліфікаційної бакалаврської роботи є економічна природа викидів вуглекислого газу.

Предметом дослідження є методи і моделі машинного навчання для аналізу та прогнозування обсягу викидів вуглекислого газу.

Мета та завдання виконання дослідження. Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України на основі світового досвіду та методів машинного навчання. Для досягнення поставленої мети у роботі: розкрито сутність та економічну природу викидів CO₂ як глобального еколого-економічного показника; проаналізовано сучасні тенденції зміни світових викидів CO₂ та їх вплив на економіки країн; розглянуто наукові підходи та методи машинного навчання до прогнозування еколого-економічних показників; сформовано інформаційну базу дослідження; побудовано моделі прогнозування світового рівня викидів CO₂; виконано порівняння якості моделей; досліджено динаміку викидів CO₂ в Україні, їх зв'язок з ВВП та енергетичними показниками; побудовано регресійну модель і моделі часових рядів для прогнозування викидів CO₂ в Україні до 2030 року.

Теоретична, методична та практична значущість отриманих результатів полягає в узагальненні теоретичних напрацювань по темі викидів CO₂, обґрунтуванні доцільності використання методів машинного навчання та моделей часових рядів для аналізу еколого-економічних показників, а також у формуванні прогнозу для викидів CO₂ в Україні до 2030 року. Практичне значення роботи також полягає у можливості використання отриманих результатів для оцінювання зв'язків між економічним розвитком, енергоспоживанням і викидами CO₂, а також для обґрунтування напрямів скорочення викидів.

Рік виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи - 2026.

Рік захисту роботи - 2026.

Ключові слова: викиди CO₂, вуглекислий газ, економіка України, машинне навчання, прогнозування, Random Forest, регресійна модель, часові ряди, TSML, енергоспоживання.

В і д г у к
про кваліфікаційну бакалаврську роботу
здобувача освітньо-професійної програми «Економічна кібернетика»
навчально-наукового інституту
«Інститут інформаційних технологій в економіці»

Бондика Павла Дмитровича

на тему «Прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України»

1. Актуальність теми: у всі часи, особливо з епохи промислової революції, збереження довкілля є важлива проблема для будь-якого суспільства, загалом людської спільноти.
2. Позитивні риси кваліфікаційної бакалаврської роботи: вона логічно структурована - наявні теоретична і практична складові; усвідомлене використання таблиць, графіків для унаочнення результатів дослідження прогнозних моделей. Автор згадав про світові тенденції викидів CO₂, проаналізувавши ситуацію в Україні.
3. Наявність самостійних розробок автора: у роботі є елементи самостійної роботи - сформовано інформаційну базу, виконано обробку даних, побудовано прогнозні моделі та наведено результати розрахунків.
4. Цінність теоретичних висновків та практичних рекомендацій: у площині відомих наукових закономірностей перебувають окремі твердження автора. Практична цінність полягає у спробі кількісно оцінити зв'язок між викидами CO₂, ВВП та енергетичними показниками України, а також спроба прогнозувати показники до 2030 року.
5. Наявність недоліків: до недоліків роботи можна віднести недостатню глибину окремих теоретичних положень; обмеженість у використанні лише економетричних моделей; недостатньо розгорнута інтерпретація результатів моделювання. Частина висновків є очікуваною і не завжди достатньо підкріплена кількісними розрахунками. Крім того, через невелику кількість спостережень прогнози слід розглядати як орієнтовні, а не як точні прогнозні оцінки.
6. Загальна оцінка кваліфікаційної бакалаврської роботи та її допущення до захисту перед ЕК: автор, Бондик Павло Дмитрович, відвертий щодо своїх наукових здобутків, зазначає доцільність більш ґрунтовного вивчення проблеми, долучаючи інші підходи; робота відповідає вимогам до кваліфікаційних бакалаврських робіт і може бути допущена до захисту перед екзаменаційною комісією. На мою думку, автор КБР заслуговує високої оцінки.

Науковий керівник: професор, доктор економічних наук

(підпис)

(прізвище, ініціали)

“ ” _____ 2026 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ.....	5
1.1 Сутність та економічна природа викидів CO ₂ як глобального екологічно-економічного показника	5
1.2 Аналіз сучасних тенденцій зміни світових викидів CO ₂ та їх вплив на економіки країн	7
1.3 Огляд наукових підходів та методів машинного навчання до прогнозування еколого-економічних показників.....	15
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СВІТОВОГО ОБСЯГУ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ.....	18
2.1 Інформаційна база дослідження та попередня обробка даних.....	18
2.2 Побудова моделей машинного навчання для прогнозування викидів CO ₂ ..	24
2.3 Порівняння та оцінювання якості моделей	28
2.4 Формування прогнозу та аналіз отриманих результатів.....	29
РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА ЕКОНОМІКУ УКРАЇНИ	33
3.1 Формування інформаційної бази дослідження та аналіз динаміки основних показників	33
3.2 Аналіз взаємозв'язку між викидами CO ₂ , ВВП та енергетичними показниками	37
3.3 Побудова регресійної моделі впливу економічних та енергетичних факторів на викиди CO ₂	39
3.4 Прогнозування викидів CO ₂ в Україні за допомогою моделей часових рядів	42
3.5 Прогноз викидів CO ₂ в Україні до 2030 року.....	45
3.6 Економічна інтерпретація результатів і напрями скорочення викидів CO ₂ в Україні	47
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Актуальність цієї роботи зумовлена наростаючими проблемами у сферах екологічної та енергетичної безпеки в багатьох країнах світу. Одним із найбільших викликів XXI століття є зростання обсягів викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO_2), що має свій вплив не лише на стан довкілля, а й на економічні процеси як на глобальному, так і на національному рівнях. Посилення кліматичних змін, трансформації енергетичних систем, впровадження екологічних стандартів у розвинених країнах формують нові умови функціонування економік різних країн.

Для України ця проблема є особливо важливою з огляду на триваючі бойові дії, залежність від викопних видів палива та необхідність майбутньої адаптації до європейських екологічних вимог. Викиди CO_2 виступають не лише екологічним індикатором, але й фактором, що може впливати на інвестиційну привабливість країни, конкурентоспроможність продукції та загальний рівень економічного розвитку. У зв'язку з цим виникає потреба у аналізі взаємозв'язку між екологічними та економічними показниками, визначенні їх впливу та прогнозуванні.

Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України на основі світового досвіду та методів машинного навчання. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено виконання таких завдань:

- розкрити сутність та економічну природу викидів вуглекислого газу як глобального екологічно-економічного показника;
- проаналізувати сучасні тенденції зміни світових викидів CO_2 та їх вплив на економіки країн;
- проведення огляду наукових підходів та методів машинного навчання до прогнозування еколого-економічних показників;
- побудова моделей для аналізу та прогнозування обсягів викидів CO_2 ;

- аналіз динаміки, структури та впливу викидів в Україні;
- прогнозування впливу викидів CO₂ на економіку України та формулювання висновків.

Об'єктом дослідження є економічна природа викидів вуглекислого газу.

Предметом дослідження є методи і моделі машинного навчання для аналізу та прогнозування обсягу викидів вуглекислого газу.

Інформаційну базу дослідження становлять україномовні та англійськомовні посібники, наукові статті, дослідження та електронні ресурси, які присвячені обраній темі та машинному навчанню і знаходяться у відкритому доступі.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

1.1 Сутність та економічна природа викидів CO₂ як глобального екологічно-економічного показника

В умовах сучасного розвитку світової економіки проблема викидів шкідливих газів, їх впливу на екологію та економіку, стала однією з найбільш актуальних глобальних проблем людства. Збільшення обсягів споживання електроенергії, розвиток транспортної інфраструктури, зростання промислового виробництва, урбанізація спричинили суттєве підвищення концентрації парникових газів в атмосфері. Особливе місце серед них займає вуглекислий газ (CO₂), який, за думкою багатьох дослідників, є основним антропогенним фактором глобального потепління та кліматичних змін.

Вуглекислий газ (CO₂) - це безбарвний газ без запаху, який утворюється внаслідок повного окиснення вуглецю під час горіння, розпаду органічних речовин або природних процесів, таких як дихання, біодеградація чи вулканічна активність. У атмосфері CO₂ виступає довговічним парниковим газом із середнім терміном існування близько 100 років. Його глобальний потеплювальний потенціал (GWP) приймається за одиницю та використовується як еталон для оцінки інших парникових газів [1].

Попри те що CO₂ не вважається токсичним за своєю природою, його накопичення в атмосфері спричиняє затримку тепла, що ймовірно, може призводити до таких наслідків, як глобальне потепління, підвищення рівня океану та збільшення частоти природних катаклізмів. У кліматичних моделях CO₂ є ключовим індикатором порушення балансу вуглецевого циклу, що сприяє підвищенню теплової енергії в атмосфері.

Глобальна концентрація CO₂ в атмосфері Землі почала значно зростати після індустріалізації, піднявшись з близько 280 ppm до промислової революції до 422,8 ppm у 2024 році (рис. 1.1), з поточним темпом зростання 2-3 ppm на рік.

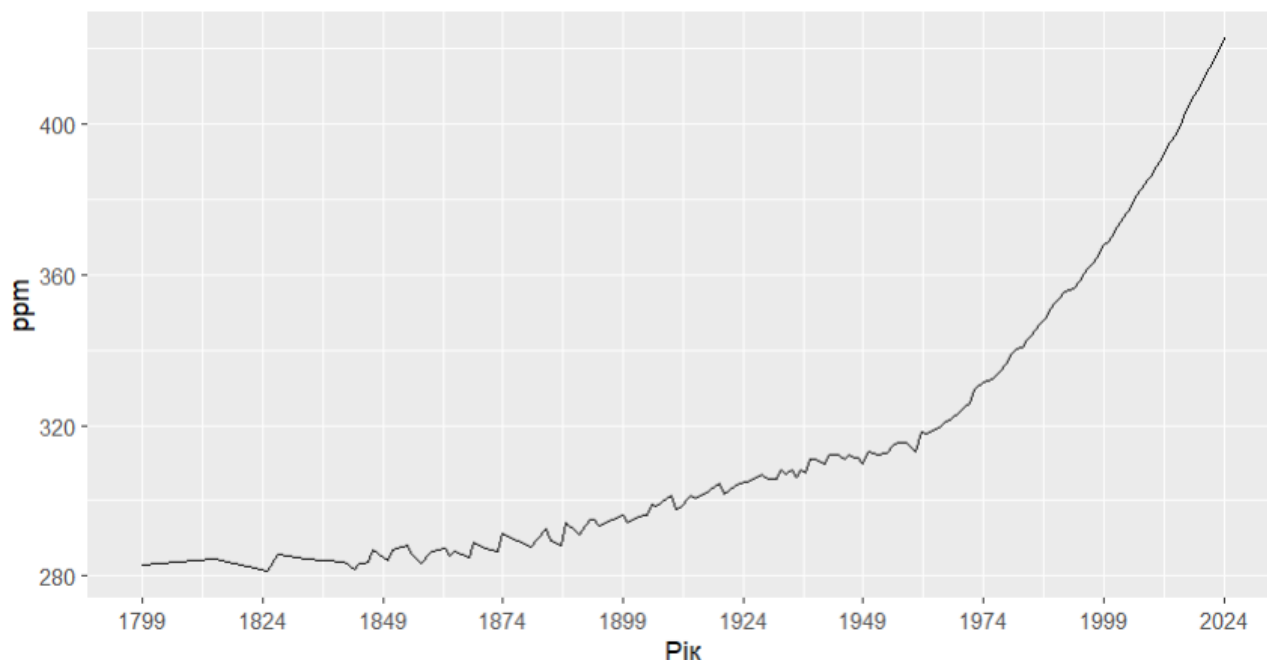


Рисунок 1.1 - Концентрація вуглекислого газу в атмосфері

Джерело: розроблено автором на основі [5]

Підвищення глобальної концентрації вуглекислого газу в атмосфері в основному викликано викидами від економічної діяльності людини, причому близько половини цих викидів походить від електростанцій, транспортного сектору і важкої промисловості (рис. 1.2). Глобальні викиди CO₂, зв'язані з енергетикою, досягли свого нового максимуму в 37,6 Гт у 2024 році [2].

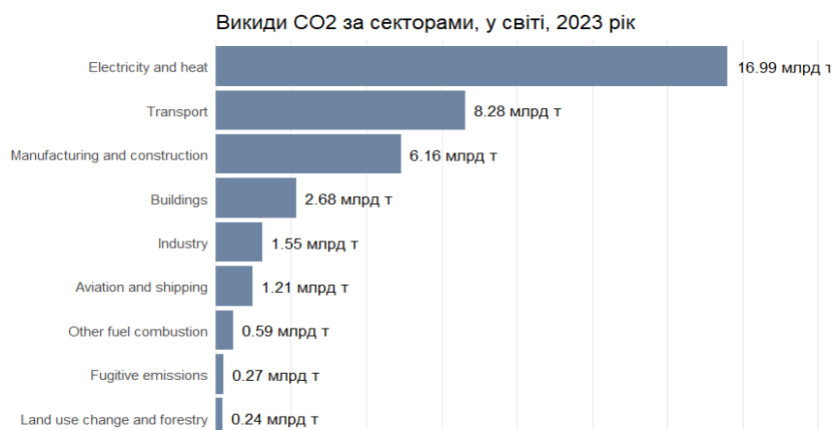


Рисунок 1.2 - Викиди CO₂ за секторами у світі, 2023 рік

Джерело: розроблено автором на основі [6]

Збільшення викидів вуглецю підвищує загрози у вигляді екстремальних погодних явищ, стихійних лих та значних економічних і соціальних втрат. 2024 року концентрація вуглекислого газу в атмосфері вперше в історії людства сягнула найвищого рівня - 422,8 ppm. Такий рівень концентрації вуглекислого газу спостерігався близько 3 - 5 млн років тому, коли температура на Землі була на кілька градусів вищою, ніж тепер. Зокрема, у 2018 році цей показник становив 405,5 ppm. Зазвичай кількість CO₂ сильно коливається в залежності від пори року, досягаючи максимуму в північній півкулі навесні та на початку літа. Однак, середньорічна концентрація CO₂ продовжує неухильно зростати. Вчені пов'язують цей факт зі спалюванням твердих видів палива, адже 67% викидів CO₂ спричиняє саме енергетика та спалювання викопних видів палива, які й призводять до зростання глобальної середньої температури [2].

Відомо, що вуглекислий газ (CO₂) утворюється в результаті спалювання різноманітних викопних видів палива, зокрема вугілля. За даними наукових досліджень, навіть невелика кількість вуглекислого газу може бути токсичною та викликати біохімічні зміни в крові людини, біль у суглобах, слабкість, порушення кислотнолужного балансу, зниження імунітету, стати причиною захворювань нирок та серцевосудинної системи.

1.2 Аналіз сучасних тенденцій зміни світових викидів CO₂ та їх вплив на економіки країн

Сучасний розвиток світової економіки супроводжується нерівномірною динамікою викидів CO₂, що безпосередньо пов'язано з рівнем розвитку країн, їх місцем у міжнародному поділі праці, структурою виробництва, моделлю енергоспоживання, рівнем індустріалізації та особливостями державної економічної політики різних країн. Якщо у другій половині XX століття основний

внесок у глобальні викиди припадав переважно на розвинені економіки Північної Америки та Західної Європи, то протягом останніх десятиліть центр формування вуглецевих викидів поступово змістився до країн, що розвиваються, насамперед азійського регіону.

Однією з найбільш помітних тенденцій останніх двадцяти років є прискорене зростання викидів CO₂ у країнах із високими темпами економічного розвитку, зокрема у Китаї та Індії (рис. 1.3). Одночасно розвинені держави, такі як США, Німеччина, Франція, Велика Британія та Японія, демонструють тенденцію до поступового скорочення викидів, зберігаючи при цьому невисоке але стає економічне зростання. Така поступова зміна структури світових викидів була зумовлена перерозподілом промислового виробництва та глобальних ланцюгів доданої вартості в азійський регіон.

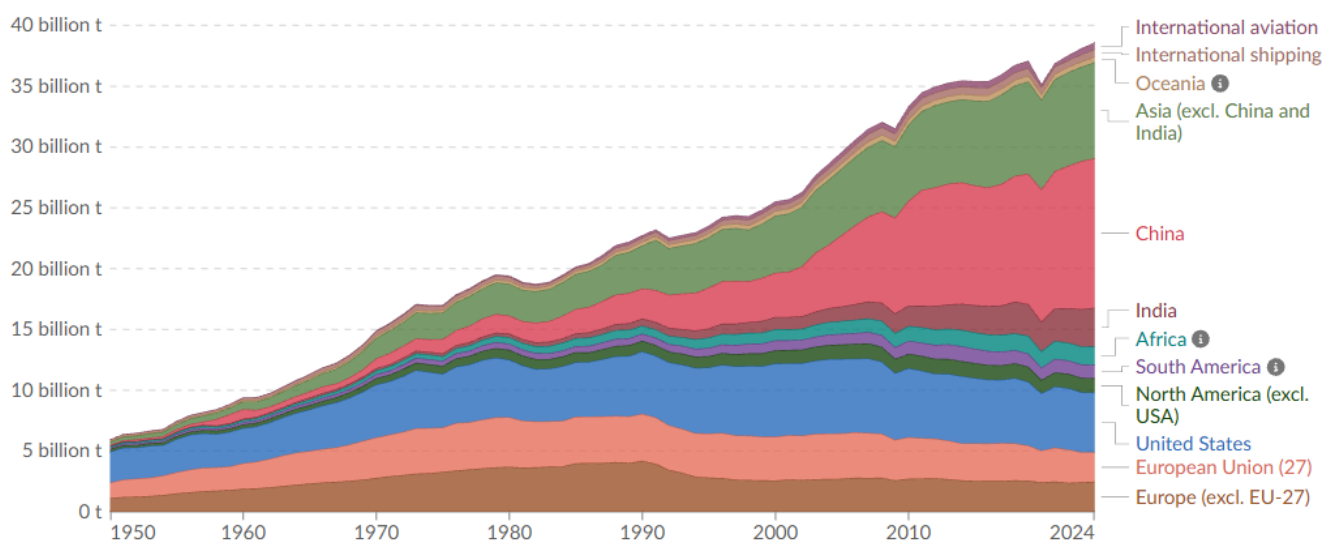


Рисунок 1.3 - Щорічні викиди CO₂ за регіонами світу

Джерело: [9]

У 2000-2024 роках світові викиди CO₂ загалом продовжували зростати, хоча темпи цього зростання були неоднорідними. Помітні тимчасові зниження відбулися у 2009 році через світову економічну кризу та у 2020 році через пандемію COVID-19 (рис. 1.3), наслідками яких було скорочення міжнародної торгівлі, падіння транспортної активності та уповільнення промислового виробництва. Проте вже у наступні роки спостерігалось швидке відновлення економічної

активності, що спричинило повернення до зростання глобальних обсягів викидів CO₂. Одночасно за цей час збільшився попит на енергетичні ресурси, а в умовах енергетичної кризи викликаній воєнними діями РФ частина європейських країн частково повернулася до використання вугілля та інших традиційних джерел енергії.

Характерною рисою сучасного періоду є те, що динаміка викидів дедалі менше залежить виключно від темпів економічного зростання і більше визначається структурою економіки та рівнем технологічного розвитку. Тобто поступово знижується залежність між приростом валового внутрішнього продукту та збільшенням викидів CO₂. Розвинені економіки дедалі активніше переходять до моделей розвитку, де економічне зростання забезпечується сектором послуг, інноваціями, цифровізацією та високотехнологічним виробництвом, тоді як частка вуглецеємної промисловості поступово скорочується.

Найбільшим джерелом викидів у світі зараз залишається Китай (рис. 1.4), на який припадає близько третини глобальних обсягів CO₂. Особливістю китайської економіки є поєднання швидкого економічного розвитку з масштабним промисловим виробництвом, орієнтованим як на внутрішній ринок, так і на експорт. Саме розвиток металургії, хімічної промисловості, виробництва цементу, машинобудування та будівельного сектору став основою економічного зростання країни протягом останніх десятиліть.

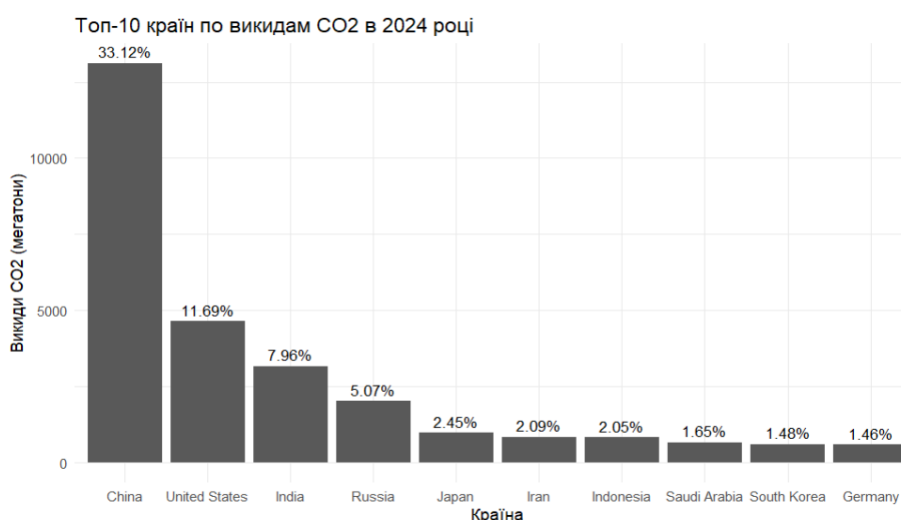


Рисунок 1.4 - Топ-10 країн за викидами у 2024 році

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Економічний ефект від такої моделі розвитку виявився неоднозначним. З одного боку, Китай зміг забезпечити стале зростання ВВП, урбанізацію, створення мільйонів робочих місць та перетворитися на одного з ключових гравців світової економіки. З іншого боку, висока концентрація промислового виробництва спричинила значне навантаження на довкілля, збільшення витрат на охорону здоров'я, погіршення якості життя у великих містах та необхідність масштабних інвестицій у модернізацію енергетики.

В останні роки економічна політика Китаю демонструє тенденцію до скорочення вуглецевої інтенсивності виробництва. Значні державні інвестиції спрямовуються у сонячну та вітрову енергетику, електромобільну галузь, акумуляторні технології, а також цифрову інфраструктуру. Фактично Китай прагне перейти від екстенсивної, примітивної промислової моделі економічного зростання до більш технологічної економіки, де обсяг викидів на одиницю ВВП поступово скорочуватиметься.

Сполучені Штати Америки залишаються другою економікою світу за рівнем викидів CO₂ з часткою близько 12% (рис. 1.4), однак динаміка країни суттєво відрізняється від китайської. Починаючи приблизно з середини 2000-х років, США демонструють повільне зниження викидів при відносно стабільному економічному розвитку. Це пояснюється кількома факторами: модернізацією виробництва, зростанням енергоефективності, переходом від вугілля до природного газу, а також розвитком відновлюваної енергетики.

Для американської економіки скорочення викидів стало не лише екологічним, а й інвестиційним фактором. Значні кошти спрямовуються у виробництво електромобілів, мікроелектроніку, акумуляторні технології, «розумні» енергосистеми та енергоефективне будівництво. Таким чином, декарбонізація дедалі більше розглядається як фактор довгострокової конкурентоспроможності та технологічного лідерства країни.

Водночас для окремих секторів американської економіки така трансформація супроводжується додатковими витратами. Особливо це стосується

традиційної енергетики, металургії та транспортного сектору, які потребують значних капіталовкладень для адаптації до нових екологічних вимог. Це створює певні дискусії в країні між економічною доцільністю екологічних реформ та ризиками втрати конкурентних переваг окремими галузями.

Однією з найбільш динамічних економік щодо приросту викидів залишається Індія, її частка в світових викидах CO₂ зараз становить близько 8% (рис. 1.4). Стрімке збільшення чисельності населення, урбанізація, зростання промисловості та електроспоживання призводять до активного збільшення попиту на енергетичні ресурси. Значна частина індійської електроенергії продовжує вироблятися за рахунок вугілля, що пояснює зростання рівня викидів.

Разом із тим, індійська економіка демонструє іншу модель взаємозв'язку між економічним розвитком і викидами, ніж розвинені держави. Для країни першочерговим завданням залишається забезпечення швидкого економічного зростання, скорочення рівня бідності та розвитку промисловості. Через це надмірно жорстке обмеження використання викопного палива може стримувати економічне зростання та підвищувати соціальні ризики. Водночас уряд Індії зараз активно інвестує у сонячну енергетику та цифрову модернізацію економіки, намагаючись знизити залежність від традиційних енергетичних ресурсів.

Четверте місце серед держав із високим рівнем викидів займає росія з часткою близько 5% (рис. 1.4). Її економіка значною мірою базується на «брудному» видобутку та експорті природних ресурсів, насамперед нафти, природного газу й вугілля. Висока частка сировинного сектору формує значну вуглецеву інтенсивність виробництва, а низькопродуктивна та енергомістка промисловість додатково сприяє підтриманню високих обсягів викидів CO₂.

Україна ж станом на 2024 рік займає 39 місце у світі по рівню викидів, з їх обсягом у 118,5 млн тонн, що становить 0,3% від загальносвітових. На відміну від більшості розвинених держав, де скорочення викидів протягом останніх десятиліть значною мірою відбувалося через модернізацію виробництва, розвиток відновлюваної енергетики та підвищення енергоефективності, в Україні суттєве

зменшення викидів більшою мірою було наслідком економічної трансформації до ринкової економіки, деіндустріалізації та зниження промислової активності.

Як видно з рис. 1.5, у 1970-1990 роках рівень викидів CO₂ в Україні (УРСР) залишався одним із найвищих у Європі, досягаючи майже 800 млн тонн в 1990 році. Така ситуація була обумовлена високою концентрацією важкої промисловості, розвитком металургії, хімічного комплексу, машинобудування та високою залежністю енергетики від викопних видів палива. Радянська модель господарювання характеризувалася значною енергоємністю виробництва, низькою ефективністю використання ресурсів та обмеженим стимулюванням технологічної модернізації, що безпосередньо позначалося на обсягах викидів CO₂.

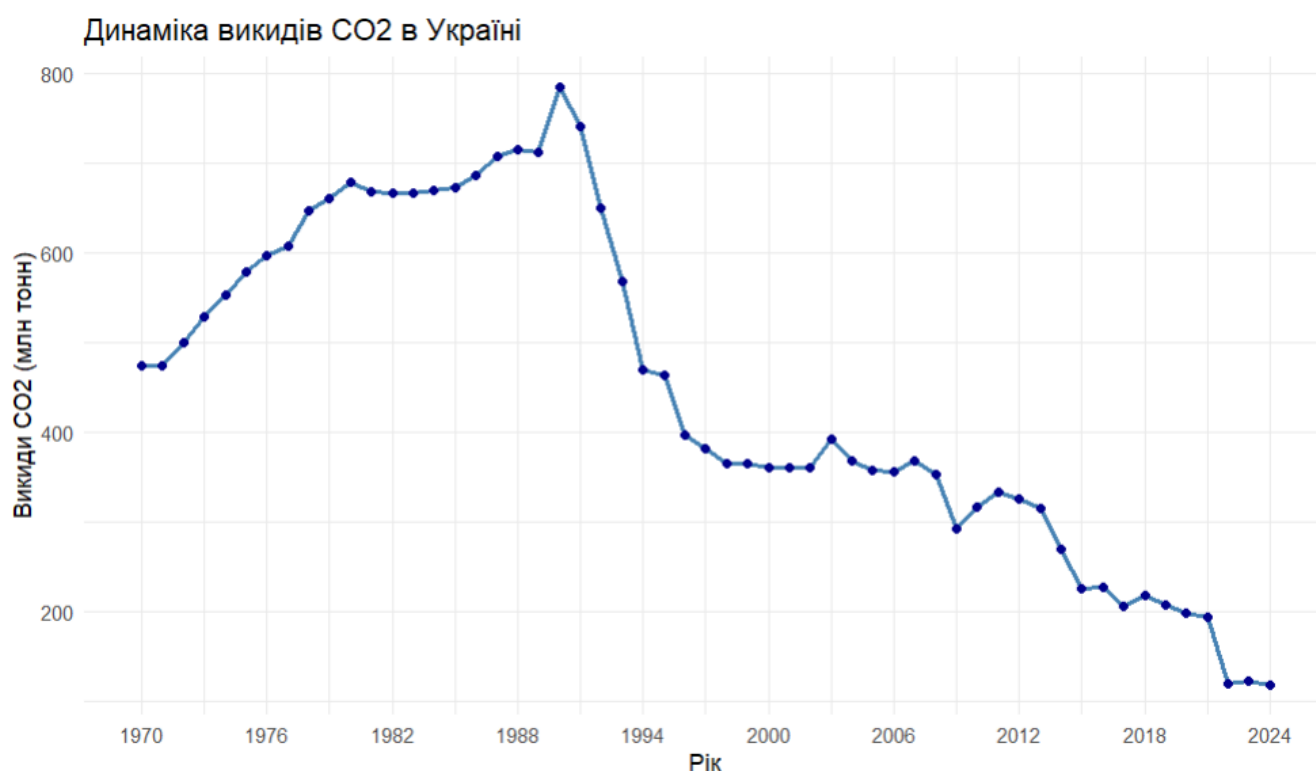


Рисунок 1.5 - Викиди CO₂ в Україні по роках

Джерело: розроблено автором на основі [9]

Після здобуття незалежності відбулося різке скорочення промислового виробництва, що супроводжувалося зменшенням споживання енергоресурсів і, відповідно, великим падінням обсягів викидів. У 1990-х роках спад виробництва,

розрив економічних зв'язків із країнами колишнього СРСР та структурна криза економіки стали ключовими чинниками зниження вуглецевих викидів. Зрозуміло, що таке скорочення не можна розглядати як позитивний результат від екологічної політики чи технологічної модернізації, оскільки воно значною мірою було спричинене економічним спадом.

У 2000-х роках зі стабілізацією економіки та поступовим відновленням промисловості спостерігалось певне вирівнювання динаміки викидів, однак їх рівень уже не повернувся до показників радянського періоду, а навпаки продовжував повільно падати. Це можна пояснити частковою модернізацією виробничих потужностей, зменшенням ролі окремих енергоємних виробництв, а також поступовим переходом до менш ресурсозатратної економічної моделі. Попри це, енергоємність українського ВВП тривалий час залишалася істотно вищою, ніж у країнах Європейського Союзу, що негативно впливало на конкурентоспроможність вітчизняного виробництва.

Починаючи з 2014 року, динаміка викидів CO₂ в Україні зазнала нового структурного зниження, пов'язаного з втратою частини промислових територій, руйнуванням виробничих зв'язків та скороченням масштабів металургійного і вугільного секторів. Значна частина підприємств Донецької та Луганської областей, які традиційно формували вагомий частку промислового виробництва та викидів, припинили діяльність або суттєво скоротили виробничі обсяги. У результаті цього спостерігалось подальше зниження викидів, яке, однак, знову супроводжувалося економічними втратами.

Після повномасштабного вторгнення росії у 2022 році знову відбулося значне зниження і структурні зміни. З одного боку, через скорочення промислового виробництва, зниження економічної активності, втрату підприємств та руйнування логістики відбулося зменшення традиційних промислових викидів. З іншого боку, війна сама по собі стала значним джерелом додаткових викидів.

За оцінками українських екологічних досліджень [14], сумарний обсяг викидів, пов'язаних із повномасштабною війною протягом перших її 36 місяців, оцінюється приблизно у 230 млн тонн CO₂ (табл. 1.1). Найбільшу частку становили

безпосередньо воєнні дії - близько 36 %, ландшафтні пожежі - 21 %, реконструкція пошкоджених об'єктів - 27 %, а також руйнування енергетичної інфраструктури, цивільна авіація та вимушена міграція населення (рис. 1.6). Такі показники демонструють, що війна створює не лише прямі економічні збитки, але й значний екологічний ефект, який матиме довгострокові наслідки для відновлення країни.

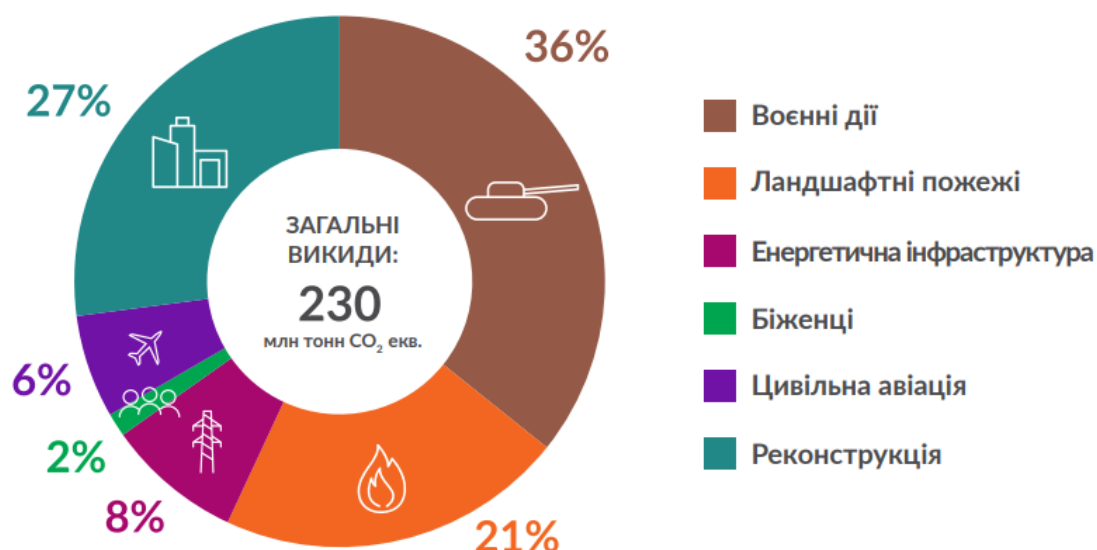


Рисунок 1.6 - Розподіл викидів CO₂ внаслідок війни

Джерело: [14]

Таблиця 1.1 - Загальні викиди після трьох років війни [14]

Сектор	Викиди за 36 місяців (млн тонн CO ₂ екв.)	Відсоток, %
Воєнні дії	82,1	36
Ландшафтні пожежі	48,7	21
Енергетична інфраструктура	19	8
Біженці	3,3	2
Цивільна авіація	14,4	6
Реконструкція	62,2	27
Всього	229,7	100

Особливо відчутним став вплив руйнування енергетичної інфраструктури. Масовані атаки на теплові електростанції, енергетичні мережі та об'єкти генерації

спричинили потребу у використанні резервних джерел живлення, дизельної генерації та аварійних схем постачання електроенергії. Це підвищило енергетичні витрати економіки та частково збільшило локальні викиди, одночасно погіршуючи інвестиційний клімат і збільшуючи собівартість виробництва.

У перспективі післявоєнного відновлення Україна може отримати можливість перейти до більш сучасної низьковуглецевої моделі розвитку. Реконструкція інфраструктури, модернізація промисловості, інтеграція до європейського енергетичного ринку та впровадження сучасних енергоефективних технологій здатні сприяти зменшенню вуглецевої інтенсивності економіки. Зрозуміло що реалізація такого сценарію вимагатиме значних інвестицій, державної підтримки та адаптації до екологічних стандартів Європейського Союзу.

1.3 Огляд наукових підходів та методів машинного навчання до прогнозування еколого-економічних показників

У наукових дослідженнях схожої тематики для прогнозування еколого-економічних процесів використовують як класичні статистичні методи, так і більш сучасні методи машинного навчання. До першої групи можна віднести регресійні моделі та моделі часових рядів. Регресія дає змогу оцінити залежність між цільовим показником і набором факторів. Наприклад, як у даному дослідженні, обсяг викидів CO₂ може пояснюватися рівнем ВВП, енергоспоживанням, часткою міського населення або використанням відновлюваних джерел енергії. Перевагою таких моделей є зрозумілість результатів, оскільки коефіцієнти дозволяють визначити напрям і силу впливу кожного фактора.

До класичних методів також належать авторегресійні моделі часових рядів, зокрема AR, ARMA, ARIMA та SARIMA. Вони використовуються тоді, коли потрібно спрогнозувати майбутнє значення показника на основі його попередньої динаміки. Наприклад, для прогнозування викидів CO₂ певної країни можна

використати історичні дані за попередні роки. ARIMA-моделі поєднують авторегресійну частину, диференціювання для усунення нестационарності та компонент ковзного середнього, тому їх часто застосовують для прогнозу економічних, фінансових та екологічних показників часових рядів.

Водночас очевидно що класичні прості моделі мають певні обмеження. Вони часто передбачають відносно просту форму залежності між змінними та не завжди добре враховують нелінійність. У реальній економіці зв'язок між викидами CO₂ і факторами розвитку може бути складним. В сучасних дослідженнях, як ще один варіант, доволі часто застосовуються методи машинного навчання.

Машинне навчання (Machine Learning, ML) - розділ штучного інтелекту, присвячений розумінню та розробленню методів, що дозволяють машинам «навчатися», тобто методів, у яких використовують дані для покращення продуктивності комп'ютера в певному наборі завдань [15]. Алгоритми машинного навчання створюють модель на основі вибіркового даних, відомих як навчальні дані, щоб робити прогнози чи ухвалювати рішення без явного програмування для цього. Машинне навчання це по суті сукупність методів, які виявляють закономірності у даних і використовують їх для прогнозування. На відміну від класичних моделей, такі алгоритми можуть працювати з великою кількістю змінних, краще враховувати нелінійні залежності та взаємодію між факторами. До поширених методів статистичного та машинного навчання відносяться лінійні регресійні моделі, Lasso-регресія, дерева рішень, Random Forest, boosting і Support Vector Machines.

Одним із поширених методів машинного навчання для задач регресії, класифікації і прогнозування є Random Forest. Цей алгоритм складається з багатьох дерев рішень, а підсумковий прогноз формується як усереднення результатів окремих дерев. Його перевагою є стійкість до випадкових коливань у даних, здатність враховувати нелінійні залежності та можливість оцінити важливість факторів. Для прогнозування викидів CO₂ це буде особливо корисно, оскільки модель може показати, які змінні мають найбільше значення: енергоспоживання, ВВП, урбанізація чи частка відновлюваної енергії.

Іншим ефективним підходом є градієнтний бустинг. Ці моделі також базуються на деревах рішень, але будуються послідовно: кожне наступне дерево виправляє помилки попередніх. Завдяки цьому бустингові моделі часто демонструють високу точність прогнозування. Проте вони потребують уважного налаштування параметрів, оскільки занадто складна модель може добре працювати на навчальних даних, але гірше прогнозувати нові значення.

Крім того, у сучасних дослідженнях поширюються різного роду нейронні мережі, зокрема LSTM-моделі, які застосовуються для прогнозування часових рядів. Вони здатні враховувати довгострокові залежності в даних, але потребують більшого обсягу інформації та складніше інтерпретуються.

Останні наукові роботи підтверджують активне використання машинного навчання у прогнозуванні викидів CO₂. Наприклад, у дослідженнях [18],[20],[22],[23] застосовуються Random Forest, LSTM, ARIMA та інші моделі для оцінювання майбутньої динаміки викидів і порівняння точності прогнозів. У дослідженні 2025 року [18] було розглянуто та порівняно безліч моделей машинного навчання для прогнозування викидів CO₂. Також у дослідженнях прогнозування CO₂ [20],[22] часто порівнюються традиційні моделі часових рядів, такі як ARIMA, із сучасними методами глибокого навчання, зокрема LSTM.

Важливим етапом побудови прогнозової моделі є оцінювання її якості. Для цього дані зазвичай поділяють на навчальну та тестову вибірки. У випадку часових рядів доцільно використовувати хронологічний поділ: модель навчається на ранніх роках, а перевіряється на пізніших. Це відповідає реальній логіці прогнозування, оскільки майбутні дані не можуть використовуватися для навчання моделі. Якість прогнозу найчастіше оцінюють за допомогою MAE, RMSE, MAPE та R².

РОЗДІЛ 2

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СВІТОВОГО ОБСЯГУ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

2.1 Інформаційна база дослідження та попередня обробка даних

Друга практична частина роботи спрямована на застосування методів машинного навчання для аналізу та прогнозування світових обсягів викидів вуглекислого газу. На відміну від теоретичного і візуального аналізу, який дозволяє описати лише загальні тенденції зміни викидів CO₂, емпіричне моделювання дає можливість кількісно оцінити зв'язок між рівнем викидів та соціально-економічними чинниками. Саме тому у цьому розділі основну увагу приділено побудові моделей, які можуть пояснювати зміну викидів CO₂ на основі показників економічного розвитку, урбанізації, енергоспоживання та використання відновлюваних джерел енергії.

Методологічно розділ орієнтується на сучасні підходи до прогнозування екологічно-економічних показників, зокрема на дослідження, де для оцінювання викидів CO₂ використовуються як класичні економетричні моделі, так і алгоритми машинного навчання. У роботі за основу взято подібну логіку: спочатку формується база даних, після цього виконується попередній статистичний аналіз, далі будуються моделі прогнозування, а на завершальному етапі порівнюється їхня точність і на основі кращої будується прогноз.

Для розрахунків було використано середовище RStudio. Інформаційна база для дослідження була сформована на основі відкритих міжнародних статистичних наборів даних. До неї увійшли показники викидів CO₂ на душу населення [25], ВВП на душу населення [26], частки міського населення [27], енергоспоживання на

душу населення [28] та споживання відновлюваної енергії [29]. Усі показники були об'єднані в єдиний масив даних за двома ключовими ознаками - країною та роком.

У дослідженні використано такі змінні:

Таблиця 2.1 - Характеристика змінних дослідження

<i>Змінна</i>	<i>Одиниця виміру</i>	<i>Зміст</i>
Викиди CO ₂	В тоннах на людину	Викиди вуглекислого газу (CO ₂) внаслідок спалювання викопного палива та промислових процесів. Сюди входять викиди від транспорту, виробництва електроенергії, опалення та землекористування. Це цільова змінна, яку необхідно пояснити та спрогнозувати.
ВВП на душу населення	Міжнародний \$ в цінах 2024 року	Валовий внутрішній продукт країни, поділений на кількість її населення. Ці дані скориговані з урахуванням інфляції та відмінностей у вартості життя між країнами. Показник рівня економічного розвитку країни
Міське населення	В % від загального населення	Частка населення, що проживає в міських районах країни. Характеризує рівень урбанізації.
Енергоспоживання	В кіловат-годинах на особу	Відображає інтенсивність використання енергоресурсів.
Споживання відновлюваної енергії	В кіловат-годинах на особу	Показує рівень використання низьковуглецевих джерел енергії.
Рік	Число	
Країна	Текст	

Початкові дані були обмежені періодом з 1990 до 2024 року. Такий часовий інтервал є доцільним, оскільки після 1990 року міжнародна статистика є більш повною та зіставною між країнами. Крім того, саме цей період охоплює важливі

структурні зміни у світовій економіці: прискорену індустріалізацію Китаю, поступове скорочення викидів у частині розвинених країн, зростання ролі відновлюваної енергетики, наслідки світової фінансової кризи 2008-2009 років, пандемії COVID-19 та енергетичних шоків останніх років.

На етапі попередньої обробки з даних було вилучено країни з великою кількістю пропущених значень та перейменовано показники для зручності подальшого аналізу. Також із вибірки були виключені окремі агреговані групи, такі як «World», «European Union (27)», «High-income countries», «Upper-middle-income countries» та «Lower-middle-income countries». Це зроблено для того, щоб модель навчалася саме на країнових спостереженнях, а не на узагальнених групах, які можуть дублювати інформацію або спотворювати залежності. В результаті цих маніпуляцій залишилося 82 країни.

Після очищення даних було проведено описовий статистичний аналіз. Його результати наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Описова статистика основних змінних

Показник	Міні-мум	1-й квантиль	Меді-ана	Сере-дне	3-й квар-тиль	Макси-мум
Рік	1990	1998	2007	2007	2016	2024
Викиди CO ₂ на душу населення	0,13	3,76	6,58	8,39	9,9	364,79
ВВП на душу населення	1 667	13 797	29 228	34 011	48 251	145 591
Частка міського населення, %	14,57	56,47	70,04	68,32	81,16	100,00
Енергоспоживання на душу населення	626,2	17 210,8	32186,5	43486,1	53 306,2	318 559,7
Споживання відновлюваної енергії	0,0	330,8	1 231,2	5 419,5	3 632,6	153 154,0

Результати описової статистики свідчать про неоднорідність вибірки. Що є очікуваним, оскільки до аналізу включено країни з різним рівнем економічного розвитку, структурою виробництва, енергетичним балансом та природно-ресурсним потенціалом. Наприклад, середнє значення викидів CO₂ на душу населення становить 8,3951 тонни, тоді як максимальне значення досягає 364,7908 тонни. Такий великий розрив пояснюється наявністю у вибірці країн із нетиповою

структурою економіки, зокрема невеликих держав із дуже високою часткою видобувної промисловості (Катар, ОАЕ) або енергомістких секторів.

ВВП на душу населення також має значну варіацію: від 1 667 до 145 591. Це підтверджує, що модель будується на даних як країн із низьким рівнем доходу, так і високорозвинених економік. Схожа ситуація спостерігається з енергоспоживанням: мінімальне значення становить 626,2, тоді як максимальне - 318 559,7. Отже, країни суттєво відрізняються не лише за рівнем доходу, а й за масштабами використання енергії.

Окрему увагу слід звернути на показник споживання відновлюваної енергії. Його мінімальне значення дорівнює нулю, а максимальне - 153 154,0. Це означає, що між країнами існує значний розрив у рівні розвитку відновлюваної енергетики. Для одних країн відновлювані джерела залишаються другорядним елементом енергетичного балансу, тоді як для інших вони вже відіграють помітну роль.

Для оцінювання взаємозв'язків між змінними було побудовано кореляційну матрицю (рис. 2.1). Вона дозволяє попередньо визначити, які фактори найбільше пов'язані з викидами CO₂.

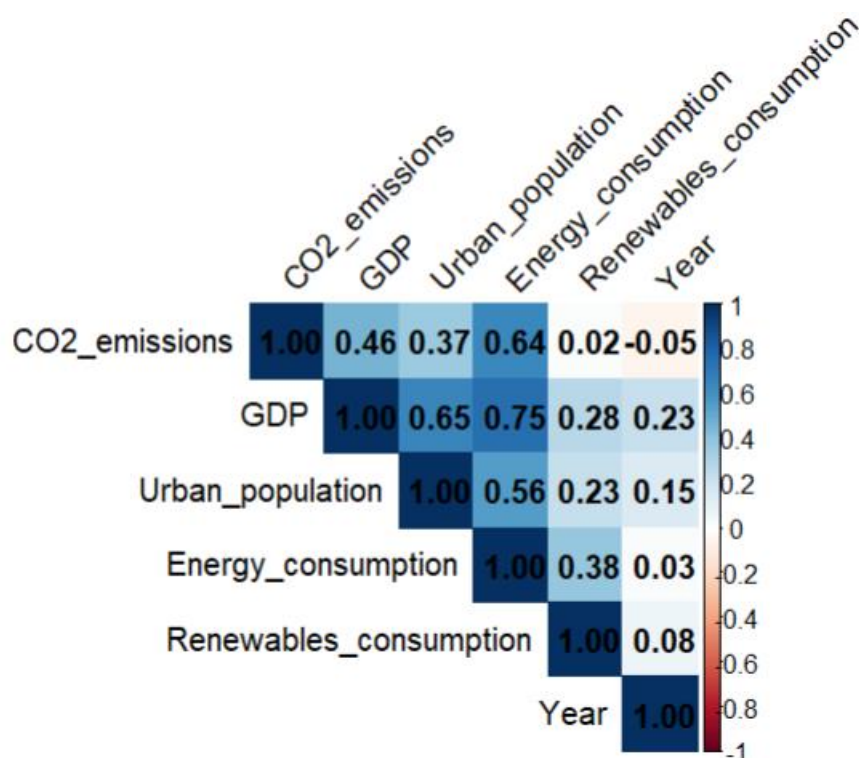


Рисунок 2.1 - Кореляційна матриця показників дослідження

Джерело: розроблено автором

За результатами кореляційного аналізу, найбільш тісний зв'язок із викидами CO₂ має енергоспоживання на душу населення. Коефіцієнт кореляції між цими показниками становить 0,64, що свідчить про помірно сильний позитивний зв'язок. Це є цілком логічним, оскільки більша частина світового енергоспоживання все ще забезпечується за рахунок викопного палива. Отже, збільшення споживання енергії часто супроводжується зростанням викидів CO₂.

Кореляція між викидами CO₂ та ВВП на душу населення становить 0,46. Це означає, що економічний розвиток також пов'язаний із рівнем викидів, але цей зв'язок не є абсолютним. У країнах із високим ВВП рівень споживання енергії, транспорту, товарів і послуг зазвичай вищий. Проте сучасні розвинені економіки поступово переходять до менш вуглецеємних моделей розвитку, тому зростання ВВП не завжди прямо веде до збільшення викидів.

Зв'язок між викидами CO₂ та урбанізацією становить 0,37. Урбанізація може сприяти зростанню викидів через розвиток транспорту, будівництва, промисловості та інфраструктури. Водночас міська економіка може бути енергоефективнішою завдяки компактнішому розміщенню населення, громадському транспорту та більшій частці сфери послуг.

Найслабший зв'язок із викидами CO₂ має споживання відновлюваної енергії. Коефіцієнт кореляції становить лише 0,02. На перший погляд, це може виглядати неочікувано, адже розвиток відновлюваної енергетики має сприяти скороченню викидів. Однак такий результат пояснюється тим, що країни з високим рівнем відновлюваного енергоспоживання часто одночасно мають і високий загальний рівень енергоспоживання. Тобто сам факт використання відновлюваної енергії ще не означає низький рівень викидів, якщо загальна економіка залишається енергомісткою.

Також важливо, що кореляція між роком і викидами CO₂ становить -0,05, тобто майже відсутня. Це означає, що глобальна динаміка викидів не може бути пояснена лише фактором часу. Для різних країн тенденції є різними: одні країни скорочують викиди, інші, навпаки, нарощують їх у процесі індустріалізації.

Для наочного порівняння було побудовано графік викидів CO₂ на душу населення для Китаю, України, Великої Британії, США та світу (рис. 2.2).

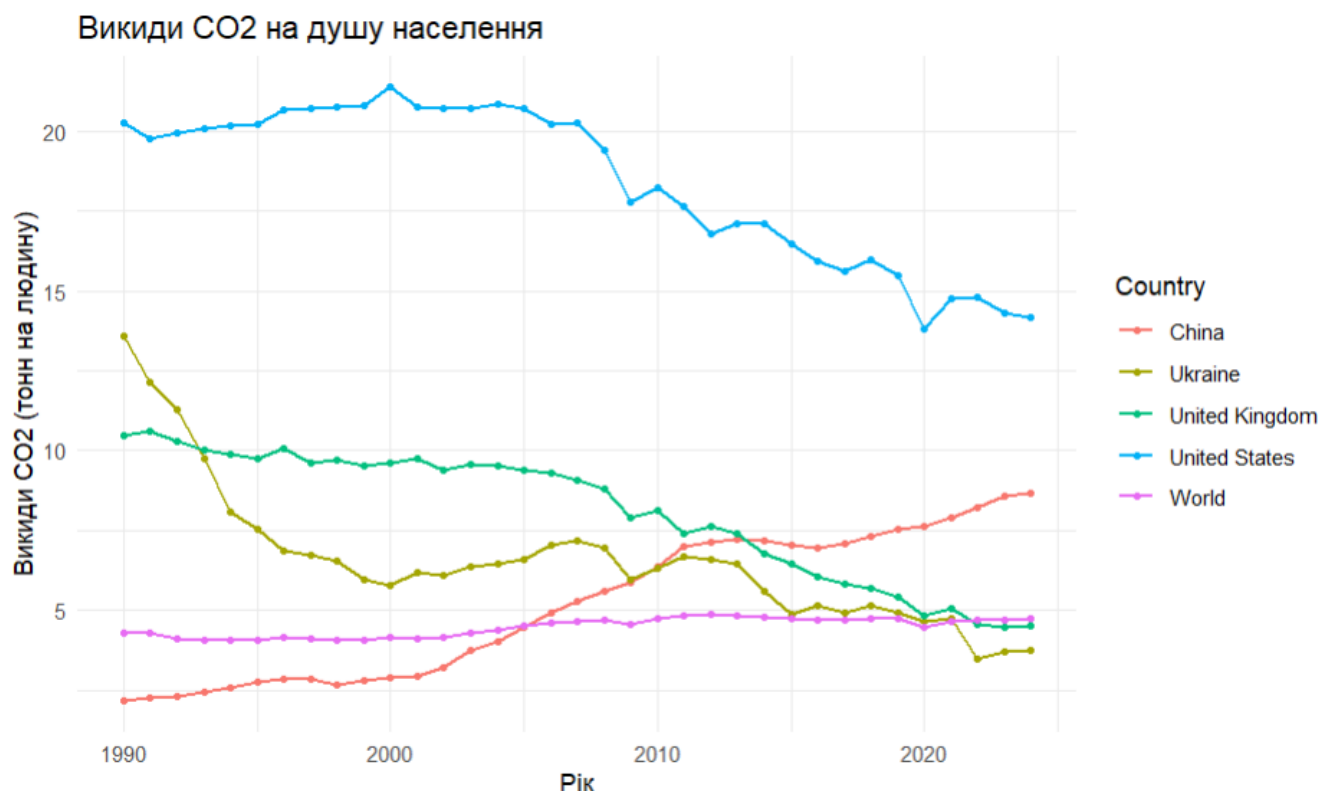


Рисунок 2.2 - Динаміка викидів CO₂ на душу населення в окремих країнах та світі

Джерело: розроблено автором

Графік показує різні траєкторії зміни викидів. США протягом усього періоду залишаються країною з дуже високим рівнем викидів на душу населення, однак після 2000-х років спостерігається поступове зниження цього показника. Це може бути пов'язано з підвищенням енергоефективності, переходом частини енергетики з вугілля на газ, розвитком відновлюваної енергетики та зміною структури економіки.

Велика Британія демонструє тривалу спадну тенденцію. Її приклад є показовим для розвинених економік, де скорочення викидів відбувається не лише через екологічну політику, а й через деіндустріалізацію, скорочення використання вугілля та перехід до економіки послуг.

Китай, навпаки, має висхідну динаміку. У 1990-х роках його викиди на душу населення були порівняно невисокими, але з початком активної індустріалізації та

зростанням ролі країни у світовому виробництві вони суттєво збільшилися. Це підтверджує, що швидке промислове зростання в умовах високої залежності від викопного палива призводить до збільшення вуглецевого навантаження.

Україна має спадну динаміку викидів на душу населення. Проте, як згадувалося раніше, таке скорочення не можна пояснювати лише модернізацією або переходом до низьковуглецевої економіки. Значну роль відіграли економічні кризи, скорочення промислового виробництва, структурна трансформація після 1990 року, а також наслідки війни після 2014 та 2022 років.

Світовий показник змінюється значно плавніше, оскільки він усереднює різні тенденції країн. На глобальному рівні викиди CO₂ на душу населення залишаються відносно стабільними, хоча всередині цієї середньої величини відбуваються суттєві зміни між окремими країнами та регіонами.

2.2 Побудова моделей машинного навчання для прогнозування викидів CO₂

Для прогнозування викидів CO₂ було використано дві моделі: множинну лінійну регресію та Random Forest. Такий вибір дозволяє порівняти класичний статистичний підхід із більш гнучким алгоритмом машинного навчання.

Лінійна регресія використовується як базова модель. Її перевага полягає у простоті інтерпретації результатів: можна побачити, як кожен фактор пов'язаний із цільовою змінною. Водночас ця модель має обмеження, оскільки передбачає переважно лінійний характер залежностей. У випадку викидів CO₂ це може бути проблемою, адже зв'язок між економічним розвитком, енергоспоживанням і викидами часто є складним та нелінійним.

Модель лінійної регресії була побудована для пояснення викидів CO₂ на душу населення через ВВП на душу населення, урбанізацію, енергоспоживання та споживання відновлюваної енергії. Результати оцінювання наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати оцінювання лінійної регресійної моделі

Змінна	Коефіцієнт	p-value	Інтерпретація
Intercept	-0,2354	0,7201	Статистично незначущий вільний член
GDP	-0,0000313	0,00795	Помірно статистично значущий зв'язок
Urban_population	0,03194	0,0067	Помірно статистично значущий зв'язок
Energy_consumption	0,000198	< 0,001	Статистично значущий зв'язок
Renewables_consumption	-0,000185	< 0,001	Статистично значущий зв'язок

Модель загалом є статистично значущою, про що свідчить значення F-критерію 502,8 та p-value менше 0,001. Коефіцієнт детермінації становить 0,4587, а скоригований коефіцієнт детермінації - 0,4578. Це означає, що модель пояснює приблизно 46 % варіації викидів CO₂ на душу населення. Для глобальної вибірки такий результат можна вважати прийнятним, але не дуже високим, оскільки викиди залежать від багатьох факторів, не всі з яких були включені до моделі.

Найбільш економічно очікуваний результат отримано для енергоспоживання. Коефіцієнт при змінній Energy_consumption є додатним і статистично значущим. Це означає, що збільшення енергоспоживання на душу населення пов'язане зі зростанням викидів CO₂. Такий результат підтверджує ключову роль енергетичного сектору у формуванні вуглецевого навантаження.

Коефіцієнт при урбанізації також є додатним і помірно статистично значущим. Це свідчить про те, що зростання частки міського населення може супроводжуватися збільшенням викидів. Причиною цього є концентрація транспорту, будівництва, промисловості та споживання енергії в містах.

Цікавим є результат для ВВП на душу населення: коефіцієнт є від'ємним, хоча кореляція між ВВП і викидами була додатною. Це означає, що після врахування енергоспоживання, урбанізації та відновлюваної енергії прямий вплив ВВП змінюється. Такий результат можна пояснити тим, що у багатьох розвинених країнах вищий рівень доходу поєднується з більшою енергоефективністю, розвитком сервісного сектору та поступовим переходом до низьковуглецевих технологій.

Коефіцієнт при споживанні відновлюваної енергії є від'ємним і статистично значущим. Це відповідає економічній логіці: збільшення використання відновлюваних джерел енергії може зменшувати залежність від викопного палива і, відповідно, сприяти скороченню викидів CO₂.

Другою моделлю було обрано Random Forest. Цей алгоритм належить до ансамблевих методів машинного навчання і базується на побудові великої кількості дерев рішень. Його перевага полягає у здатності враховувати нелінійні зв'язки та складні взаємодії між змінними. Для задач прогнозування викидів CO₂ це може бути особливо важливим, оскільки країни можуть мати дуже різні моделі розвитку: одні зростають за рахунок промисловості, інші - за рахунок послуг, частина країн активно використовує викопне паливо, інші мають вищу частку атомної або відновлюваної енергетики.

Модель Random Forest була побудована на навчальній вибірці, яка містила 2378 спостережень і 6 предикторів. У процесі навчання порівнювалися різні значення параметра *mtry* (табл. 2.4), тобто кількості змінних, які випадково відбираються при розбитті дерева.

Таблиця 2.4 - *mtry* моделі Random Forest

<i>mtry</i>	RMSE	R ²	MAE
2	6,6281	0,7148	2,7573
44	4,9006	0,7807	0,6334
86	5,0946	0,7692	0,6525

Найкращий результат отримано при значенні *mtry* = 44, оскільки саме для нього значення RMSE є найнижчим. Це означає, що така конфігурація моделі забезпечила найкращу прогнозу якість. Значення R² для цієї моделі становить 0,7807, тобто Random Forest пояснює близько 78 % варіації цільової змінної. Це суттєво вище, ніж у лінійної регресії, де R² становив близько 46 %.

Для кращого розуміння роботи моделі було оцінено важливість змінних. Результати наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Важливість змінних у моделі Random Forest

<i>Змінна</i>	<i>Важливість</i>
Energy_consumption	100,00
GDP	49,05
Country Qatar	28,26
Country Kuwait	25,73
Urban_population	23,20
Renewables_consumption	16,39
Year	8,45
Country Australia	1,19
Country Luxembourg	1,08

Найважливішим фактором у моделі є енергоспоживання на душу населення, його важливість прийнята за 100. Це підтверджує головний висновок попереднього аналізу: саме рівень використання енергії є ключовим чинником викидів CO₂. Друге місце займає ВВП на душу населення, що свідчить про значення рівня економічного розвитку. Високі позиції окремих країн, зокрема Катару та Кувейту, пояснюються їхньою специфічною структурою економіки, високим рівнем доходу, значною роллю паливно-енергетичного сектору та високими викидами на душу населення.

Урбанізація також має помітне значення, хоча її вплив менший, ніж вплив енергоспоживання та ВВП. Споживання відновлюваної енергії має середню важливість, що свідчить про його роль у моделі, але не як головного фактора. Рік має порівняно невелику важливість, оскільки часовий тренд сам по собі не пояснює викиди так добре, як реальні економічні та енергетичні характеристики країн.

2.3 Порівняння та оцінювання якості моделей

Для оцінювання прогнозної якості моделей було використано тестову вибірку, яка охоплює роки після 2018 року. Для порівняння моделей використано дві метрики: RMSE та MAE (табл. 2.6). RMSE показує середньоквадратичну помилку прогнозу і сильніше реагує на великі відхилення. MAE показує середню абсолютну помилку, тобто середній розмір відхилення прогнозного значення від фактичного.

Таблиця 2.6 - Порівняння якості моделей на тестовій вибірці

<i>Модель</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>
Linear Regression	3,064	1,429
Random Forest	1,177	0,788

Результати порівняння показують, що модель Random Forest має значно кращу прогнозну якість, ніж лінійна регресія. Її RMSE становить 1,177, тоді як для лінійної регресії цей показник дорівнює 3,064. Тобто середньоквадратична помилка Random Forest майже у 2,5 раза нижча. За метрикою MAE Random Forest також має перевагу: 0,788 проти 1,429 у лінійної регресії.

Це означає, що Random Forest точніше відтворює фактичні значення викидів CO₂ на душу населення. Такий результат є очікуваним, оскільки викиди залежать від складної комбінації факторів. Лінійна регресія враховує лише прямі лінійні зв'язки, тоді як Random Forest може враховувати нелінійність, порогові ефекти, країнову специфіку та взаємодію між змінними.

Наприклад, однакове зростання ВВП може мати різний вплив у різних країнах. У країні, де економічне зростання базується на важкій промисловості та вугіллі, воно може призводити до суттєвого збільшення викидів. Водночас у країні

з розвиненою сферою послуг, атомною енергетикою або високою часткою відновлюваних джерел таке саме зростання ВВП може майже не збільшувати викиди. Саме такі складні відмінності Random Forest враховує краще.

2.4 Формування прогнозу та аналіз отриманих результатів

Після порівняння якості моделей для формування прогнозу було обрано модель Random Forest, оскільки вона показала кращі результати за основними метриками точності. На тестовій вибірці ця модель має нижчі значення RMSE та MAE порівняно з лінійною регресією, що свідчить про її кращу здатність відтворювати фактичні значення викидів CO₂ на душу населення.

Для побудови прогнозу було використано фінальну модель Random Forest, навчену на всьому доступному наборі даних за 1990-2024 роки. Такий підхід є доцільним, оскільки після перевірки якості моделі на тестовій вибірці можна використати всю наявну історичну інформацію для отримання прогнозних значень. У моделі як пояснювальні змінні знову використовувалися ВВП на душу населення, частка міського населення, енергоспоживання на душу населення, споживання відновлюваної енергії, рік і країна.

Оскільки прогнозування за допомогою Random Forest потребує не лише майбутніх років, а й майбутніх значень усіх факторів, для періоду 2025-2030 років було сформовано окрему прогнозну таблицю. Для цього використано дані по світу за останній доступний період, а майбутні значення ВВП, урбанізації, енергоспоживання та споживання відновлюваної енергії були отримані на основі лінійної трендової екстраполяції. Такий підхід дозволяє побудувати базовий сценарій, який відображає можливу динаміку викидів за умови збереження попередніх тенденцій.

Таблиця 2.7 - Прогноз світових викидів CO₂ на душу населення до 2030 року

Рік	GDP	Частка міського населення, %	Енергоспоживання	Споживання відновлюваної енергії	Прогноз CO ₂ на душу населення, т
2025	21493,29	58,39	21275,90	3107,34	4,5591
2026	21855,76	58,81	21350,47	3209,73	4,5633
2027	22218,24	59,22	21425,05	3311,11	4,5190
2028	22580,71	59,63	21499,63	3412,99	4,4796
2029	22943,18	60,05	21574,21	3514,88	4,4885
2030	23305,66	60,46	21648,78	3616,77	4,4709



Рисунок 2.3 - Прогноз світових викидів CO₂ на душу населення до 2030 року

Джерело: розроблено автором

Отримані результати прогнозу показують, що у базовому сценарії світові викиди CO₂ на душу населення у 2025-2030 роках не демонструють різкого зростання. Навпаки, прогноз вказує на поступове незначне зниження показника: з 4,559 т на особу у 2025 році до 4,471 т на особу у 2030 році. Водночас динаміка не є абсолютно рівномірною: у 2026 році прогнозне значення майже не змінюється порівняно з 2025 роком, після чого спостерігається поступове зменшення з невеликим коливанням у 2029 році.

Таку динаміку можна пояснити тим, що прогнозні значення факторів мають різний напрям впливу на викиди. З одного боку, ВВП на душу населення,

урбанізація та енергоспоживання у прогностному періоді зростають. Теоретично це могло б створювати додатковий тиск на обсяги викидів CO₂. З іншого боку, досить швидко збільшується споживання відновлюваної енергії: з 3107,34 у 2025 році до 3616,77 у 2030 році. Саме цей фактор частково компенсує вплив економічного зростання та енергоспоживання.

Порівняння з історичною динамікою показує, що прогностні значення залишаються близькими до рівня останніх фактичних років. На графіку видно, що після помітного зниження у 2020 році, яке було пов'язане зі скороченням економічної активності, світовий показник знову відновився. Прогноз на 2025-2030 роки не передбачає повернення до найвищих значень початку 2010-х років, коли світові викиди CO₂ на душу населення перевищували 4,8 т на особу. Натомість прогноз показує більш стриману траєкторію, близьку до рівня 4,5 т на особу.

З економічної точки зору це означає, що світова економіка може поступово рухатися до менш вуглецеємної моделі розвитку. При цьому прогноз не означає автоматичного скорочення загальних глобальних викидів, оскільки абсолютний обсяг CO₂ залежить також від чисельності населення. Навіть якщо викиди на душу населення повільно знижуються, загальні світові викиди можуть залишатися високими або зростати за рахунок демографічного фактору та збільшення сукупного енергоспоживання.

Отриманий прогноз також підтверджує важливість енергетичного фактору. У попередньому аналізі саме енергоспоживання було визначено як найважливіший предиктор у моделі Random Forest. Тому майбутня динаміка CO₂ значною мірою залежатиме від того, за рахунок яких джерел буде забезпечуватися зростаючий попит на енергію. Якщо збільшення енергоспоживання відбуватиметься переважно за рахунок викопного палива, скорочення викидів може сповільнитися або змінитися новим зростанням. Якщо ж зростатиме частка відновлюваних джерел, атомної енергетики та енергоефективних технологій, викиди на душу населення можуть поступово зменшуватися.

Разом із тим, отримані прогностні значення слід розглядати як умовні. Вони побудовані на основі трендової екстраполяції факторів, тобто передбачають, що

основні тенденції останніх років зберігатимуться і надалі. У реальності динаміка світових викидів може істотно змінитися під впливом економічних криз, воєн, енергетичних шоків, технологічних проривів, міжнародних кліматичних угод та змін у державній політиці окремих країн.

Крім того, модель прогнозує середній світовий показник і не розкриває внутрішніх відмінностей між країнами. Це важливо, оскільки скорочення викидів у розвинених економіках може одночасно супроводжуватися їх зростанням у країнах, що розвиваються. Тому середній світовий показник може виглядати стабільним, хоча на рівні окремих держав відбуваються значні структурні зміни.

Загалом результати прогнозування дозволяють зробити висновок, що за базовим сценарієм світові викиди CO₂ на душу населення до 2030 року можуть залишатися відносно стабільними з невеликою тенденцією до зниження. Це свідчить про поступове послаблення прямої залежності між економічним зростанням і вуглецевими викидами, однак не означає повного вирішення проблеми. Для істотнішого скорочення CO₂ необхідні глибші структурні зміни: зменшення частки викопного палива, розвиток відновлюваної енергетики, модернізація промисловості, підвищення енергоефективності та впровадження більш жорстких екологічних стандартів.

РОЗДІЛ 3

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА ЕКОНОМІКУ УКРАЇНИ

3.1 Формування інформаційної бази дослідження та аналіз динаміки основних показників

У попередніх розділах було розглянуто теоретичну природу викидів вуглекислого газу та світові тенденції їх зміни. Проте для оцінювання впливу CO₂ на економіку України недостатньо лише загального опису глобальних процесів. Треба перейти до аналізу даних, які характеризують саме українську економіку, її енергетичну структуру та динаміку викидів. Саме тому в третьому розділі основну увагу приділено прогнозуванню та практичному дослідженню взаємозв'язку між викидами CO₂ та ключовими макроекономічними й енергетичними показниками України.

Інформаційна база дослідження була сформована на основі відкритих статистичних даних про Україну за 1990-2024 роки. У дослідження було включено показники загальних викидів CO₂, викидів CO₂ на душу населення, ВВП на душу населення, чисельності населення, споживання енергії з вугілля, нафти та відновлюваних джерел.

Основною цільовою змінною знову було обрано викиди CO₂ на душу населення. За методологією джерела [25], викиди CO₂ на душу населення розраховуються як загальні виробничі викиди країни, поділені на чисельність населення.

Для практичного моделювання було використано такі показники: рік, CO₂ на душу населення, ВВП на душу населення, споживання енергії з вугілля [30], споживання енергії з нафти [31] та споживання відновлюваної енергії. Вибір саме цих змінних було зроблено тому, що вони дозволяють одночасно оцінити і

економічний і енергетичний аспекти формування викидів. ВВП на душу населення характеризує рівень економічного розвитку, вугілля та нафта відображають залежність економіки від викопних енергоресурсів, які є одними з основних джерел викидів, а відновлювана енергія зменшує викиди і показує потенціал переходу до менш вуглецемісткої моделі розвитку.

Таблиця 3.1 - Описова статистика показників, використаних у моделюванні

Показник	Мінімум	1-й квартиль	Медіана	Середнє	3-й квартиль	Максимум
Рік	1990	1998	2007	2007	2016	2024
CO ₂ на душу населення, т	3,49	5,13	6,36	6,57	6,92	13,57
ВВП на душу населення, дол. США	631,9	1042,8	2158,5	2412,0	3638,3	5389,5
Споживання енергії з вугілля, кВт·год/особу	2829	7745	9000	9261	10433	18556
Споживання енергії з нафти, кВт·год/особу	2609	2891	3457	4293	3769	14828
Відновлювана енергія, кВт·год/особу	403,2	567,9	646,4	709,1	741,7	1354,2

Дані табл. 3.1 свідчать про значну зміну еколого-економічних показників України протягом досліджуваного періоду. Викиди CO₂ на душу населення коливалися від 3,49 до 13,57 т на особу, при середньому значенні 6,57 т. Найвищі значення були характерні для початку 1990-х років, коли українська економіка ще зберігала значну частину радянської промислової структури. Надалі цей показник поступово знижувався, що було пов'язано зі спадом промислового виробництва, скороченням споживання викопного палива, структурними змінами в економіці, а також наслідками воєнних подій.

ВВП на душу населення, навпаки, демонстрував нерівномірну, але загалом висхідну динаміку. Його мінімальне значення становило 631,9 дол. США, а максимальне - 5389,5 дол. США. Це свідчить про те, що після глибокого падіння 1990-х років українська економіка поступово відновлювалася, хоча її розвиток не був стабільним. На динаміку ВВП теж впливали фінансові кризи, політична нестабільність, втрата частини промислових територій, повномасштабна війна та пошкодження інфраструктури.

Окремої уваги потребує динаміка споживання енергії з вугілля та нафти. Максимальні значення цих показників були характерні для початку 1990-х років, що відображає високу енергоємність української економіки того періоду. У подальшому їх рівень суттєво знизився. Водночас споживання відновлюваної енергії, навпаки, мало тенденцію до зростання, особливо в останні роки досліджуваного періоду. Проте його рівень усе ще залишається недостатнім для повного заміщення викопного палива.

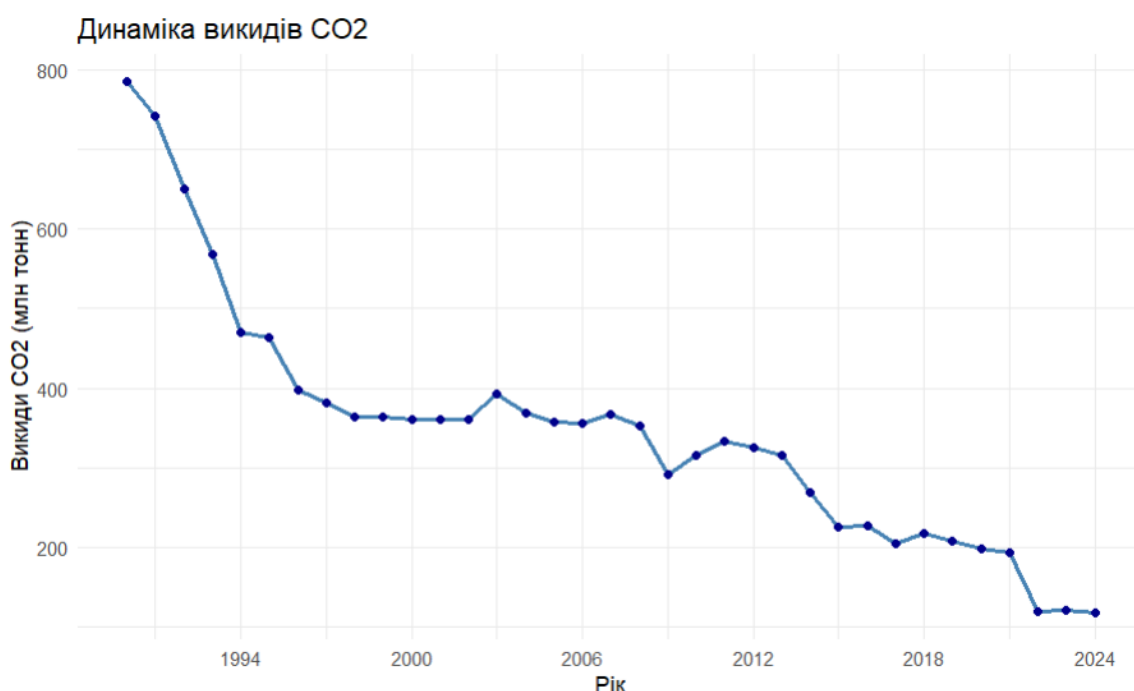


Рисунок 3.1 - Динаміка загальних викидів CO₂ в Україні у 1990-2024 роках

Джерело: розроблено автором

Аналіз динаміки загальних викидів CO₂ (рис. 3.1) показує, що після 1990 року Україна пройшла через різке скорочення обсягів викидів. Якщо на початку

1990-х років показник наближався до 800 млн тонн, то у 2024 році він становив близько 120 млн тонн. Проте як згадувалося у підрозділі 1.2 таке зниження не можна вважати результатом успішної екологічної політики. В більшій мірі воно було наслідком скорочення промислового виробництва, падіння економічної активності, втрати частини виробничого потенціалу та структурних змін у паливно-енергетичному комплексі.

Найбільш різке падіння відбулося у першій половині 1990-х років, коли після розпаду СРСР Україна втратила значну частину традиційних виробничих зв'язків, а промисловість зіткнулася з глибокою кризою. У 2000-х роках динаміка викидів стала більш стабільною, що відповідало періоду часткового економічного відновлення. Після 2014 року зниження знову посилилося через втрату частини промислових територій, скорочення виробництва у вугільній промисловості та металургії. Після 2022 року на показники додатково вплинули повномасштабна війна, руйнування підприємств, енергетичних об'єктів та зміна структури економічної активності.

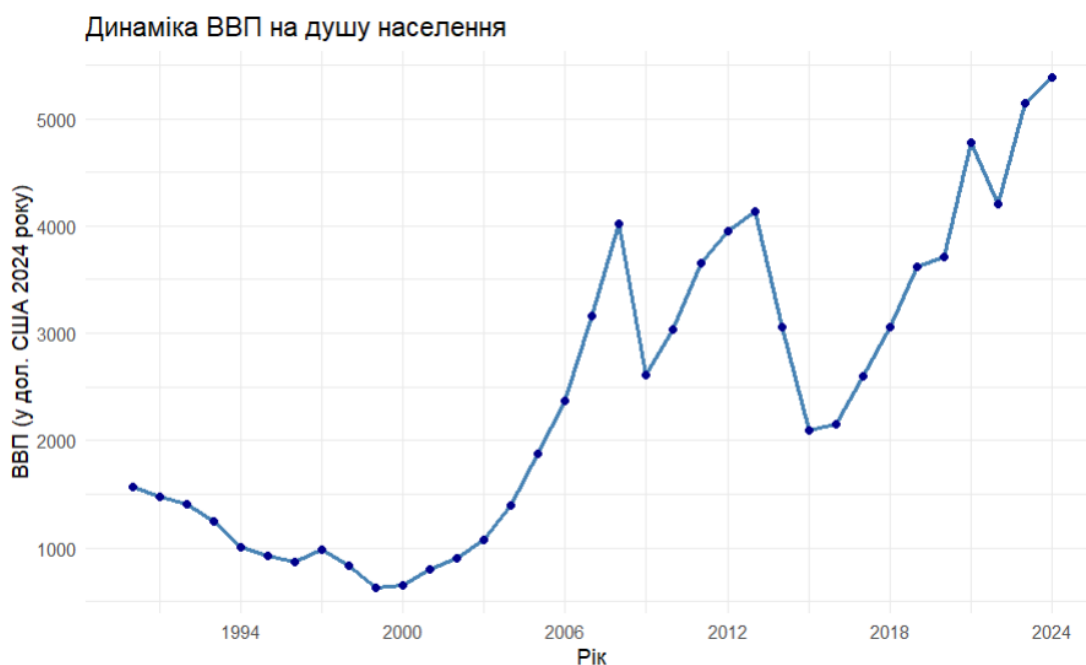


Рисунок 3.2 - Динаміка ВВП на душу населення України у 1990-2024 роках

Джерело: розроблено автором

Динаміка ВВП на душу населення (рис. 3.2) має інший характер. У 1990-х роках показник поступово знижувався, що відповідало загальному економічному спаду. Починаючи з 2000-х років спостерігалось поступове відновлення, яке переривалося кризами 2008-2009 років, подіями 2014 року та падінням, пов'язаним із повномасштабною війною. Однак у довгостроковому вимірі ВВП на душу населення мав тенденцію до зростання.

Порівняння динаміки ВВП і викидів CO_2 дозволяє зробити ще один важливий висновок: в Україні зменшення викидів далеко не завжди було наслідком технологічної модернізації або екологічної ефективності. У багатьох періодах воно відбувалося разом із падінням виробництва, що є негативним варіантом скорочення CO_2 . Тому для України важливо не просто зменшувати викиди, а забезпечити таке скорочення, яке поєднуватиметься з економічним відновленням, модернізацією промисловості та підвищенням енергоефективності.

3.2 Аналіз взаємозв'язку між викидами CO_2 , ВВП та енергетичними показниками

Для попередньої оцінки взаємозв'язків між досліджуваними показниками було побудовано кореляційну матрицю (рис. 3.3). Вона дозволяє визначити, які змінні мають найтісніший зв'язок із викидами CO_2 на душу населення. До аналізу було включено рік, CO_2 на душу населення, ВВП на душу населення, споживання енергії з вугілля, споживання енергії з нафти та споживання відновлюваної енергії. Така структура даних відповідає сформованому датасету для моделювання.

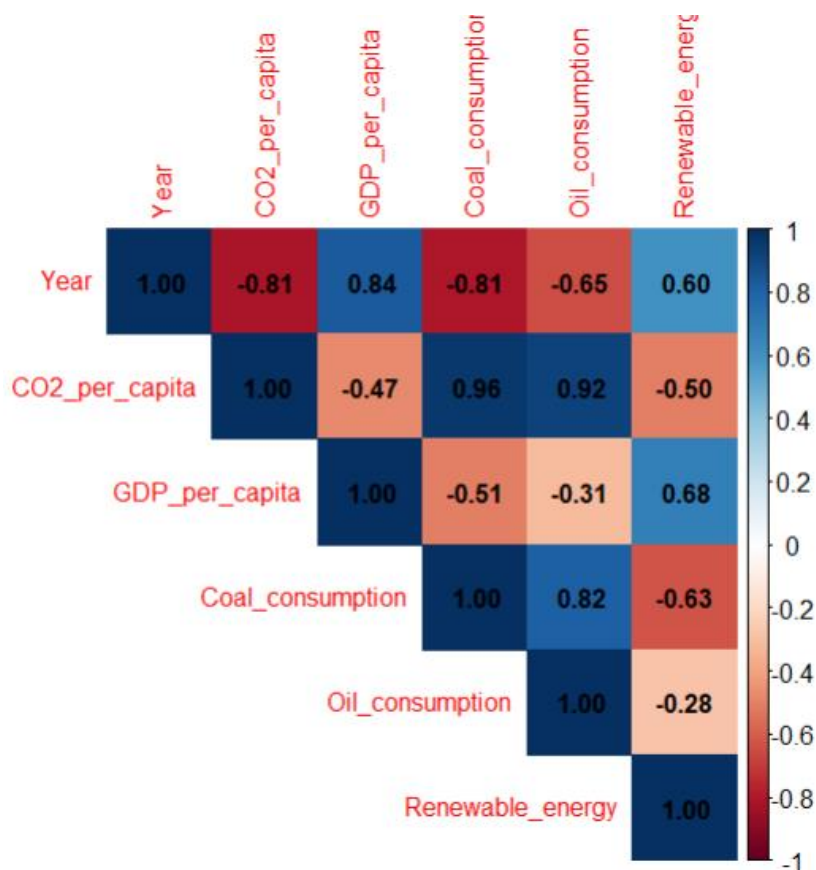


Рисунок 3.3 - Кореляційна матриця показників моделі

Джерело: розроблено автором

Результати кореляційного аналізу показують, що найсильніший додатний зв'язок із викидами CO₂ на душу населення має споживання енергії з вугілля. Коефіцієнт кореляції між цими показниками становить 0,96, що свідчить про дуже тісний прямий зв'язок. Це є очікуваним результатом, оскільки вугілля належить до найбільш вуглецемістких джерел енергії, а українська економіка протягом тривалого часу значною мірою залежала від вугільної енергетики, металургії та інших енергоємних галузей.

Сильний прямий зв'язок також спостерігається між викидами CO₂ і споживанням енергії з нафти. Коефіцієнт кореляції становить 0,92. Це свідчить про важливу роль нафтових ресурсів у формуванні викидів, зокрема через транспортний сектор, промислове споживання пального та загальний рівень економічної активності.

Водночас зв'язок між CO₂ на душу населення та ВВП на душу населення є від'ємним і становить -0,47. На перший погляд це може суперечити класичному припущенню, що економічне зростання супроводжується збільшенням викидів. Однак для України така залежність є логічною, оскільки після 1990 року скорочення викидів відбувалося на тлі глибокої структурної перебудови економіки, деіндустріалізації, зниження ролі важкої промисловості та поступового розвитку менш енергоємних видів діяльності. Тому зростання ВВП у пізніші роки вже не супроводжувалося поверненням викидів до рівня початку 1990-х років.

Від'ємний зв'язок між CO₂ та відновлюваною енергією становить -0,50. Це означає, що збільшення споживання відновлюваної енергії загалом пов'язане зі зниженням викидів CO₂. Проте цей зв'язок не є дуже сильним, оскільки частка відновлюваної енергетики в Україні ще недостатня для повного заміщення викопного палива. Крім того, на динаміку викидів значно впливали не лише енергетичні, а й кризові фактори.

Загалом кореляційний аналіз підтверджує, що основним фактором формування викидів CO₂ в Україні залишається структура енергоспоживання. Найбільший вплив мають традиційні викопні джерела - вугілля та нафта. Саме тому подальше скорочення викидів має бути пов'язане не лише зі зменшенням промислового виробництва, а з технологічним оновленням енергетики, підвищенням енергоефективності та поступовим зменшенням залежності від викопного палива.

3.3 Побудова регресійної моделі впливу економічних та енергетичних факторів на викиди CO₂

Для кількісної оцінки впливу економічних та енергетичних факторів на викиди CO₂ було побудовано лінійну регресійну модель. Залежною змінною виступили викиди CO₂ на душу населення, а незалежними змінними - ВВП на душу

населення, споживання енергії з вугілля, споживання енергії з нафти та споживання відновлюваної енергії. Модель має такий загальний вигляд:

$$CO2_t = \beta_0 + \beta_1 GDPpc_t + \beta_2 Coal_t + \beta_3 Oil_t + \beta_4 Renew_t + \varepsilon_t,$$

де $CO2_t$ - викиди CO_2 на душу населення у році t ;

$GDPpc_t$ - ВВП на душу населення;

$Coal_t$ - споживання енергії з вугілля;

Oil_t - споживання енергії з нафти;

$Renew_t$ - споживання відновлюваної енергії;

ε_t - випадкова похибка моделі.

Для оцінювання прогнозної здатності моделі дані було поділено на навчальну та тестову вибірки. До навчальної вибірки включено спостереження з 1990 до 2020 року, а до тестової за 2020-2024 роки.

Таблиця 3.3 - Результати лінійної регресійної моделі

Змінна	Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-статистика	p-value
Константа	1,2724	0,4704	2,705	0,0121
ВВП на душу населення	-0,000109	0,0000528	-2,067	0,0492
Споживання енергії з вугілля	0,000474	0,0000493	9,618	0,00000007
Споживання енергії з нафти	0,000244	0,0000470	5,196	0,0000225
Відновлювана енергія	0,000049	0,000529	0,093	0,9269

Найбільш статистично значущим фактором впливу на викиди CO_2 на душу населення є споживання енергії з вугілля. Коефіцієнт при цій змінній є додатним і статистично значущим, що свідчить про прямий вплив вугільного енергоспоживання на обсяг викидів. Це означає, що збільшення використання вугілля супроводжується зростанням CO_2 , що виглядає цілком логічним.

Додатний і статистично значущий вплив також має споживання енергії з нафти. Це знову підтверджує, що нафтові ресурси залишаються важливим джерелом викидів, скорочення залежності від нафтових ресурсів, розвиток електротранспорту, модернізація логістики та підвищення енергоефективності транспорту можуть стати важливими напрямками зменшення викидів.

Коефіцієнт при ВВП на душу населення є від'ємним і статистично слабо значущим на 5-відсотковому рівні. Такий результат свідчить, що у досліджуваному періоді збільшення ВВП на душу населення не супроводжувалося зростанням CO₂ на душу населення. Як згадувалося раніше, це можна пояснити тим, що після 1990 року економічне зростання України відбувалося вже за умов нижчого рівня промислового виробництва, поступового скорочення частки найбільш енергоємних галузей і зміни структури економіки.

Змінна відновлюваної енергії у регресійній моделі взагалі є статистично не значущою, оскільки її p-value становить 0,9269. Це не означає, що відновлювана енергетика не має значення для декарбонізації. Скоріше, у межах наявної вибірки її вплив ще недостатньо чітко проявляється через відносно невелику її частку в країні та досі сильний вплив традиційних викопних джерел.

Загалом модель має високу пояснювальну здатність. Коефіцієнт детермінації R^2 становить 0,9815, а скоригований R^2 - 0,9786. Це означає, що включені фактори пояснюють близько 98% варіації викидів CO₂ на душу населення у навчальній вибірці. Водночас такий високий результат потрібно інтерпретувати обережно, оскільки вибірка містить невелику кількість річних спостережень, а між окремими енергетичними змінними може існувати взаємозв'язок. Для перевірки цієї проблеми було розраховано показники VIF, які дозволяють оцінити наявність мультиколінеарності (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 - Перевірка мультиколінеарності факторів регресійної моделі

Фактор	VIF
ВВП на душу населення	1,137
Споживання енергії з вугілля	6,077
Споживання енергії з нафти	6,289
Відновлювана енергія	1,098

Результати перевірки (табл 3.4) показують, що для ВВП на душу населення та відновлюваної енергії значення VIF є низькими й не створюють проблем для моделі. Водночас для споживання енергії з вугілля та нафти значення VIF перевищують 6, що свідчить про наявність помірної мультиколінеарності. Проте оскільки $VIF < 10$ і ці фактори є статистично значущими, мультиколінеарність не є критичною.

З огляду на це регресійну модель доцільно використовувати переважно для економічної інтерпретації взаємозв'язків між викидами CO₂ та факторами, а не як єдиний інструмент прогнозування. Саме тому в подальшому аналізі основний акцент зроблено на моделях часових рядів, які краще підходять для прогнозування динаміки показника у часі і при обмеженій кількості спостережень.

3.4 Прогнозування викидів CO₂ в Україні за допомогою моделей часових рядів

Оскільки досліджувані дані по своїй суті є часовими рядами, для прогнозування викидів CO₂ було використано кілька моделей часових рядів. Такий підхід є доцільним, оскільки він дозволяє врахувати історичну динаміку показника без надмірного ускладнення моделі великою кількістю пояснювальних змінних. Це також особливо важливо для України, оскільки кількість річних спостережень є дуже обмеженою, з моменту отримання незалежності пройшло лише 34 роки, а для радянських часів більшість даних відсутні взагалі.

У дослідженні було порівняно п'ять моделей: лінійну регресійну модель, ETS-модель, ARIMA-модель, модель TSLM та нейромережеву модель типу перцептрон. Такий набір моделей дозволяє порівняти класичний економетричний підхід, методи експоненційного згладжування, авторегресійні моделі та більш гнучкий підхід на основі нейронних мереж. У наукових джерелах моделі ETS та

ARIMA широко застосовуються для прогнозування часових рядів, а алгоритми їх автоматичного підбору реалізовані у пакеті forecast для R.

Для оцінювання точності прогнозів було використано три показники: MAE, RMSE та MAPE. MAE показує середню абсолютну похибку прогнозу, RMSE є корнем із середньоквадратичної похибки і сильніше реагує на великі відхилення, а MAPE відображає середню абсолютну похибку у відсотках. Відповідно чим нижчі значення цих показників, тим кращою є прогнозна здатність моделі.

Таблиця 3.5 - Порівняння прогнозної якості моделей на тестовій вибірці

Модель	MAE	RMSE	MAPE, %
TSLM	0,347	0,412	8,238
Нейромережа	0,392	0,485	10,512
Регресійна модель	0,604	0,661	15,657
ARIMA	0,601	0,741	16,343
ETS	0,866	1,010	23,247

Результати порівняння моделей (табл. 3.5) показують, що найкращу якість прогнозування має модель TSLM (Time Series Linear Model). Її середня абсолютна помилка становить 0,3472, RMSE - 0,4120, а середня відносна помилка MAPE - 8,2376%. Це означає, що саме трендова лінійна модель найточніше відтворила фактичну динаміку CO₂ на тестовому періоді 2020-2024 років.

Друге місце за якістю прогнозування посіла нейромережева модель типу персептрон. Для неї RMSE становить 0,4845, а MAPE - 10,5122%. Її результати також можна вважати достатньо прийнятними, однак вона поступається TSLM. Звичайна регресійна модель, ARIMA та ETS показали гірші результати. Найвищу помилку має ETS-модель, MAPE якої перевищує 23%.

Отримані результати свідчать, що для короткострокового прогнозування викидів CO₂ в Україні у межах наявної вибірки найбільш придатною є модель TSLM. Це можна пояснити тим, що динаміка CO₂ на душу населення в Україні після 1990 року має чітко виражений довгостроковий спадний тренд. Модель TSLM найкраще вловила цей тренд і тому продемонструвала найнижчу помилку прогнозування.

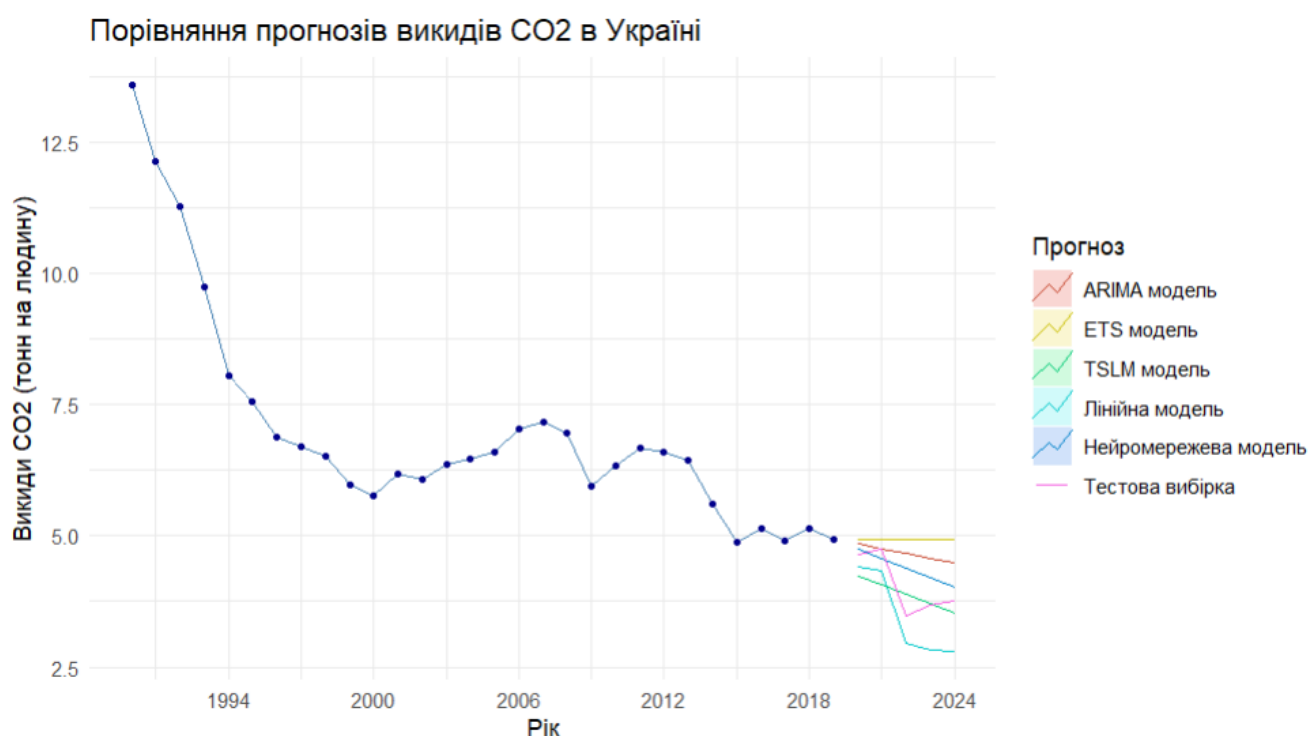


Рисунок 3.4 - Порівняння прогнозів викидів CO₂ в Україні за різними моделями

Джерело: розроблено автором

Рис. 3.4 демонструє, що різні моделі трохи по-різному відтворюють фактичну динаміку викидів CO₂ у тестовому періоді. Лінії прогнозів розходяться після 2020 року, що можна пояснити складністю прогнозування в умовах різких зовнішніх шоків. Тестовий період включає пандемію COVID-19, економічне уповільнення, повномасштабну війну та руйнування енергетичної інфраструктури. Через це прогнозування будь-яких українських показників є дуже складним завданням навіть для більш потужних моделей.

У зв'язку з цим важливо зазначити, що будь-який прогноз у таких умовах не можна розглядати як точне передбачення майбутнього. Він по суті лише показує базову траєкторію за умови збереження основної тенденції минулих років. Якщо наприклад післявоєнне відновлення України супроводжуватиметься швидким зростанням промисловості, попитом на цемент, метали, електроенергію та паливо, фактичні викиди можуть виявитися сильно вищими за теперішні прогнози.

3.5 Прогноз викидів CO₂ в Україні до 2030 року

Після порівняння якості моделей сформуємо прогноз викидів CO₂ на душу населення в Україні до 2030 року. Для цього було використано модель TSLM, оскільки саме вона показала найкращі результати на тестовій вибірці. Прогноз побудовано на основі повного часового ряду за 1990-2024 роки, що дозволяє врахувати всю доступну історичну інформацію.

Таблиця 3.6 - Прогноз викидів CO₂ на душу населення в Україні до 2030 року

Рік	Прогноз, т CO ₂ на особу	Нижня межа 80%	Верхня межа 80%	Нижня межа 95%	Верхня межа 95%
2025	3,443	1,639	5,252	0,630	6,257
2026	3,270	1,453	5,086	0,443	6,096
2027	3,096	1,270	4,921	0,256	5,936
2028	2,922	1,087	4,757	0,068	5,776
2029	2,748	0,904	4,593	-0,121	5,617
2030	2,575	0,720	4,429	-0,310	5,459

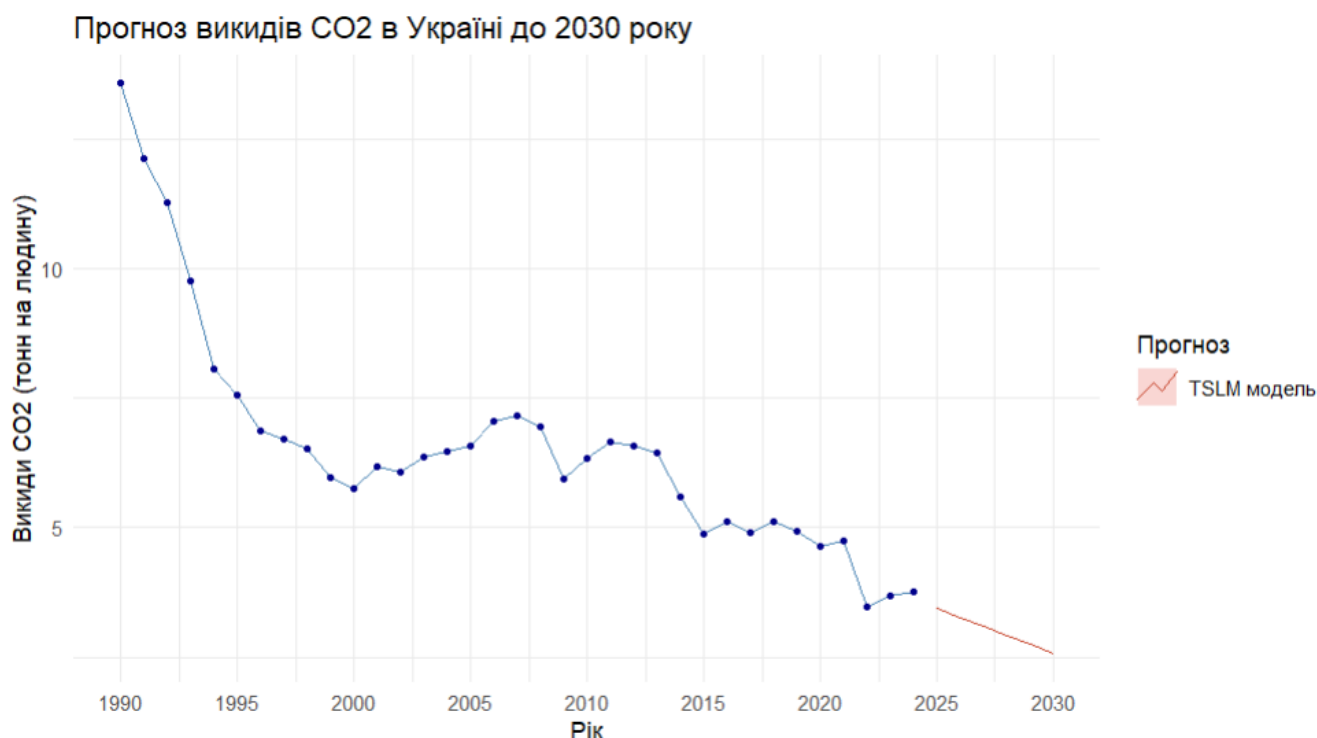


Рисунок 3.5 - Прогноз викидів CO₂ в Україні до 2030 року

Джерело: розроблено автором

Прогноз на основі TSLM-моделі показує подальший тренд на зниження викидів CO₂ на душу населення в Україні до 2030 року. За базовим прогнозом, показник може зменшитися з 3,443 т на особу у 2025 році до 2,575 т на особу у 2030 році. Отже, модель продовжує довгострокову спадну тенденцію, яка спостерігається в Україні після 1990 року.

Знову ж таки цей результат можна трактувати не лише як позитивне досягнення. В українських умовах зниження викидів раніше часто було пов'язане не з технологічною модернізацією, а зі скороченням промислового виробництва, економічними кризами, втратою частини виробничого потенціалу та наслідками війни. Тому так прогнозоване зниження CO₂ саме по собі ще не гарантує покращення економічної ефективності.

З економічної точки зору важливо розрізняти ці два типи скорочення викидів. Перший тип - негативне скорочення, коли CO₂ зменшується через падіння ВВП, закриття підприємств, втрату робочих місць і руйнування виробничої бази. Другий тип - позитивне скорочення, коли викиди зменшуються завдяки

модернізації виробництва, підвищенню енергоефективності, розвитку відновлюваної енергетики та технологічному оновленню. Для України звичайно стратегічно пріоритетнішим є саме другий варіант, оскільки він дозволяє одночасно і підтримувати економічне зростання і знижувати вуглецеву інтенсивність.

Отриманий прогноз показує, що за інерційним сценарієм Україна може продовжити зниження викидів на душу населення. Однак післявоєнне відновлення може ще сильно змінити цю траєкторію. Відбудова житла, доріг, мостів, промислових підприємств та енергетичної інфраструктури потребуватиме значних обсягів будівельних матеріалів, металу, цементу, електроенергії та пального. Це може тимчасово сильно збільшити обсяги викидів.

3.6 Економічна інтерпретація результатів і напрями скорочення викидів CO₂ в Україні

Для глибшого розуміння місця України у світовій та європейській системі викидів проведемо порівняння показника CO₂ на душу населення з відповідними значеннями для світу, Європейського Союзу, Німеччини та Польщі (рис. 3.6).

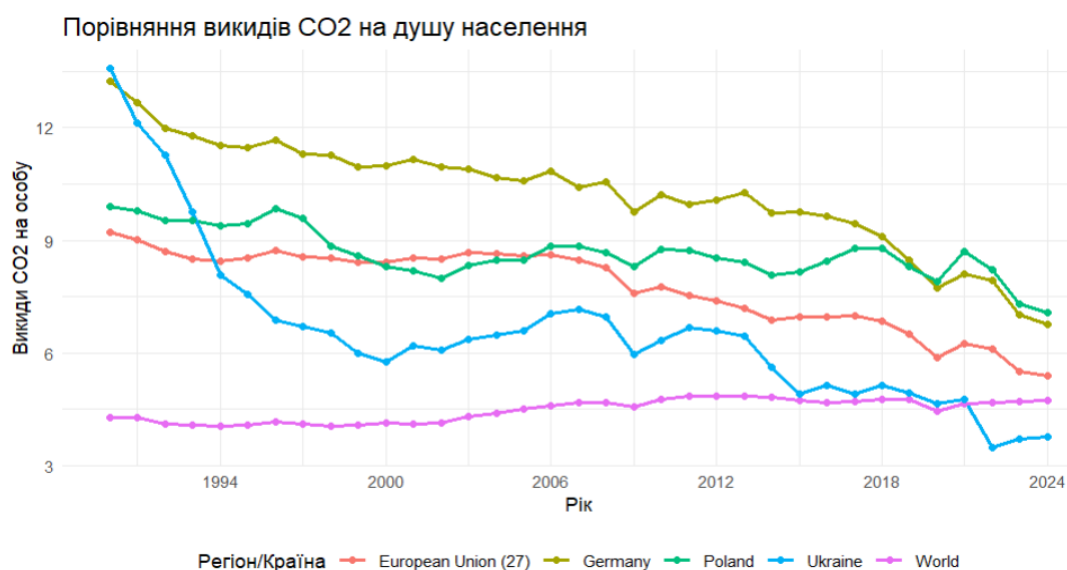


Рисунок 3.6 - Порівняння викидів CO₂ на душу населення в Україні, ЄС, Німеччині, Польщі та світі

Джерело: розроблено автором

Порівняльний графік знову показує, що Україна має специфічну траєкторію зміни викидів. На початку 1990-х років показник CO₂ на душу населення в Україні був вищим, ніж у більшості порівнюваних регіонів, і наближався до рівня Німеччини. Це відображало високу концентрацію важкої промисловості, значну роль вугілля в енергетиці та високу енергоємність виробництва. Надалі Україна продемонструвала різке скорочення показника CO₂ на душу населення і в 2022-2024 мала найменші значення, навіть нижчі за середньосвітові. Причини такої ситуації вже пояснювалися раніше.

Порівняння з Польщею тут є особливо важливим, оскільки ця країна також історично мала значну залежність від вугілля і соціалістичне минуле. Однак Польща, перебуваючи у складі Європейського Союзу, поступово адаптувала свою економіку до європейських екологічних стандартів, хоча її енергетична система і все ще значною мірою залежить від викопного палива. Для України польський досвід як найближчого сусіда є корисним, оскільки демонструє складність переходу від значної вугільної до більш диверсифікованої енергетичної моделі.

Загалом проведений в дослідженні аналіз дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо впливу викидів CO₂ на економіку України. По-перше, основним фактором формування викидів є структура енергоспоживання. Кореляційний і регресійний аналіз показали дуже сильний зв'язок між CO₂ та споживанням енергії з вугілля і нафти. Це означає, що скорочення викидів неможливе без зменшення їх споживання.

По-друге, зв'язок між ВВП на душу населення та CO₂ в українському випадку є неоднозначним. З точки зору логіки економічне зростання має супроводжуватися збільшенням енергоспоживання і викидів. Проте для України після 1990 року спостерігається інша картина: викиди знижувалися, а ВВП у пізніші роки поступово зростав. Значна частина цього скорочення викидів була зумовлена кризами та деіндустріалізацією.

По-третє, прогноз до 2030 року показує подальше зниження CO₂ на душу населення. Проте таке зниження буде економічно бажаним лише за умови, що воно

відбуватиметься не через падіння виробництва, а через підвищення ефективності економіки. Тому головним завданням державної політики має бути перехід від вимушеного скорочення викидів до керованої декарбонізації.

Одним із ключових напрямів має бути поступове зменшення залежності від вугілля. Миттєва відмова від вугілля є нереалістичною, особливо в умовах війни та потреби в енергетичній безпеці. Тому більш доцільним є поступовий підхід: модернізація теплової генерації, закриття найбільш неефективних потужностей, розширення частки відновлюваної енергетики.

Другим напрямом є підвищення енергоефективності промисловості. Українські підприємства, особливо у металургії, хімічному виробництві, будівельній галузі та енергетиці, часто потребують технологічного оновлення. Зменшення енергоємності виробництва дозволить не лише скоротити викиди, а й знизити собівартість продукції.

Третім напрямом має бути подальший розвиток відновлюваних джерел енергії. Аналіз показав, що збільшення споживання відновлюваної енергії має від'ємний зв'язок із CO₂. Хоча у регресійній моделі цей фактор не був статистично значущим, його стратегічне значення залишається високим. Розвиток сонячної, вітрової, біоенергетики та малої гідроенергетики може сприяти зниженню залежності від викопного палива, особливо за умови модернізації електромереж і розвитку систем накопичення енергії.

Четвертим напрямом є поєднання післявоєнної відбудови з принципами низьковуглецевого розвитку. Відбудова зруйнованої інфраструктури може стати не лише високовитратним процесом, а й можливістю для технологічного оновлення. Нові житлові будинки, промислові об'єкти, транспортна інфраструктура та енергетичні системи мають створюватися з урахуванням сучасних стандартів енергоефективності. Якщо цього не зробити, Україна ризикує відновити стару енергоємну модель економіки.

П'ятим напрямом є удосконалення системи моніторингу та обліку викидів. Так як без якісної статистики дуже складно оцінювати реальний прогрес декарбонізації та формувати подальшу кліматичну політику.

Шостим напрямом є розвиток низьковуглецевого транспорту. Оскільки споживання енергії з нафти має сильний зв'язок із CO₂, транспортний сектор є важливим джерелом потенційного скорочення викидів. Для цього необхідні розвиток громадського транспорту, електрифікація залізниці, стимулювання використання електромобілів, оновлення логістики та зменшення залежності від застарілого автотранспорту.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі було досліджено теоретичні та практичні аспекти прогнозування впливу викидів вуглекислого газу на економіку України. У процесі виконання роботи було розкрито економічну природу викидів CO₂, проаналізовано сучасні світові та вітчизняні тенденції їх зміни, а також розглянуто та використано деякі основні наукові підходи та методи машинного навчання, які застосовуються для прогнозування еколого-економічних показників.

У першому розділі встановлено, що викиди вуглекислого газу є не лише екологічним, а й важливим економічним показником. Їх рівень пов'язаний із розвитком промисловості, структурою енергоспоживання, урбанізацією, технологічним рівнем виробництва та загальною моделлю економічного розвитку країни. Аналіз світових тенденцій показав, що найбільші обсяги викидів формуються в країнах із потужною промисловою базою та значною залежністю від викопних видів палива. Водночас у розвинених країнах спостерігається поступове зниження рівня викидів завдяки модернізації виробництва, розвитку відновлюваної енергетики та підвищенню енергоефективності.

У другому розділі було застосовано методи машинного навчання для прогнозування світового рівня викидів CO₂. У роботі використано показники викидів, ВВП на душу населення, урбанізації, енергоспоживання та споживання відновлюваної енергії. Побудова моделей дала змогу оцінити зв'язок між викидами CO₂ та соціально-економічними факторами. Найбільш значущим чинником виявилось енергоспоживання, що підтверджує залежність обсягів викидів від структури енергетики та рівня використання викопного палива. Методи машинного навчання показали доцільність їх використання для роботи з нелінійними залежностями та багатофакторними еколого-економічними даними.

У третьому розділі було проаналізовано динаміку викидів CO₂ в Україні та їхній вплив на економічні процеси. Встановлено, що значне скорочення викидів в

Україні значною мірою було пов'язане не з ефективною екологічною політикою, скільки зі структурними кризами, спадом промислового виробництва, деіндустріалізацією та наслідками воєнних дій. Особливо відчутним став вплив повномасштабної війни, яка призвела до руйнування виробничої та енергетичної інфраструктури, зниження економічної активності та одночасного формування додаткових воєнних викидів.

Отримані результати показують, що для України важливим завданням є не просто зниження обсягів викидів CO₂, а забезпечення такого скорочення за рахунок модернізації економіки, підвищення енергоефективності, розвитку відновлюваної енергетики та оновлення промислової бази. У післявоєнний період саме відновлення інфраструктури може стати можливістю для переходу до більш сучасної та менш вуглецеємної економічної моделі.

Таким чином, мету роботи досягнуто, а поставлені завдання виконано. Проведене дослідження підтвердило, що викиди CO₂ мають тісний зв'язок з економічним розвитком, енергоспоживанням і технологічною структурою господарства. Використання методів машинного навчання є доцільним інструментом для аналізу та прогнозування таких процесів, оскільки дає змогу враховувати складні взаємозв'язки між екологічними й економічними показниками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Козбур Н. Розрахунок обсягу викидів CO₂ енергетичними установками від спалювання різних видів палива. *Екологія підприємства*, 2025. № 06. URL: <https://e.ecolog-ua.com/ekolohiya-pidpryyemstva-2025-6/rozrakhunok-obsyahu-vykydiv-so2-enerhetychnymy-ustanovkamy-vid>
2. Мелконова І. В., Мелконов Г. Л. Викиди парникових газів від системи генерування енергії на викопаному паливі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 2025. № 1 (287). С. 39-45. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-39-45>
3. Крутоголова І. О., Браверман В. Я. Економіко-екологічні аспекти декарбонізації енергетичної галузі. *Економіка та суспільство*, 2022. Вип. 38. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-38-72>
4. Башинська Ю. І., Огінок С. В. Економічні аспекти впливу повномасштабної війни на викиди парникових газів в Україні. *Таврійський науковий вісник, Серія: Економіка*, 2024. Вип. 21. DOI: <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2024.21.2>
5. Ritchie H., Roser M. CO₂ long-term concentration [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/co2-long-term-concentration?time=1349..latest>
6. Ritchie H., Rosado P., Roser M. Breakdown of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions by sector. Our World in Data, 2024. URL: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
7. IEA. CO₂ Emissions. Global Energy Review 2025. Paris: International Energy Agency, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>
8. Rigas N., Kounetas K. E. The impact of CO₂ emissions and climate on economic growth and productivity: International evidence. *Review of Development Economics*, 2024. Vol. 28, Issue 2. P. 719-740. DOI: <https://doi.org/10.1111/rode.13075>

9. Ritchie H., Roser M. CO₂ emissions. Our World in Data, 2020. URL: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
10. World Population Review. CO₂ Emissions by Country 2026. URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/co2-emissions-by-country>
11. Liu M., Yang X., Wen J. Drivers of China's carbon dioxide emissions. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023. Volume 100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107043>
12. Keerthana K. B., Wu S.-W., Wu M.-E., Kokulnathan T. The United States Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions: A Comprehensive Forecast Using a Regression Model. *Sustainability*, 2023. Vol. 15, Issue 10. Article 7932. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15107932>
13. Roy A. G. India's Carbon Journey Toward Net-Zero. Atlas Institute for International Affairs, 2025. URL: <https://atlasinstitute.org/indias-carbon-journey-toward-net-zero/>
14. Вплив російської війни в Україні на клімат: 24 лютого 2022 року - 23 лютого 2025 року. Попередня оцінка Ініціативи з обліку викидів парникових газів під час війни. Екодія, 2025. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/vplyv-ros-viyny-v-ukraini-2022-23-02-2025s.pdf>
15. Харченко В.О. Основи машинного навчання: навч. посіб. - Суми: Сумський державний університет, 2023. - 264 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/1f552e91-b6b4-4892-861f-1eaac7c84346/content>
16. Мокін В.Б. Наука про дані: машинне навчання та інтелектуальний аналіз даних - Електронний навчальний посібник, Вінниця : ВНТУ, 2024. - 263 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Mokin_2024_263.pdf
17. Costantini L., Laio F., Mariani M.S. *et al.* Forecasting national CO₂ emissions worldwide. *Sci Rep* 14, 22438 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73060-0>
18. Ajala A., Adeoye O., Salami O., Jimoh A. Y. An examination of daily CO₂ emissions prediction through a comparative analysis of machine learning, deep

learning, and statistical models. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. Vol. 32. P. 2510-2535. URL:

https://www.researchgate.net/publication/387963958_An_examination_of_daily_CO2_emissions_prediction_through_a_comparative_analysis_of_machine_learning_deep_learning_and_statistical_models

19. Hendry D. F. First in, first out: Econometric modelling of UK annual CO₂ emissions, 1860-2017. *Climate Econometrics*, Nuffield College, University of Oxford, 2020. URL:
https://www.nuffield.ox.ac.uk/economics/papers/2020/2020W02_CO2UKEmissionsModel20.pdf
20. Ayaz İ. Forecasting CO₂ Emissions with Machine Learning Methods: Türkiye Example and Future Trends. *Malatya Turgut Ozal University Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2024. Vol. 5, Issue 2. P. 82-87. URL:
<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4412292>
21. Hrithik P. M., Rehman M. Z., Dar A. A., Wangmo A. T. Forecasting CO₂ Emissions in India: A Time Series Analysis Using ARIMA. Processes, 2024. Vol. 12, Issue 12, 2699. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12122699>
22. Hasan R., Islam T., Bhuyia M. I. Forecasting Carbon Dioxide Emissions: A Data Science Approach to Awareness and Mitigation, 2026. URL:
https://www.researchgate.net/publication/401050495_Forecasting_Carbon_Dioxide_Emissions_A_Data_Science_Approach_to_Awareness_and_Mitigation
23. Hamedani E. A., Talebi S. Modeling and long-term forecasting of CO₂ emissions in Asia: An optimized Artificial Neural Network approach with consideration of renewable energy scenarios. *Energy Conversion and Management: X*, 2025. Vol. 26. Article 101030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101030>
24. Romeo L. M. CO₂ Emissions Scenarios in the European Union - The Urgency of Carbon Capture and Controlled Economic Growth, 2026. Vol. 18, Issue 2. Article 1043. DOI: <https://doi.org/10.3390/su18021043>

25. CO₂ emissions per capita [Dataset]. Our World in Data. URL: https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?time=1990..latest&country=OWID_WRL~USA~GBR~OWID_EU27
26. GDP per capita [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/gdp-per-capita-worldbank?time=earliest>
27. Share of the population living in urban areas [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-population-urban?time=earliest>
28. Energy use per person [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?time=earliest..latest>
29. Per capita energy consumption from renewables [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-renewables?time=earliest>
30. Per capita energy consumption from coal [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/coal-consumption-per-capita?time=earliest..latest>
31. Per capita oil consumption [Dataset]. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-oil>