

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Факультет інформаційних технологій

Кафедра технологій управління

Спеціальність 122 – Комп’ютерні науки,
освітня програма «Інформаційна аналітика та впливи»

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**“Аналіз та прогнозування тенденцій глобального потепління залежно
від викидів автомобільного транспорту”**

Студента 2-го курсу групи ІАВ-21

Науковий керівник:

к.е.н. доц.

Підойми Марини Володимирівни

Мезенцева Ольга Олексіївна

(підпис студента)

(дата)

(підпис)

Попередній захист:

(Висновок: «До захисту в Екзаменаційній комісії»)

Завідувач кафедри
технологій управління

(підпис)

Морозов В.В.

(дата)

Київ - 2021

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
Факультет інформаційних технологій**

Кафедра технологій управління
Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр
Спеціальність 122 - Комп'ютерні науки
Освітня програма Інформаційна аналітика та впливи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Професор Морозов В.В.

«__» _____ 2021 року

**ЗАВДАННЯ
НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Студент Підойма Марина Володимирівна
Група ІАВ – 21

1. Тема кваліфікаційної роботи «Аналіз та прогнозування тенденцій глобального потепління залежно від викидів автомобільного транспорту»

Затверджена наказом від «09» листопада 2020 р. №4.

2. Строк подання студентом готової роботи - «20» травня 2021 р.

3. Цільова установка та вихідні дані до роботи:

Цільова установка: аналіз тенденцій глобального потепління та характеристика взаємозалежності між викидами автомобільного транспорту та глобальним потеплінням.

Вихідні дані: дата-сет, що включає наступні дані: year – рік, в якому проводили спостереження (1983 - 2019), month – місяць, в який проводили спостереження, temp - різниця в градусах

Цельсія між середньою глобальною температурою в той період та контрольним значенням (залежна змінна), CO₂ – концентрації вуглекислого газу в атмосфері.

Програмне забезпечення: програмне середовище для статистичних обчислень R.

4. Зміст роботи:

1. дослідження основ ретроспективного аналізу кліматичних змін;

2. вивчення математичного апарату для аналізу глобального потепління;
3. опис методів прогнозування кліматичних змін;
4. опис існуючих кліматичних даних;
5. оцінка існуючих моделей прогнозування глобального потепління;
6. опис тенденцій глобального потепління за існуючими моделями на наступні 50 років;
7. розробка моделі для прогнозування глобального потепління;
8. аналіз впливу автомобільних викидів на глобальне потепління;
9. опис стратегічних планів ЄС зі скорочення антропогенних викидів в атмосферу;
10. порівняння існуючих кліматичних моделей між собою та із розробленою протягом роботи моделлю.

5. Перелік графічного матеріалу (слайдів): 22 рисунки, 3 таблиці, 4 формули, 1 додаток й 6 слайдів презентації.

6. Календарний план виконання роботи:

№ з/п	Назва частин роботи	%	Виконання робіт	
			За планом	Фактично
1.	Вибір теми дипломної роботи	3	01.10.20	01.10.20
2.	Протокол кафедри ТУ про затвердження тем дипломних робіт та призначення наукових керівників	2	09.11.20	09.11.20
3.	Формування переліку нормативних матеріалів, літератури з проблематики дипломної роботи	10	08.12.20	08.12.20
4.	Складання розгорнутого плану кваліфікаційної роботи	5	18.01.21	18.01.21
5.	Ознайомлення наукового керівника з розгорнутим планом кваліфікаційної роботи. Внесення змін.	5	20.01.21	19.01.21
6.	Підготовка розділу 1 «Теоретичні засади аналізу кліматичних змін в динамічних умовах»	15	12.02.21	12.02.21

7.	Підготовка розділу 2 «Аналіз та прогнозування тенденцій глобального потепління»	18	10.03.21	10.03.21
8.	Підготовка розділу 3 «Ефективність аналізу та прогнозування тенденцій глобального потепління»	16	15.04.21	15.04.21
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка висновків і пропозицій	15	29.04.21	29.04.21
10.	Передача кваліфікаційної роботи науковому керівникові	2	04.05.21	04.05.21
11.	Передача кваліфікаційної роботи рецензенту для рецензування	2	05.05.21	05.05.21
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	5	11.05.21	11.05.21
13.	Подача готової роботи на кафедру	2	20.05.21	20.05.21

Дата видачі завдання - «01» жовтня 2020 р.

Керівник роботи

к.е.н. доц. Мезенцева Ольга
Олексіївна

(підпис)

Завдання прийняв до виконання
студент групи ІАВ - 21

Підойма Марина Володимирівна

(підпис)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН В ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ	11
1.1 Основи ретроспективного аналізу кліматичних змін	11
1.2 Умови обмежених даних та неповнота математичного апарату для аналізу глобального потепління	21
1.3 Методи прогнозування кліматичних змін за умови глобального потепління	25
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ	31
2.1 Характеристика кліматичних та антропогенних даних для аналізу.....	31
2.2. Оцінка існуючих моделей прогнозування глобального потепління	37
2.3 Тенденції глобального потепління за існуючими моделями на наступні 50 років	44
РОЗДІЛ 3 ЕФЕКТИВНІСТЬ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ	52
3.1 Модель аналізу кліматичних даних для прогнозування глобального потепління в розрізі викидів автомобільного транспорту.....	52
3.2 Аналіз стратегічних планів ЄС зі скорочення антропогенних викидів в атмосферу	58
3.3 Порівняльний аналіз моделей прогнозування глобального потепління	73
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
ДОДАТКИ	100

АНОТАЦІЯ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет інформаційних технологій

Кафедра технологій управління

Спеціальність 122 - Комп'ютерні науки,

освітня програма "Інформаційна аналітика та впливи"

Дипломна робота магістра Підойми Марини Володимирівни.

Тема роботи - «Аналіз та прогнозування тенденцій глобального потепління залежно від викидів автомобільного транспорту».

Мета дипломної роботи магістра - аналіз тенденцій глобального потепління та характеристика взаємозалежності між викидами автомобільного транспорту та глобальним потеплінням.

Об'єкт дослідження – це характеристики та властивості впливу викидів автомобільного транспорту на підвищення глобальної середньої температури повітря.

Предмет дослідження - інструменти оцінки впливу викидів автомобільного транспорту на глобальний клімат.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні оцінки впливу управління попитом на подорожі та впровадженні чистих транспортних технологій на сценарії декарбонізації транспортного сектору.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає три розділи, висновків та списку використаних джерел. Всього налічує 100 сторінок та перелік посилань із 70 джерел на 7 сторінках.

Ключові слова: клімат, глобальне потепління, аналіз кліматичних змін, модель прогнозування глобального потепління, ІРСС.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

RC - Радіаційно-конвективна модель

EBM - Модель енергетичного балансу

GCM - Модель загальної циркуляції

SD - Двовимірна статистично-динамічна модель

IPCC - Міжурядова група експертів з питань змін клімату

EMIC - Модель системи Земля проміжної складності

ВСТУП

Актуальність теми. Зміна клімату на даний момент є чи не найбільшим екологічним викликом у світі. Зараз очевидно, що викиди парникових газів, що пов'язані із індустріалізацією та економічним зростанням спричиняють глобальне потепління. 2019 рік був офіційно визнаним другим найтеплішим роком в історії людства, а останнє десятиліття вважається найтеплішим з усіх коли-небудь зафіксованих. Рівні вуглекислого газу (CO_2) та інших парникових газів в атмосфері зросли до нових рекордів у 2019 році. А глобальне потепління, спричинене антропогенними викидами, викликає кліматичні зміни, які представляють серйозну загрозу для життя на землі у вигляді повеней та інших екстремальних погодних умов, уже сьогодні кожен відчув наслідки глобального потепління. Глобальне потепління за сучасним сценарієм є загрозою для виживання людства.

Реагування на кліматичні зміни сьогодні охоплює такі речі, як зменшення викидів та стабілізація рівня парникових газів в атмосфері, пристосування до фактичного та очікуваного клімату та вивчення клімату. Вивчення клімату допомагає передбачити як сильно підніметься рівень моря через тепліші температури моря, як підніметься температура повітря. Ми також можемо побачити, які регіони, найімовірніше, постраждають від екстремальних погодних умов, або яким видам дикої природи загрожує зміна клімату.

Метою магістерської роботи є аналіз тенденцій глобального потепління та характеристика взаємозалежності між викидами автомобільного транспорту та глобальним потеплінням.

Об'єктом дослідження є характеристики та властивості впливу викидів автомобільного транспорту на підвищення глобальної середньої температури повітря.

Предметом дослідження інструменти оцінки впливу викидів автомобільного транспорту на глобальний клімат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. дослідити основи ретроспективного аналізу кліматичних змін;
2. вивчити математичний апарат для аналізу глобального потепління;
3. описати методи прогнозування кліматичних змін;
4. описати існуючі кліматичні дані;
5. оцінити існуючі моделі прогнозування глобального потепління;
6. описати тенденції глобального потепління за існуючими моделями на наступні 50 років;
7. розробити модель для прогнозування глобального потепління;
8. проаналізувати як автомобільні викиди впливають на глобальне потепління;
9. описати стратегічні плани ЄС зі скорочення антропогенних викидів в атмосферу;
10. порівняти існуючі кліматичні моделі між собою та із розробленою протягом роботи моделлю.

Наукова новизна результатів роботи полягає в отриманні оцінки впливу управління попитом на подорожі та впровадженні чистих транспортних технологій на сценарії декарбонізації транспортного сектору.

Незважаючи на велику кількість досліджень, що аналізують сценарії декарбонізації транспортного сектору, попередні дослідження приділяли велику увагу аналізу конкретних заходів або технологій. Впродовж цієї магістерської роботи розроблений та досліджений комплексний підхід для аналізу впливу викидів автомобільного транспорту на клімат та прогнозування змін клімату спричинених парниковими газами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що запропонована в ході цієї роботи модель аналізу кліматичних даних та прогнозування глобального потепління дозволить розрахувати кількість парникових газів, що генеруються в дорожньому секторі, та допоможе у розробці

відповідних заходів щодо управління попитом на подорожі та впровадженні чистих транспортних технологій. Ці дані будуть корисні при містобудуванні, а саме проектуванні доріг, очисних споруд, покращенні ефективності мереж внесення змін в інфраструктуру, вивчення соціально-економічних наслідків викидів транспорту, розуміння попиту та пропозиції на транспорт, а також моделювання якості повітря та викидів.

Методи дослідження, що були використані впродовж роботи включають математичне моделювання, регресійні методи (регресійний аналіз, баєсівську лінійну регресію), статистичні методи та інструменти для побудови графіків та візуалізації, методи машинного навчання, із методів емпіричного дослідження були застосовані синтез та спостереження. Для розробки моделі прогнозування температурних змін використовувалося програмне середовище для статистичних обчислень R.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків. Також наводиться список літератури з 70 пунктів та 1 додатка. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи становить 100 сторінок, із них 92 сторінки основного тексту, який містить 22 рисунка.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ АНАЛІЗУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН В ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

1.1 Основи ретроспективного аналізу кліматичних змін

Аналіз кліматичних змін має за мету підвищення та розширення нашого розуміння атмосферних і кліматичних змін за допомогою паралельної розробки і аналізу наборів даних, спостережень - асимільованих і створених на основі моделей даних, а також використання наборів даних для емпіричних досліджень, діагностичного аналізу і оцінки моделей для всебічного документування цих змін, залучених процесів і їх причин.

Приблизно за останні 30 років моніторинг клімата і його мінливості в реальному часі в академічних та наукових установах та метеорологічних службах більшості країн світу став звичною справою. Цей моніторинг направлений в першу чергу на дослідження місячного і сезонного клімату привів до того, що на даний момент є дуже велика кількість даних, які в свою чергу дозволяють нам будувати та перевіряти гіпотези. В результаті гіпотези дають нам можливість спробувати пояснити джерела змін спостережуваного клімата. Дуже часто гіпотези засновані на статистичних відношеннях між компонентами кліматичної системи, або на спостереженнях, взятих із тематичних досліджень. Вирішальна роль кліматичного аналізу в дослідженнях такого роду полягає в тому, щоб перейти від простого статистичного висновку до вивчення фізичних зв'язків між спостережуваними явищами. Наприклад, між більш значним, ніж зазвичай, сезонним підвищенням температури поверхні моря в екваторіальній частині Тихого океану і кількістю опадів в Сполучених Штатах Америки. Тільки шляхом перевірки гіпотез, заснованих на фізиці, із використанням незалежних спостережень, або моделювання, кліматичних аналіз дозволяє розширити наше розуміння кліматичної системи [19].

Численні моделі кліматичної системи стають все більш складними. Спостерігається постійний значний прогрес в збільшенні просторового і часового розширення цих моделей разом із досягненнями у доповненні моделей все більшою кількістю компонентів кліматичної системи (наприклад, атмосфери, океана, поверхні суші, морського льоду і снігового покриву) і поступового покращення параметризації суб-компонентів. Аналіз клімату все частіше використовується для порівняння спостережень і моделей. Ціль цих порівнянь - допомогти встановити можливості і обмеження моделей у відтворюванні і прогнозуванні клімату в минулому і допомогти встановити можливості моделі для прогнозування майбутніх кліматичних явищ.

Процес аналізу клімату повинен притримуватися набору чітко встановлених правил, якщо ми хочемо, щоб аналіз був корисним та сприяв більш глибокому розумінню змін клімату.

Основні етапи аналізу клімату:

1. визначення цілі аналізу;
2. вибір або розробка даних, що чітко підходять під ціль аналізу;
3. застосування відповідних інструментів аналізу;
4. критична інтерпретація результатів аналізу.

Ціль аналізу сильно впливає на дані та інструменти, які будуть використовуватися в аналізі. Аналіз кліматичних змін може виконуватися з великої кількості різних причин, наприклад з необхідності підтвердити чи спростувати якусь гіпотезу або для прогнозування кліматичних змін в майбутньому. Тому саме питання «Чому ми виконуємо цей аналіз?» є найголовнішим етапом в процесі аналізу та саме відповідь на це питання повинна направляти нас в нашій подальшій роботі [36].

На даний момент є велика кількість проаналізованих з допомогою моделей даних, даних дистанційного зондування і велика кількість спостережень окремих станцій. В своїй більшості ці дані є безкоштовними та знаходяться у вільному

доступі.

Однією із перших задач, коли ціль аналізу чітко визначена, є вивчення існуючих наборів даних, щоб визначити чи підходить один чи декілька із них для проблеми, що досліджується [31]. Якщо таких даних немає, дослідницька діяльність повинна буде додатково включати розробку необхідних наборів даних. В якості альтернативи, можливо, вдасться змінити об'єм і ціль аналізу з врахуванням реальних обмежень даних.

Просторові і часові характеристики даних повинні бути сумісними з ціллю аналізу; наприклад, етапи місячних та сезонних коливань температури в визначеному місці чи регіоні не можна проводити тільки з використанням часових рядів середньорічної глобальної температури.

Тимчасові аспекти даних характеризуються періодом, тривалістю, повнотою, безперервністю і частотою вибірки. Вкрай важливо уважно вивчити документацію, пов'язану з даними, щоб визначити ці характеристики і оцінити переваги та недоліки набору даних в контексті аналізу [37]. Аналіз буде значно покращений, якщо в дослідження буде включено більше одного набору даних з відповідними характеристиками. Якщо жоден з доступних наборів даних не має необхідних характеристик, для аналізу може знадобитися використання двох або більше наборів даних, які мають додаткові переваги і обмеження. Наприклад, запис про опади в певному місці може мати тимчасові проміжки, які можна заповнити за допомогою статистичних співвідношень між отриманими із супутника оцінками опадів і опадів в цьому місці.

Ймовірно, що в деяких записах щомісячних спостережень буде менше щоденних спостережень, ніж кількість днів у місяці. На практиці певна кількість щоденних спостережень встановлюється як мінімум, необхідний для оцінки місячних значень, які узгоджуються з метою аналізу [32]. Як правило, центри обробки даних і інші джерела цих даних доволіно допускають пропуск не більше 10% записів температури, наприклад, три пропущених дня для щомісячної оцінки.

Ще одна складність в цьому прикладі полягає в тому, що деякі щоденні дані, записані до або після відсутніх даних, могли бути отримані в результаті інтерполяції або статистичних оцінок. У будь-якому випадку розумно оцінювати невизначеність, викликану неповними даними. Одним із способів оцінки цієї невизначеності є порівняння місячних значень з повних наборів даних з місячними значеннями, сформованими шляхом випадкового утримання даних за N днів.

Після того, як буде встановлено, що отримані дані мають необхідні характеристики для пропонованого аналізу, їх також необхідно вивчити, щоб переконатися, що вони просторово узгоджені з аналізом. Просторові аспекти даних характеризуються просторовою протяжністю або областю, щільністю даних, одноманітністю інструментів спостереження і просторовою однорідністю. Ці характеристики часто змінюються в залежності від періоду аналізу і можуть обмежувати можливість отримання однозначних висновків.

Статистична значимість результатів аналізу залежить від багатьох факторів, включаючи кількість незалежних вибірок в досліджуваному наборі даних. Це вірно при обчисленні простих кореляцій між парою часових рядів, а також при застосуванні більш складних статистичних інструментів, таких як спектральний аналіз або емпіричні ортогональні функції. Наприклад, спектральний аналіз часто використовується для визначення періодичної або квазіперіодичної поведінки. Спектральний аналіз, в принципі, ідентифікує періоди, що варіюються від загальної довжини аналізованого часового ряду до подвоєного періоду, в який були взяті дані. На практиці дозволені частоти будуть залежати від того, як саме розраховується спектр вибірки [46]. Наприклад, спектральний аналіз щомісячних даних за 30 років спробує визначити періодичну поведінку з періодами від 30 років до 2 місяців. У цьому гіпотетичному випадку спектральний аналіз може визначити річний цикл, тому що за 30 років щомісячних даних є 30 незалежних вибірок. Він надасть деяку вказівку на дворічну мінливість на основі 15 або меншого числа незалежних вибірок, але він не може надати досить надійної інформації про десятилітню або

більш тривалу мінливість, оскільки є тільки три або менше 10-річних вибірок за 30-річний період. Таким чином, спектральний аналіз 30-річного набору даних не є підходящим інструментом для вивчення десятирічної мінливості. Спектральний аналіз місячних даних також не підходить для вивчення явищ з періодами менше двох місяців, таких як внутрішньосезонна мінливість.

Універсальні статистичні інструменти можуть давати результати, які можуть не мати ніякого фізичного значення. Інтерпретація статистичного аналізу також може бути обмежена, тому що в будь-якому наборі кліматичних даних кількість незалежних вибірок, ймовірно, буде меншою за кількість точок даних, оскільки суміжні точки даних часто сильно корельовані між собою.

Чим менша кількість незалежних вибірок, тим більше невизначеності в аналізі. Якщо є тільки кілька незалежних вибірок, як у випадку десятирічної мінливості в наведеному вище прикладі, залишається невеликий вибір, крім як аналізувати дані як набір тематичних досліджень.

Точно так само необхідно враховувати просторові розміри досліджуваного явища по відношенню до кількості просторово незалежних вибірок в галузі, яку охоплює даними [34]. Наприклад, середня температура поверхні моря в просторових масштабах в пару градусів широти і довготи над більшою частиною світового океану може корелюватися на відстанях в сотні кілометрів на великих ділянках океану.

Додатково до статистичних інструментів в багатьох кліматичних дослідженнях використовується композитний аналіз, який також називається аналізом накладених епох, в якому середні показники за кількома зразками визначаються для показників або подій. Наприклад, середні показники опадів у певній місцевості можуть бути задані деяким пороговим значенням індексу температури морської поверхні для певного місця. Якщо аналіз має на меті подальше наше розуміння, важливо, щоб індекс, обраний для формування композиту, відповідав фізичним механізмам, які, як передбачається, пов'язані з

явищем.

Важливо, щоб аналіз включав обговорення будь-яких неявних припущень, а також невизначеності в аналізі та альтернативних інтерпретацій.

Неявні та явні припущення в аналізі обмежують ступінь перевірки гіпотези за допомогою певного набору даних. Ці припущення стосуються репрезентативності даних, здатності приладу або вихідної моделі забезпечувати реалістичні значення кліматичних змінних та придатності просторової та часової області.

Усі інструменти аналізу пов'язані з набором явних формальних припущень. Ці припущення слід інтерпретувати в контексті досліджуваного явища та даних, що аналізуються. Наприклад, засоби статистичного аналізу, як правило, включають припущення про стаціонарність. З іншого боку, у дослідженнях зміни клімату аналіз може бути спрямований на документування того, наскільки дані нестаціонарні [43].

Тестування програмного забезпечення для аналізу даних, для яких відомий результат, є одним із методів ознайомлення з тим, що робить програмне забезпечення. Наприклад, можна очікувати, що програма спектрального аналізу визначатиме річний цикл за кількома роками щоденних чи щомісячних даних.

1.1.3 Розвиток аналізу кліматичних змін за останні 60 років

Кліматичне моделювання набуло значного розвитку з моменту застосування перших глобальних моделей атмосферного моделювання клімату в 1960-х роках (див. табл. 1.1). Далі розглянемо кожну з них детальніше.

Таблиця 1.1 – Історичний розвиток кліматичних моделей

Часовий проміжок	Статус кліматичної моделі
≤ 1969	Розширення чисельних прогнозів погоди
	Розробка Радіаційно-конвективної моделі (далі – RC)
	Опис Моделі енергетичного балансу (далі - EBM)
1969 - 1981	Розширення Моделі загальної циркуляції (далі - GCM)
	Винайдення Двовимірної статистично-динамічної моделі (далі - SD)
	Моделювання парникового ефекту з допомогою моделей загальної циркуляції
1981 - 1989	GCM стає домінуючою
	Початок використання супутників для генерування глобальних спостережень
1989 - 1999	Започаткування Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (далі - IPCC)
	Додавання таких компонентів, як морський лід та суша до кліматичних моделей
	Додавання компонентів океану та атмосфери
2000 ≥	Створення Моделі системи Земля проміжної складності (далі - EMIC)

Часовий проміжок	Статус кліматичної моделі
2000 \geq	Попередньо створені моделі повторно валідуються
	Збільшення потреб в оцінці викликають збільшення потреби в спостереженнях
	З'являється потреба в нових числових моделях

Існують 2 форми ЕВМ:

1. нульова або безвимірنا модель;
2. одновимірна модель.

В нульовій моделі Земля розглядається як одна точка із середньою ефективною температурою (див. рис. 1.1).

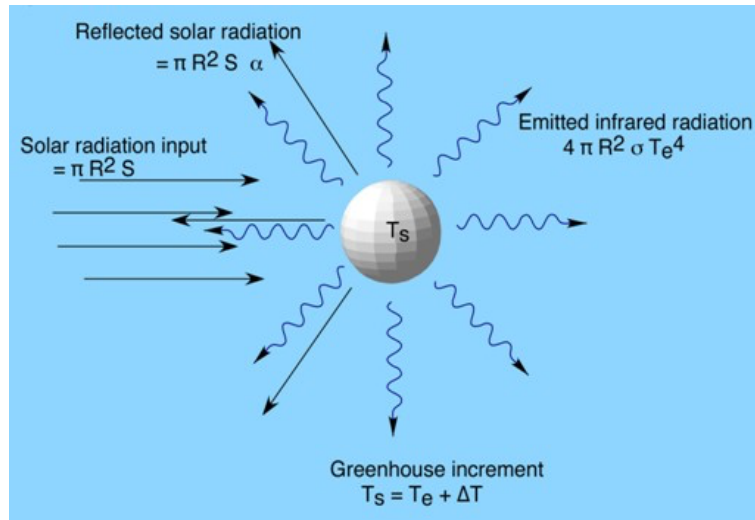


Рисунок 1.1 – Нульова модель ЕВМ [63]

В одновимірній моделі температура розраховується для кожної широти [47] (див. рис. 1.2).

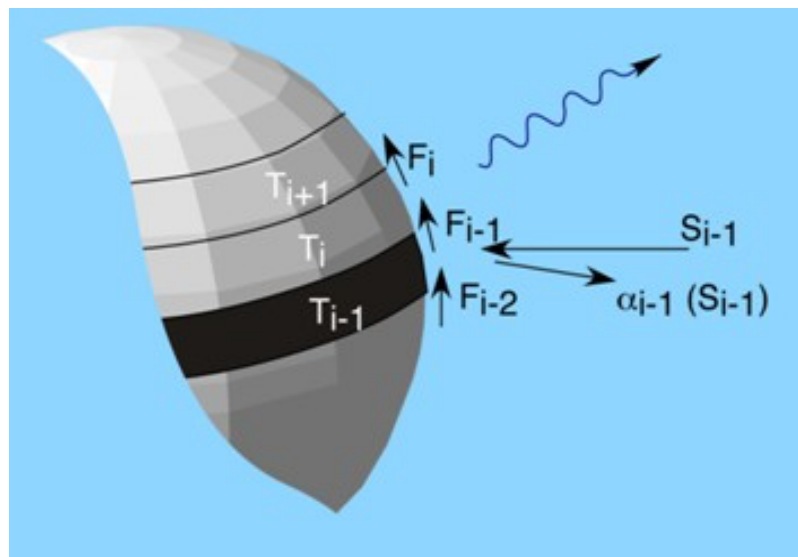


Рисунок 1.2 – Одновимірна модель ЕВМ [63]

РС існують одно- та двовимірні, де висота - це незмінна постійно існуюча розмірність. Така модель детально імітує передачу енергії через глибину атмосфери, включаючи:

1. випромінювальні перетворення, які відбуваються в міру поглинання, випромінювання та розсіювання енергії;
2. роль конвекції, передачі енергії через вертикальний рух атмосфери в підтримці стабільності.

Як і у випадку з ЕВМ, залежні від часу розрахунки (накопичення енергії та потоки в глибокий океан) можуть бути зроблені залежно від характеру аналізу. РС є найбільш корисними для вивчення збурень, що походять з атмосфери, таких як наслідки вулканічного забруднення [7].

GCM зображують клімат за допомогою тривимірної сітки над земною кулею (див. рис. 1.3), як правило, горизонтальна роздільна здатність становить від 250 до 600 км, 10-20 вертикальних шарів в атмосфері та іноді до 30 шарів в океанах. Таким чином, їх роздільна здатність є досить грубою щодо шкали одиниць експозиції в більшості оцінок впливу. Більше того, багато фізичних процесів також відбуваються в менших масштабах і не можуть бути належним чином змодельовані.

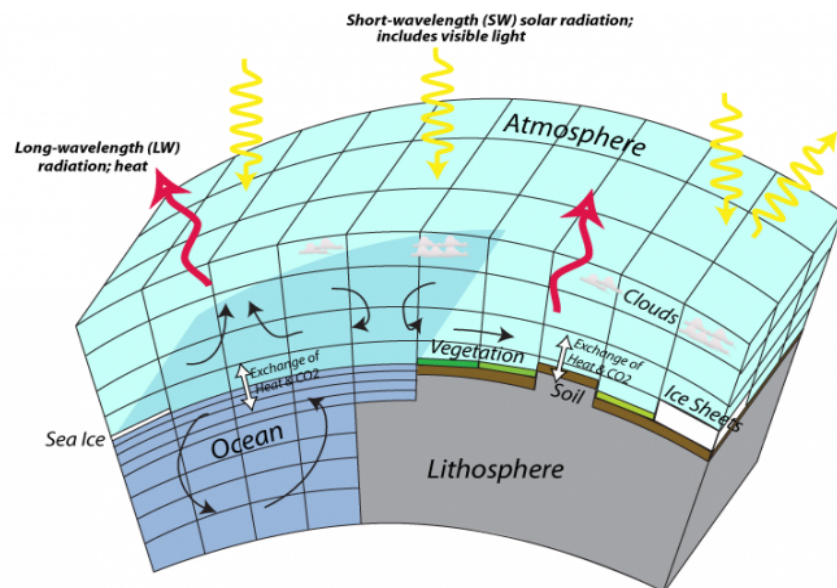


Рисунок 1.3 – Схематична структура GCM [64]

RC - це двовимірні (з одним горизонтальним і одним вертикальним розмірами) моделі, що поєднують в собі горизонтальну передачу енергії ЕВМ з випромінювально-конвективними функціями RCM. Однак перенесення екватора і полюсів в RC моделюється більш точно, ніж в ЕВМ, на основі теоретичних та емпіричних зв'язків клітинного потоку між широтами [11]. Дифузія енергії симулюється з використанням законів руху. Статистичні співвідношення визначають швидкість руху та напрямок вітру в моделях. Ці моделі корисні для моделювання та вивчення горизонтальних потоків енергії та процесів, що порушують її.

ЕМІС нагадує загальну модель циркуляції або GMS, але розрахунки проводяться на більш тривалих часових шкалах та більших просторових масштабах, що дозволяє вивчати клімат протягом більш тривалих періодів, наприклад, тисячі років. ЕМІС, як правило, має тривимірну атмосферу і плиту океану, або тривимірний океан і атмосферу балансу енергії та вологи. ЕМІС мають більший ступінь параметризації, ніж GCM, і це може спричинити більший ступінь невизначеності в їх прогнозах.

1.2 Умови обмежених даних та неповнота математичного апарату для аналізу глобального потепління

Центральною проблемою сучасної теорії клімату є проблема передбачення змін клімату, викликаних антропогенною діяльністю та прогнозування майбутніх концентрацій.

Існує багато взаємодій, які ускладнюють вивчення зв'язку між концентрацією викидів та потеплінням. Та навіть якщо припустити певний рівень потепління, існує велика невизначеність щодо впливу клімату на різні регіони світу, існує складність у визначенні та оцінці масштабів впливу, як зміна клімату може впливати на навколишнє середовище та добробут людей.

Світовий клімат створюється за допомогою різноманітних процесів та взаємодій, що діють у широкому діапазоні масштабів, включаючи молекулярний,

регіональний, континентальний та глобальний. Зміни клімату відбуваються внаслідок фізичних взаємодій, що відбуваються на будь-якій або всіх цих шкалах. Зміни та наслідки погоди, що виникають, можуть відбуватися майже миттєво, а для розвитку можуть знадобитися десятиліття чи тисячоліття [12]. На жаль, комп'ютери та програми, що керують кліматичними моделями, обмежуються загальним поданням географічних, геологічних та атмосферних деталей, які вони використовують для моделювання клімату. Таким чином, багато дрібних особливостей, таких як тимчасовий, але значний зсув панівних вітрів або незвично сухі поверхневі умови через посилене випаровування від лісових пожеж та сильних вітрів, не можуть бути представлені.

Дійсно, кліматичні моделі можуть в кращому випадку представляти лише ескіз реального світу, з просторовими роздільними здатностями, не меншими, ніж регіональні райони на тисячу миль квадратних [9]. Багато топографічних, геологічних, атмосферних та біологічних змін можуть відбуватися в межах будь-якої суміжної тисячі квадратних миль. Наприклад, кліматичні моделі можуть усереднювати кількість опадів і швидкість вітру на великих різноманітних земних поверхнях, які можуть включати посушливі гірські плоскогір'я, низові пустелі та помірні прибережні ліси. Але навіть невеликі топографічні зміни - наприклад, нове житлове будівництво, яке осушує заболочену територію - можуть зробити модель взаємодії землі та поверхні неточною.

З огляду на зазначені обмеження, кліматичні моделі просто не можуть надійно відтворювати кліматичні системи. Оподи та проходження типових погодних фронтів, досить складно зобразити; справді складні явища, такі як урагани, грози та торнадо, можуть бути представлені настільки погано, що на них просто не можна поклатися. Ель-Ніньо, Ла-Нінья та Тихоокеанські десятилітні коливання є прикладами складних кліматичних явищ, які неадекватно відтворені або повністю відсутні в моделях.

Крім того, середню глобальну температуру вимірюють трьома різними приладами - наземними термометрами, аеростатами та глобальними супутниковими спостереженнями - при цьому кожна система охоплює дещо інший діапазон земної атмосфери. Дані, які вони надають, суперечливі. У той час як глобальна супутникова мережа та спостереження за повітряними кулями демонструють помірну тенденцію охолодження протягом останніх 25 років, наземні термометри демонструють помірне потепління приблизно 0,13 °C на десятиліття.

Внаслідок вище описаної неповноти даних кліматичні моделі показують два основні недоліки. По-перше, згідно, наприклад з сучасними GCM, глобальні температури піднімаються на всіх рівнях атмосфери, що не є правдою (див. рис. 1.4).

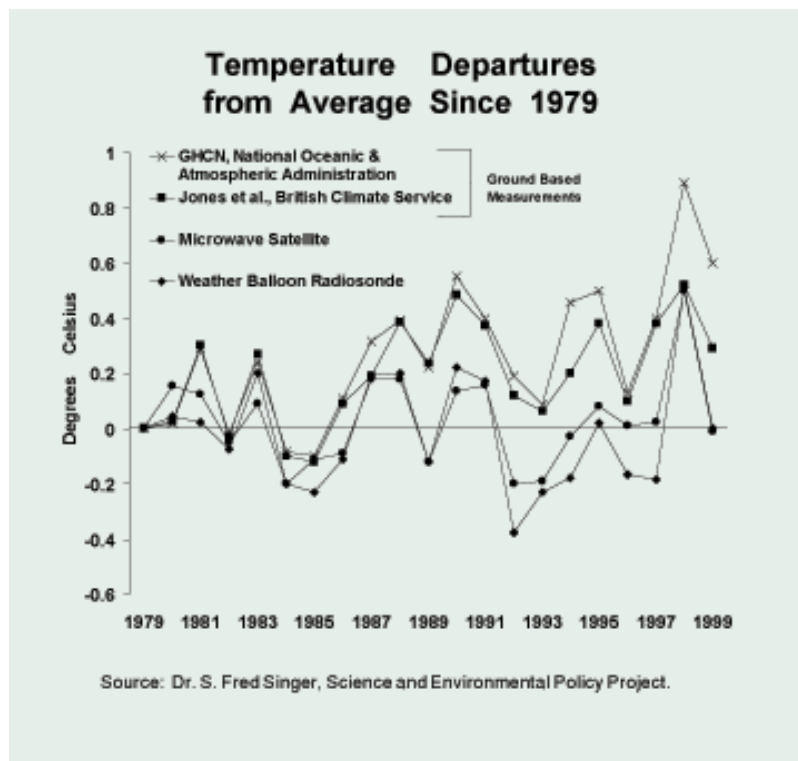


Рисунок 1.4 – Відхилення прогнозованої з допомогою GCM температури від середньої температури [65]

По-друге, найнижче прогнозоване вимірювання глобальної температури GCM майже втричі більше, ніж підвищення температури, виміряне наземними термометрами. Таким чином, GCM не відображають різниці температур або напрямку зміни температури в межах різних рівнів атмосфери, а також не відображають фактичну величину зміни температури [21].

Кліматичні моделі ігнорують взаємопов'язаний характер кліматичних процесів і те, як неточне моделювання одного вводить помилки в кожен інший пов'язаний процес. Проста модель опадів включає безліч змінних. Але одна помилка, скажімо, при поданні атмосферної вологи або при вирішенні питання про те, який механізм спричиняє опади, зробить моделювання "неправильним". Наприклад, для випадання опадів потрібна волога в атмосфері та механізм, що змушує її конденсуватися (тобто, змушуючи повітря підніматися над горами, поверхневим нагріванням, внаслідок погодних фронтів або циклонічного обертання). Будь-які помилки у поданні вмісту атмосферної вологи або механізмів, що спричиняють опади, призводять до помилкового моделювання.

Неточності в моделюванні опадів, у свою чергу, негативно вплинуть на моделювання практично всіх інших кліматичних змінних. Конденсація виділяє тепло в атмосферу і утворює хмари, які відображають енергію сонця і затримують тепло з земної поверхні - і обидва джерела тепла впливають на температуру повітря. Це, у свою чергу, впливає на вітри, атмосферний тиск та атмосферну циркуляцію [20].

Оскільки, корисність кліматичної моделі полягає не в прогнозуванні того, чи піде дощ на в певному місті певного дня, а в визначенні довгострокової ймовірності того, що майбутні опади будуть суттєво відрізнятися - за частотою та / або інтенсивністю від сучасних. Чи буде зима 2048 року теплішою чи холоднішою, вологішою або посушливішою за нинішні умови, і якщо так, то на скільки? Якщо кліматичні моделі не можуть імітувати процеси, які, як відомо, впливають на щоденні погодні моделі, наскільки можна вірити їхнім кліматичним прогнозам?

1.3 Методи прогнозування кліматичних змін за умови глобального потепління

Метод - це складний прийом, упорядкована сукупність простих прийомів, спрямованих на розробку прогнозу в цілому; шлях, спосіб досягнення мети, що виходить із знання найбільш загальних закономірностей.

Методи (методика) прогнозування - певне поєднання прийомів (способів) виконання прогностичних операцій, отримання і обробка інформації про майбутнє на основі однорідних методів розробки прогнозу.

Методологія прогнозування - область знання про методи, способи, системах прогнозування. Методології прогнозування розділилися за наступними категоріями: передбачення, цілепокладання, планування, програмування, проектування, перспективи розвитку процесів з метою виявлення проблем, що підлягають вирішенню.

Методика розробки прогнозу - вбрання конкретне поєднання прийомів і методів прогнозування.

Прогнозування - це процес побудова передбачення майбутнього на основі історичних даних, поточних даних (поточної ситуації) і на основі аналізу трендів. Ризик і невизначеність є центральними чинниками для прогнозування, тому відповідно до кращих практик, необхідно вказувати ступінь невизначеності по відношенню до прогнозів.

Коректний підхід до оцінки методу прогнозування включає кілька етапів. Слід виділити п'ять важливих етапів:

1. ретельне вивчення природи досліджуваного об'єкта або процесу для вибору адекватного методу прогнозування;
2. виділення двох груп серед доступних даних - для розробки прогнозів і для перевірки отриманих результатів;
3. уточнення вихідних даних з метою виявлення помилок;
4. розробка прогнозів і оцінка достовірності отриманих результатів;

5. використання (інтерпретація) отриманих результатів і виконання, при необхідності, уточнення і доповнення прогнозів.

Якісні методи прогнозування - суб'єктивні, засновані на думці і судженні споживачів, експертів. Якісні методи підходять тоді, коли відсутні історичні дані. Дані методи застосовуються, як правило, для середньострокових і довгострокових рішень. Прикладами якісних методів прогнозування є дослідження ринку, метод Делфі, історична аналогія життєвого циклу тощо [18].

Кількісні моделі прогнозування використовуються для прогнозування майбутніх даних у вигляді функції від історичних даних. Вони підходять для використання, коли історичні числові дані доступні і коли очікується збереження динаміки даних в майбутньому. Ці методи, як правило, застосовуються для короткострокового і середньострокового прогнозування. Прикладами кількісних методів прогнозування є: ковзаючі середні, експоненціальне згладжування, мультиплікативні сезонні індекси тощо.

Система прогнозування ("система, що прогнозує") - це впорядкована сукупність методик, технічних засобів, призначена для прогнозування складних явищ або процесів.

Прийом прогнозування - конкретна форма теоретичного або практичного підходу до розробки прогнозу; одна або кілька математичних або логічних операцій, спрямованих на отримання конкретного результату в процесі розробки прогнозу.

В даний час існує близько 220 методів прогнозування, але найчастіше на практиці використовуються не більше 10, серед них: фактографічні (екстраполяція, інтерполяція, тренд-аналіз), експертні (в тому числі опитування, анкетування), публікаційні (в тому числі патентні), цитатно-індексні, сценарні, матричні, моделювання, аналогій, побудова графів, тощо.

З'являються і нові методи:

1. адаптивні методи прогнозування - побудова самоналагоджувальних рекурентних моделей, здатних відображати змінювані в часі динамічні властивості часового ряду і враховувати інформаційну цінність його членів;
2. морфологічне дослідження (для систематичного і неупередженого відбору можливостей в зв'язку з вишукувальним прогнозуванням);
3. ретроальтернативістика;
4. метод "дерево цілей" для нормативного прогнозування і оцінки "загальних елементів";
5. "контекстуальне картографування";
6. причинно-наслідковий метод.

Комбінований прогноз - деяка узагальнююча оцінка, одержувана на основі формального або неформального об'єднання приватних прогнозів, найчастіше шляхом підсумовування їх з певними ваговими коефіцієнтами [18].

Наведений поділ способів прогнозування умовний, тому що на практиці ці способи взаємно перехрещуються і доповнюють один одного, так:

1. прогнозна оцінка обов'язково включає в себе елементи екстраполяції і моделювання;
2. процес екстраполяції неможливий без елементів оцінки та моделювання;
3. моделювання має на увазі попередню оцінку і екстраполіровання.

При прогнозуванні об'єкта часто доводиться прогнозувати не один, а кілька його показників. При цьому прогноз розвитку одного показника можна виконувати одним методом, а іншого показника - іншим методом, тобто використовуються поєднання методів.

Серед найбільш популярних методів для прогнозування кліматичних змін виділяють: лінійну регресію та наормальний розподіл.

Рідж-регресія або баєсова лінійна регресія - це один із методів зниження

розмірності. Часто її застосовують для боротьби із зайвими даними, коли незалежні змінні корелюють одна з одною. Результатом цього є погана обумовленість даних матриці і нестійкість оцінок коефіцієнтів регресії. Оцінки, наприклад, можуть мати неправильний знак або значення, які набагато перевершують ті, які прийнятні з фізичних або практичних міркувань [52].

Застосування гребньової регресії нерідко виправдовують тим, що це практичний прийом, за допомогою якого при бажанні можна отримати менше значення середнього квадрата помилки.

Метод варто використовувати, якщо:

1. сильна обумовленість;
2. сильно розрізняються власні значення або деякі з них близькі до нуля;
3. в матриці X є майже лінійно залежні стовпці.

Ротаційне оцінювання - метод оцінки аналітичної моделі і її поведінки на незалежних даних. При оцінці моделі наявні дані розбиваються на k частин. Потім на $k-1$ частинах даних проводиться навчання моделі, а частина, що залишилася використовується для тестування. Процедура повторюється k разів; в результаті кожна з k елементів даних використовується для тестування. В результаті виходить оцінка ефективності обраної моделі з найбільш рівномірним використанням наявних даних [52].

Нормальний розподіл, або гаусівський процес - це стохастичний процес (сукупність випадкових величин, індексованих деяким параметром, найчастіше часом або координатами), такий, що будь-який кінцевий набір цих випадкових величин має багатовимірний нормальний розподіл, тобто будь-яка кінцева лінійна комбінація з них нормально розподілена. Нормальний розподіл - це спільний розподіл всіх його випадкових величин і, в силу чого, є розподілом функцій з безперервною областю визначення. Якщо розглядати гаусівський процес як спосіб вирішення завдань машинного навчання, то використовується лінійне навчання і міра подібності між точками (функція ядра) для отримання прогнозу значення

невидимої точки з навчальної вибірки. У поняття прогнозу, крім самої оцінки точки, входить інформація про невизначеність - одновимірний гауссівський розподіл [52].

Для прогнозування по тимчасовому ряду зазвичай використовують комп'ютерні програми. Це дозволяє автоматизувати велику частину операцій при побудові прогнозу, а також дозволяє уникнути помилок, пов'язаних з введенням даних і побудовою моделей. Такі додатки можуть бути як локальними (для використання на одному комп'ютері), так і інтернет-додатками (доступними у вигляді веб-сайту, наприклад). Серед локальних програм слід виділити такі програми як: R, SPSS, Statistica, Forecast Pro, Forecast Expert.

Висновки до першого розділу. У ході дослідження теоретичних засад аналізу кліматичних змін, було встановлено, що процес аналізу повинен притримуватися чітко встановлених правил та складатися з таких етапів:

1. визначення цілі аналізу;
2. вибір або розробка даних, що чітко підходять під ціль аналізу;
3. застосування відповідних інструментів аналізу;
4. критична інтерпретація результатів аналізу.

Додатково було встановлено, що одним із найбільш вживаних засобів дослідження є композитний аналіз, який дозволяє проводити кліматичні дослідження шляхом використання середніх показників для подій.

Проведений аналіз розвитку засобів моделювання та дослідження кліматичних змін за останні 60 років показав що моделі розвивалися достатньо стрімко і в наступному порядку:

1. нульова та одновимірні моделі енергетичного балансу;
2. одновимірні та двовимірні радіаційно-конвективні моделі;
3. двовимірні статистично-динамічні моделі;
4. модель загальної циркуляції;
5. модель системи Земля проміжної складності.

Серед сучасних підходів до прогнозування виділяють такі найбільш поширені методи, як лінійна регресія, ротаційне оцінювання, гаусівський процес.

Неповнота даних – це одна із найбільших проблем в моделюванні клімату. Оскільки, прогалини в базовій статистиці є достатньо вагомими. Наявність серйозних невизначеностей, пов'язаних з неповнотою спостережень, розуміння фізичних процесів і численних зворотних зв'язків в кліматичній системі, надійністю кліматичних моделей, складністю виявлення малого антропогенного сигналу на тлі природної кліматичної мінливості, не дозволяє зробити однозначних висновків про внесок антропогенних викидів парникових газів в спостережуване потепління.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

2.1 Характеристика кліматичних та антропогенних даних для аналізу

Транспорт становить майже чверть викидів парникових газів у світі і є основною причиною забруднення повітря в містах. Транспортний сектор не показує такого ж поступового зменшення викидів, як інші галузі: викиди почали зменшуватися лише в 2007 році і все ще залишаються вищими, ніж у 1990 році (див. Рис. 2.1). У транспортному секторі на автомобільний транспорт припадає понад 70% усіх викидів парникових газів від транспорту в 2019 році (див. Рис. 2.2).

World CO₂ emissions

Figure 1. CO₂ emissions by sector

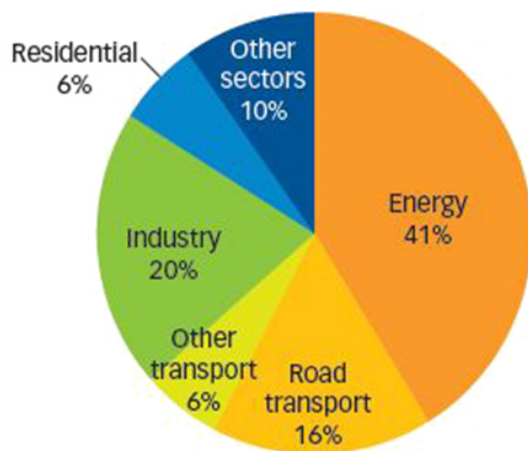


Figure 2. Energy-related CO₂ emissions by country

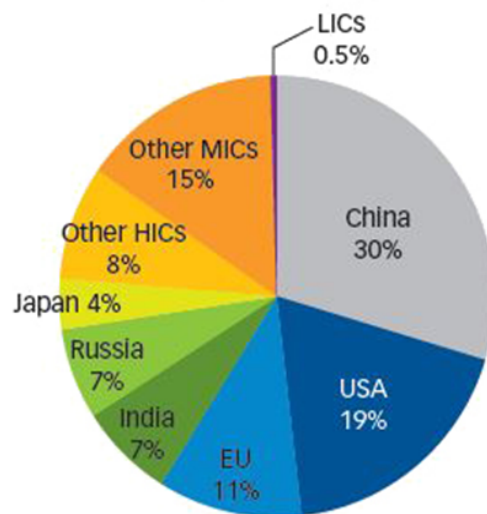


Рисунок 2.1 – Порівняльний графік викидів парникових газів за секторами

[62]

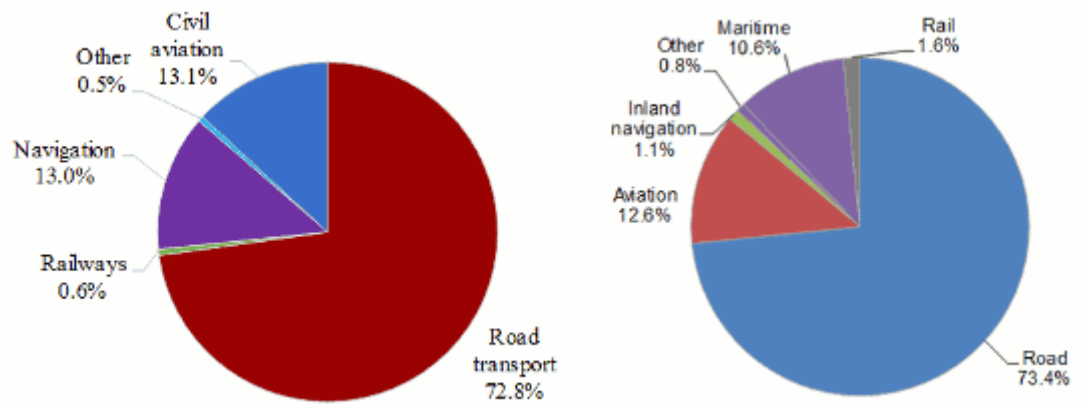


Рисунок 2.2 – Викиди парникових газів від транспорту за видами транспорту в 2019 році [66]

Дані, що використовуються для дослідження були взяті із сайту CO₂ Human Emissions [10].

За період 2002–2019 роки у транспортному секторі світу відбулося значне збільшення викидів CO₂. Викиди CO₂ і темпи приросту в транспортному секторі проілюстровані на рисунку 2.3. Викиди CO₂ зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році.

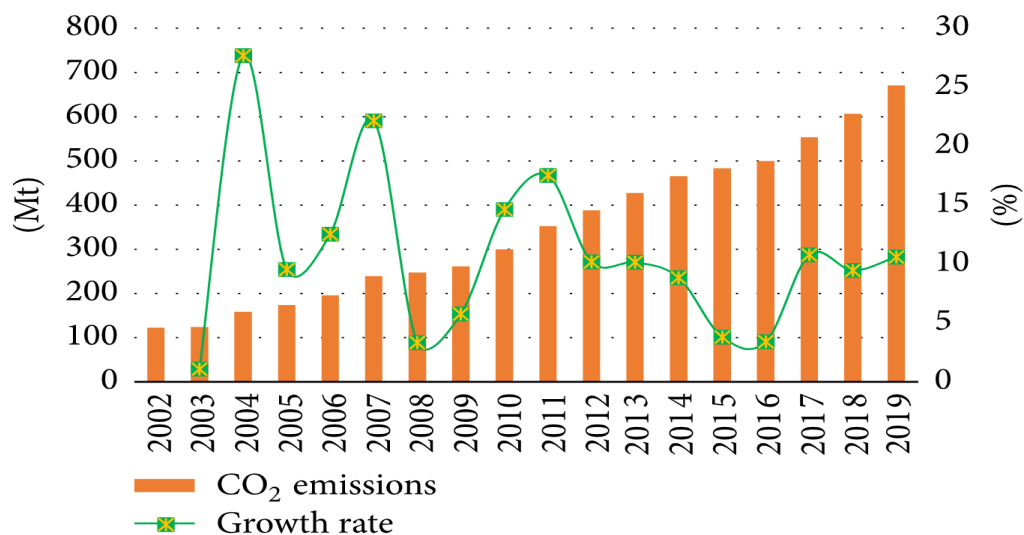


Рисунок 2.3 – Тенденції викидів CO₂ та темпи зростання транспортного сектору

Хоч викиди CO₂ постійно зростали, темпи його зростання суттєво коливалися протягом досліджуваного періоду. Зокрема, з 2002 по 2012 роки діапазон коливань перевищив 10%. З початку 2012 року, під впливом стабільного національного економічного зростання, енергозбереження та політики скорочення викидів, середньорічний темп приросту викидів CO₂ протягом 2012–2014 років залишається приблизно 10% [57].

На рисунку 2.4 показано річні викиди CO₂ за видами енергії в транспортному секторі. Очевидно, що основна частка викидів в розрізі видів енергії в основному припадає на дизель та бензин, що становлять 49,51% та 16,36% відповідно від загальної кількості у 2019 році, відповідно. З 2002 по 2019 рік викиди CO₂ від дизельного палива та бензину зросли на 760,59% та 282,11% відповідно [58]. Частка викидів CO₂ від дизеля в загальному зросла з 31,33% до 49,51%, тоді як частка викидів CO₂ від бензину зменшилася з 23,33% до 16,37%. Очевидно, що зростання дизельного палива є головним фактором зростання споживання енергії та викидів CO₂. Крім того, викиди CO₂ від мазуту, гасу, електроенергії та природного газу швидко зростали, але їх частка залишалася приблизно незмінною.

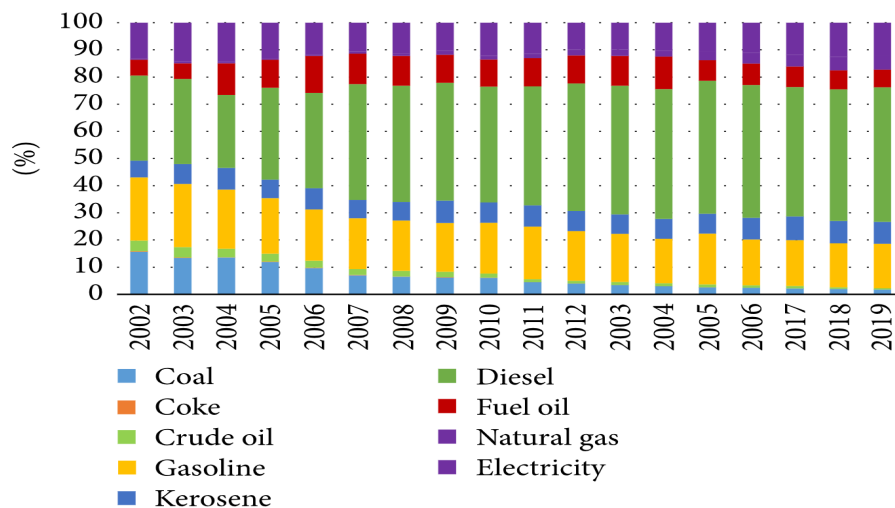


Рисунок 2.4 – Викиди CO₂ за видами палива в транспортному секторі

Зміна річних викидів CO₂ від різних видів транспорту протягом 2002–2019 років показана на рисунку 2.5 [59]. Автомобільні перевезення складають переважну більшість перевезень на середні короткі відстані, що призводить до великої кількості споживання енергії та викидів CO₂. Що стосується як абсолютної кількості, так і відносної частки, автомобільні перевезення є найбільш швидкозростаючими джерелами викидів CO₂. Нарощування пасажирокілометрів та вантажних тонн-кілометрів є безпосередньою причиною збільшення викидів CO₂ у транспортному секторі. За досліджуваний період пасажиро-людино-кілометри та вантажні тонни-кілометри у секторі автомобільного транспорту зросли відповідно у 5,43 та 16,01 разів. Разом із зростанням транспортних послуг споживання енергії та викиди CO₂ також різко зросли. Викиди CO₂ зросли з 30,96 млн. тонн у 2002 році до 387,57 млн. тонн у 2019 році, збільшившись у 11,52 рази, а відповідна частка зросла з 25,14% до 55,03%.

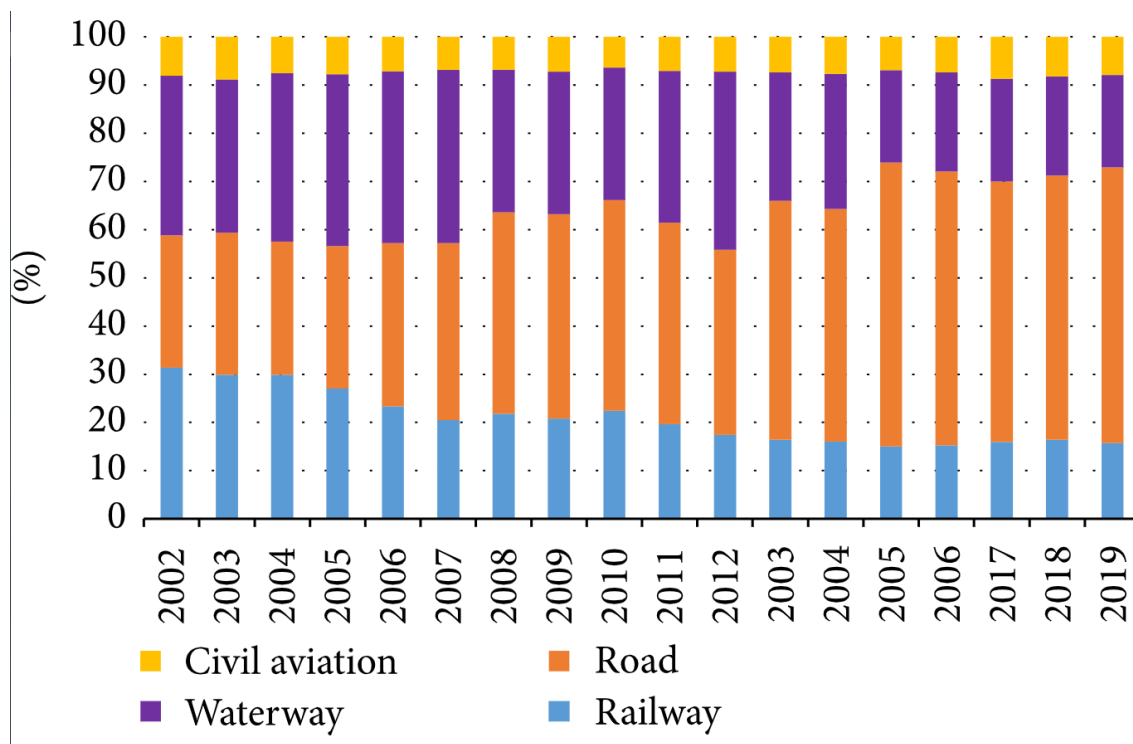


Рисунок 2.5 – Викиди CO₂ в транспортному секторі по типу транспорту

Для оцінки впливу шести факторів впливу на викиди CO₂ у транспортному секторі досліджуваний період ділиться на чотири часові інтервали. У цьому дослідженні застосовувався метод LMDI. Результати поділу за часовими інтервалами представлені на малюнку 2.6, а вплив відповідного компонента на рисунку 2.7.

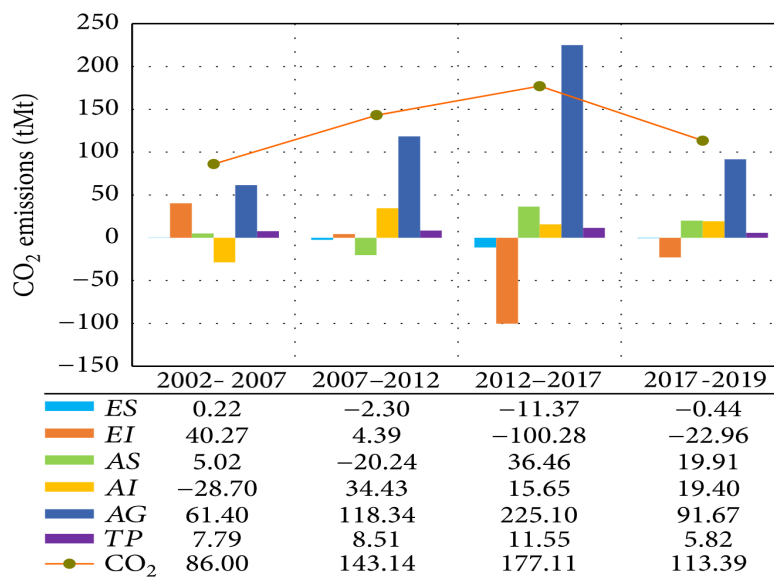


Рисунок 2.6 – Розподіл викидів CO₂

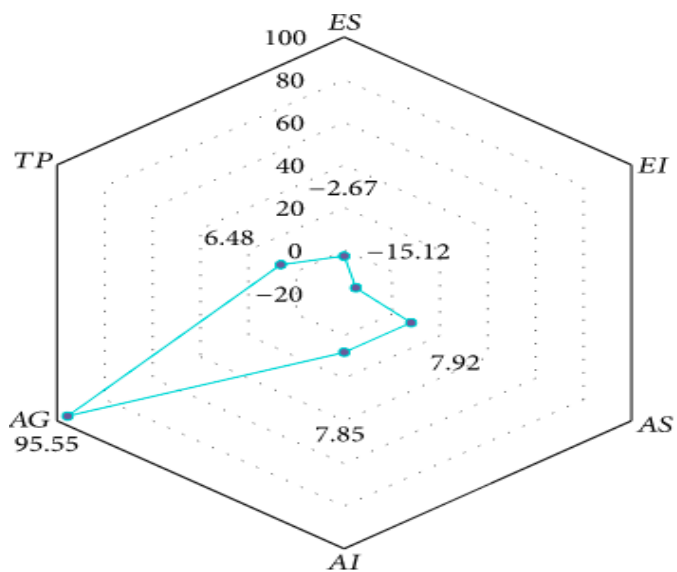


Рисунок 2.7 – Вплив окремого компонента на вміст CO₂

На даний момент зробити оцінку потенціалу пом'якшення наслідків транспортного сектору є доволі складною задачею. Оскільки, прогалини в базовій статистиці щодо витрат та енергоспоживання вантажного транспорту є достатньо вагомими, особливо в країнах, що розвиваються.

Основні проблеми, що не дозволяють коректно зібрати дані та спрогнозувати викиди автомобільного транспорту:

1. оскільки дані, що стосуються вантажних логістичних систем та їх впливу на економіку, є неповними, як і дані про наслідки майбутньої декарбонізації та наслідки зміни клімату на світову торгівлю. Отже, важко розробити нову політику вантажних перевезень з низьким рівнем вуглецю;
2. витрати на майбутні технологічні розробки та батареї, паливні елементи, конструкції транспортних засобів є невизначеними.
3. вимоги до інфраструктури для нових низьковуглецевих транспортних палив недостатньо зрозумілі;
4. вартість компонентів для нових силових агрегатів автомобіля не може бути достовірно визначена, оскільки темпи навчання, зниження вартості та пов'язані з ними наслідки невідомі;
5. оцінки пом'якшувальних викидів парникових газів, глобальний потенціал та пов'язані із цим витрати суперечливі;
6. ціни на нафтопродукти сильно коливаються, як і ціни на альтернативне транспортне паливо, що призводить до значних розбіжностей в припущеннях щодо моделювання сценаріїв;
7. розуміння того, як будуть розвиватися низьковуглецеві транспортні та енергетичні технології (за допомогою кривих досвіду та інноваційних процесів), недостатньо розвинене. Більшість транспортних засобів покладаються на накопичену енергію, тому існує необхідність краще розуміти вартість та щільність енергії неуглеводневих середовищ

зберігання енергії, таких як акумулятори, суперконденсатори;

8. швидкість соціального сприйняття таких інноваційних концепцій, як індукційна зарядка електромобілів та автомобілів без водіїв важко передбачити, як і необхідний рівень відповідних інвестицій в інфраструктуру.

2.2. Оцінка існуючих моделей прогнозування глобального потепління

За останні кілька десятиліть було складено багато різних наборів кліматичних прогнозів. Перші прогнози часових рядів майбутніх температур були розраховані за допомогою простих моделей енергетичного балансу на початку 1970-х років, більшість з яких були обмежені виключно прогнозованими зовнішніми часовими рядами (спочатку концентраціями v) та оцінкою рівноважної чутливості до клімату з допомогою моделі випромінювально-конвективної рівноваги або моделі загальної циркуляції. З тих пір прості моделі енергетичного балансу поступово відходять на задній план на користь моделей із високою роздільною здатністю та моделей загальної циркуляції, які вперше були опубліковані наприкінці 1980-х.

Оцінка модельних проєкцій на основі спостережень після розробки моделі забезпечує перевірку навичок моделі, і успішні прогнози можуть конкретно додати впевненості у процесі складання прогнозів на майбутнє [6]. Однак оцінка майбутньої продуктивності проєкції вимагає достатнього періоду часу після публікації, щоб відрізнити екстремуми присутні у модельних проєкціях від природної мінливості.

Два фактори впливають на довгострокову ефективність модельних проєкцій:

1. точність фізики моделі, включаючи чутливість клімату до зовнішніх впливів та роздільну здатність або параметризацію різних фізичних процесів, таких як поглинання тепла глибоким океаном;
2. точність прогнозованих змін, внаслідок дії парникових газів та аерозолів.

Хоча кліматичні моделі слід оцінювати на основі точності формулювань

фізики моделей, не можна очікувати від моделей клімату точного проектування майбутніх викидів та пов'язаних із ними змін, які залежать від поведінки людей, технологічних змін, економічного зростання та зростання населення.

Кліматичні моделі часто обходять завдання детермінованого прогнозування майбутніх викидів, натомість проектуючи цілий ряд можливих траєкторій, включаючи гранично вірогідні.

Репрезентативні шляхи концентрації (RCP), що використовуються у СМІР5 та звіті IPCC AR5, аналогічним чином включають низку правдоподібних сценаріїв, укладених у крайній сценарій RCP2.6 з низьким рівнем викидів та екстремальний сценарій RCP8.5. Таким чином, оцінка результатів проєкції моделі повинна зосереджуватися на взаємозв'язку між змінами в моделі та зміною температури, а не просто оцінювати, наскільки добре прогнозовані температури порівнюються із спостереженнями, особливо у випадках, коли прогнозовані зміни суттєво відрізняються від нашої найкращої оцінки подальших спостережень .

Цей підхід – порівняння взаємозв'язку між температурами як в модельних проєкціях, так і в спостереженнях – може ефективно оцінити ефективність фізики моделі, одночасно враховуючи потенційні невідповідності прогнозованих змін, які кліматичні моделі не вирішували в той час [16]. Для оцінки застосовуватимемо як звичайну оцінку зміни температури в часі, так і нову оцінку реакції температури на зміну, що змушує оцінювати ефективність майбутніх прогнозів за минулими кліматичними моделями порівняно з спостереженнями.

Для аналізу було порівняно спостереження з прогнозами кліматичної моделі протягом періоду прогнозування моделі, використовуючи два підходи:

1. зміна температури в залежності від часу;
2. зміна температури в порівнянні зі зміною випромінювання («мається на увазі TCR»).

Пряме порівняння прогнозованої та спостережуваної зміни температури протягом періоду проєкції кожної історичної моделі може забезпечити ефективний

тест на навички моделі. Приблизно в 9 із 17 досліджених модельних проєкціях прогнозовані зміни виявилися достовірними. Однак решта вісім моделей – RS71, H81 Сценарій 1, H88 Сценарії А, В і С, FAR, MS93 і TAR – прогнозували зміни значно сильніші або слабші, ніж ті, які спостерігалися насправді (див. Рис. 2.8). Для останніх аналіз порівняння передбачуваного TCR між моделями та спостереженнями може забезпечити більш точну оцінку роботи моделі. Порівняння між кліматичними моделями та спостереженнями за періоди проєкції моделей наведено на рисунку 2.9 як для температури, так і для часу та передбачуваних показників TCR. Загалом, більшість розглянутих модельних прогнозів відповідали спостереженням за обома показниками. Використовуючи метрику температури та часу, 10 з 17 модельних прогнозів показують результати, що відповідають спостереженням. З решти семи модельних проєкцій чотири проєктують значніше потепління, ніж спостерігалось – N77, ST81 і H88 (сценарії А і В), тоді як три проєктують менше потепління, ніж спостерігалось – RS71, H81 (сценарій 2а) і H88 (сценарій С).

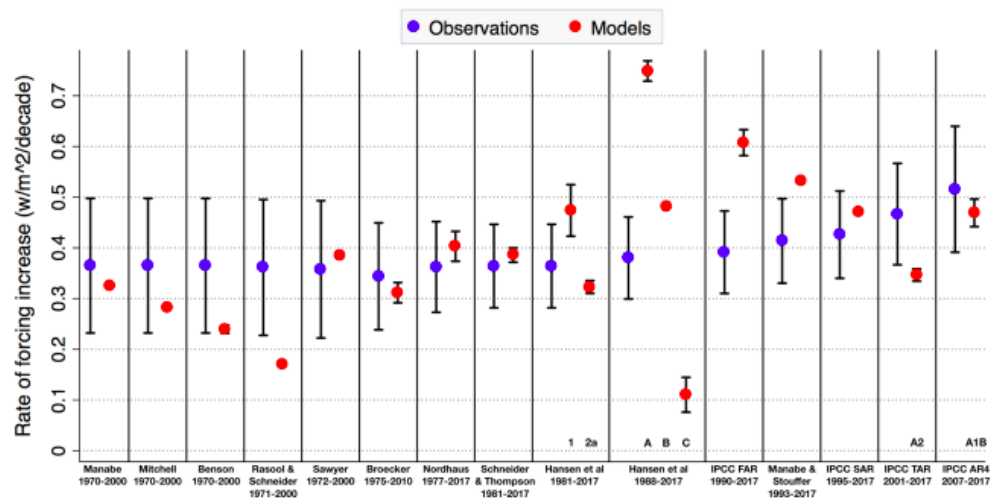


Рисунок 2.8 – Швидкість зростання (у ватах на квадратний метр за десятиліття) у моделях та спостереженнях за періоди прогнозування моделі

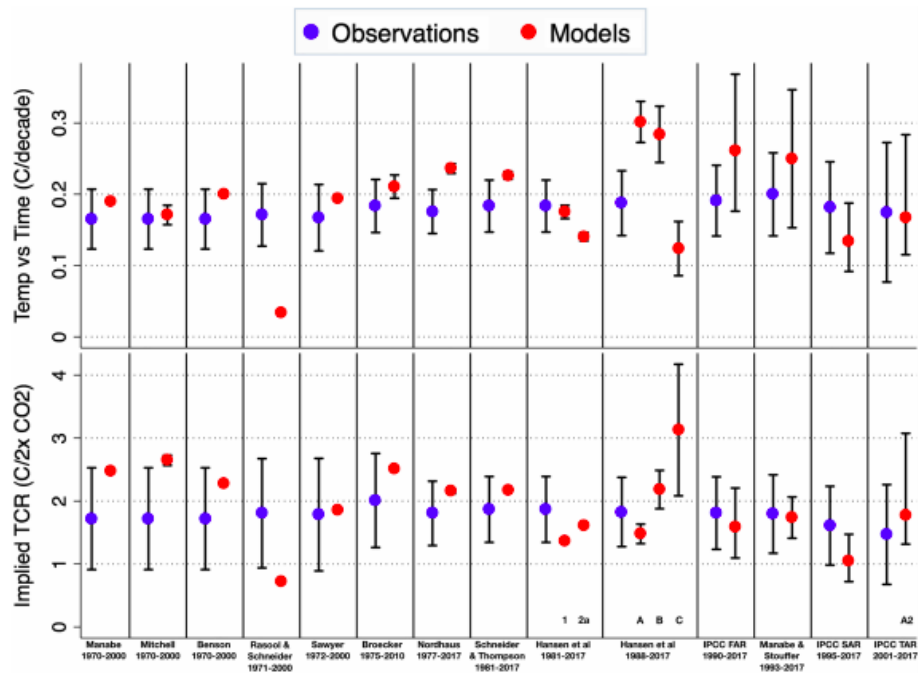


Рисунок 2.9 – Порівняння тенденцій температури та часу (верхня панель) та передбачуваного TCR (нижня панель) між спостереженнями та моделями за періоди проєкції моделі, що відображаються внизу

Коли враховуються невідповідності між прогнозованими та спостережуваними примусами, видно кращі показники. Використовуючи передбачувану метрику TCR, 14 із 17 модельних прогнозів відповідали спостереженням; з трьох, які не були, Mi70 та H88 (Сценарій C) показали вищий передбачуваний TCR, ніж спостереження, тоді як RS71 показав нижчий передбачуваний TCR.

Ряд модельних проєкцій не відповідав спостереженням на основі температури та часу. Наприклад, хоча N77 і ST81 прогнозували більше потепління, ніж спостерігалось, мається на увазі, що не TCR відповідає спостереженням. Подібним чином, хоча сценарій H81 2a проєктує менше потепління, ніж спостерігалось, його передбачуваний TCR узгоджується із спостереженнями.

Ряд моделей 1970-х років (Ma70, Mi70, B70, B75 та N77) демонструють TCR

на найвищому рівні спостережних ансамблів. Ймовірно, це пов'язано з їх припущенням, що атмосфера миттєво врівноважується із зовнішніми змінами, що опускає роль тимчасового поглинання теплоти океану.

Однак, незважаючи на високий TCR, ряд моделей (наприклад, Ma70, Mi70, B70 та B75) все ще забезпечують прогнози температури відповідно до спостережень, оскільки знаходились у нижньому кінці спостережень через відсутність будь-яких речовин, що не спричиняють CO₂, у їх прогнозах [15].

В принципі, одна і та ж основна модель повинна показувати несуперечливі результати для вкрай різних сценаріїв за передбаченою метрикою TCR. Однак невідповідність сценарію C H88 є ілюстрацією обмежень передбачуваної метрики TCR, коли результати моделей різко відрізняються від спостережень, оскільки сценарій C має приблизно постійні екстремуми після 2000 року. Модель H88 дає корисну ілюстрацію корисності підходу, який може враховувати невідповідність між модельованими та спостережуваними примусами.

H88 нещодавня тридцята річниця Конгресу у 2018 році зосередила значну увагу на точності прогнозу. «Найбільш правдоподібний» сценарій H88 завищив оцінку потепління після публікації приблизно на 54% [51]. Однак велика частина цієї невідповідності була пов'язана із завищенням оцінок майбутніх зовнішніх змін —особливо від CH₄ та галогенуглеводнів. Коли сценарій B88 оцінюється на основі залежності між прогнозованими температурами та прогнозованими змінами, результати узгоджуються із спостереженнями. Наведені медіанні оцінки та невизначеності оцінки кваліфікації як для температури, так і для часу та передбачуваних показників TCR. Оцінка навичок представляє ідеальне узгодження між проекцією моделі та спостереженнями, тоді як оцінка кваліфікації менше 0 — гірша ефективність, ніж відсутність змін проекція нульової гіпотези.

Середнє значення медіанних показників кваліфікації для всіх оцінених проєкцій моделі становить 0,69 для метрики температури та часу. Лише у трьох проєкціях (RS71, H88 Сценарій А та H88 Сценарій В) оцінки навичок були нижче

0,5, тоді як H81 Сценарій 1 мав найвищий показник кваліфікації серед будь-якої моделі —0,93. Використовуючи передбачувану метрику TCR, середня кваліфікація проєкції моделей також становила 0,69.

Моделі з прихованими показниками TCR нижче 0,5 включають Mi70, RS71 та H88 Scenario C, тоді як MS93 мають найвищий показник кваліфікації —0,87. H88 Сценарії A і B та IPAR FAR показали суттєво кращі результати за передбачуваною метрикою TCR, що відображає роль неправильно визначених майбутніх змін у їх прогнозах щодо високих температур. Важливо зазначити, що невизначеність оцінки кваліфікації для дуже коротких майбутніх періодів прогнозування —як у випадку з TAR та AR4 —досить велика, і до них слід ставитись обережно через поєднання короткочасної мінливості температури та невизначеності в змінах. Ряд модельних проєкцій мали передбачали зміни, які погано відповідали оцінкам спостережень через виключення речовин, що не викликають CO₂ [39]. Однак усі моделі включали прогнозовані майбутні концентрації CO₂, забезпечуючи загальну метрику для порівняння. Більшість історичних прогнозів кліматичної моделі завищували майбутні концентрації CO₂, деякі на 40 ppm порівняно з нинішніми рівнями, при цьому прогнозовані концентрації CO₂ зростали вдвічі швидше, ніж було фактично.

З прогнозів кліматичної моделі 1970-х років лише Mi70 прогнозував зростання атмосферного CO₂ відповідно до спостережень. Багато прогнозів 1980-х років так само завищували CO₂, лише прогнози Hansen 88 за сценаріями A та B наближались до спостережуваних концентрацій. Перші три оцінки IPCC включали прогнози, засновані на простих моделях енергетичного балансу, налаштованих на загальні результати моделі циркуляції, оскільки на той час було доступно відносно мало окремих моделей. Починаючи з AR4, прогнози значення медіанних показників кваліфікації для всіх оцінених проєкцій моделі становить 0,69 для метрики температури та часу. Лише у трьох проєкціях (RS71, H88 Сценарій A та H88 Сценарій B) оцінки кваліфікації були нижче 0,5, тоді як H81 Сценарій 1 мав найвищий показник кваліфікації серед будь-якої моделі —0,93. Використовуючи

передбачувану метрику TCR, середня майстерність проєкції моделей також становила 0,69.

Моделі з прихованими показниками TCR нижче 0,5 включають Mi70, RS71 та H88 Scenario C, тоді як MS93 мали найвищий показник кваліфікації $-0,87$. H88 Сценарії A і B та IPAR FAR показали суттєво кращі результати за передбачуваною метрикою TCR, що відображає неправильно визначені майбутні зміни у їх прогнозах щодо високих температур. Однак усі моделі включали прогнозовані майбутні концентрації CO₂, забезпечуючи загальну метрику для порівняння, і це показано на рисунку 2.9. Більшість історичних прогнозів кліматичної моделі завищували майбутні концентрації CO₂, деякі на 40 ppm порівняно з нинішніми рівнями, при цьому прогнозовані концентрації CO₂ зростали вдвічі швидше, ніж було фактично.

З прогнозів кліматичної моделі 1970-х років лише Mi70 прогнозував зростання атмосферного CO₂ відповідно до спостережень. Багато прогнозів 1980-х рр. Так само завищували CO₂, лише прогнози Hansen 88 за сценаріями A та B наближались до спостережуваних концентрацій. Перші три оцінки IPCC включали прогнози, засновані на простих моделях енергетичного балансу, налаштованих на загальні результати моделі циркуляції, оскільки на той час було доступно відносно мало окремих моделей. Починаючи з AR4, прогнози IPCC базувались на мультимодельному середньому та розподілі моделі [2].

Загалом, попередні прогнози кліматичної моделі, оцінені в цьому аналізі, вдало прогнозувати подальше потепління у роки після публікації. Хоча деякі моделі демонстрували занадто значне потепління, а деякі $-$ занадто низьке, більшість досліджених моделей показали потепління, що відповідає спостереженням, особливо коли враховувалися невідповідності між прогнозованими та спостережуваними оцінками. Не має доказів того, що кліматичні моделі, що оцінюються в цій роботі, систематично завищували або занижували потепління протягом періоду прогнозування. Проєкційна майстерність моделей 1970-х років

особливо вражає з огляду на обмежені спостережувані дані про потепління на той час, оскільки, як вважалося, світ охолоджувався протягом останніх кількох десятиліть.

Ряд резонансних модельних проєкцій —сценарії H88 A і B та, зокрема, IPAR FAR —зазнали критики за прогнозування вищих темпів потепління, ніж спостерігалось. Однак ці відмінності значною мірою зумовлені невідповідністю прогнозованих та спостережуваних змін. В моделях H88 A та B на 97% та 27% швидше, ніж середня оцінка спостережень, а в FAR зросли на 55% швидше. На підставі неявного TCR, усі три прогнози мають високі показники навичок моделі та узгоджуються із спостереженнями.

Хоча кліматичні моделі суттєво ускладнилися, ніж ранні моделі, розглянуті тут, вміння, яке продемонстрували ранні моделі при успішному проектуванні майбутнього потепління, свідчить про те, що кліматичні моделі ефективно фіксують процеси, що рухають багатодесятилітню еволюцію GMST [1]. Хоча відносна простота аналізованих тут моделей робить їх кліматичні прогнози оперативно застарілими, вони можуть бути корисними інструментами для перевірки або фальсифікації методів, що використовуються для оцінки найсучасніших кліматичних моделей. У міру того, як прогнози кліматичної моделі продовжують розвиватися, та через природну мінливість, швидше за все, з'являтиметься більше причин, що дозволять провести ретроспективну оцінку інших аспектів прогнозів кліматичної моделі.

2.3 Тенденції глобального потепління за існуючими моделями на наступні 50 років

Існує багато різних кліматичних моделей, і різні моделі роблять різні прогнози щодо майбутнього. Причина полягає в тому, що жодна модель не може повною мірою представити весь складний процес та зворотній зв'язок, задіяні в системі Землі. Через цю невизначеність ми повинні розглядати їх усі як можливі. Також існує реалістична можливість того, що всі моделі виявляються помилковими.

Можливо, кліматичні зміни внаслідок додавання парникових газів будуть менш серйозними, ніж передбачали моделі, або, можливо, кліматичні зміни будуть більш серйозними, ніж передбачають сучасні моделі [27].

Хоча більшість кліматичних моделей здатні відтворити потепління в середній глобальній температурі поверхні, яка вимірюється з 1860 року, жодна модель не може правильно визначити просторові закономірності температурних змін. Іншими словами, спостережувані зміни клімату в масштабах регіональних кліматичних поясів не відтворені жодною кліматичною моделлю.

IPCC оприлюднила низку звітів, до складу яких входить П'ятий звіт (AR5) щодо зміни клімату. Як повідомляється у звіті IPCC, різні модельні дослідження припускають, що подвоєння атмосферного вуглекислого газу від його доіндустріального значення з 280 ppm до 560 ppm або його еквівалента швидше за все, збільшить середні глобальні температури від 1,5 до 4,5 °C, із середнім значенням 3 °C. Також надзвичайно мало ймовірно, що підвищення температури буде менше 1 °C і дуже мало ймовірно більше 6 °C.

Згідно з звітом, ймовірність складає > 66%, надзвичайно мало ймовірно - < 5%, і дуже мало ймовірно - < 10%. Розрахунок зворотного зв'язку для підвищення середньої глобальної температури після того, як діоксид вуглецю подвоївся з 280 ppm до 560 ppm, становить 1 °C. Це означає, що більшість кліматичних моделей, що використовувались для підготовки звіту IPCC, вказують на зростання викидів вуглекислого газу (парникових газів), тобто найбільш вірогідним результатом (із кліматичних моделей) є те, що якщо CO₂ подвоїться, середня глобальна температура зросте на 3 °C [8].

У П'ятому звіті IPCC зазначено, що середня глобальна зміна температури за період 2016—2035 років щодо періоду 1986—2005 років, ймовірно, буде в діапазоні від 0,3 °C до 0,7 °C. Моделі прогнозують середній темп потепління 0,17 °C на десятиліття протягом цього періоду.

Натомість, у Четвертому звіті IPCC за 2007 рік зазначено, що навіть якщо

концентрація всіх парникових газів постійно підтримуватиметься на рівні 2000 року, до 2016 —2035 років все-таки очікується подальше потепління принаймні 0,1 °С. Тому навіть найоптимістичніший варіант розвитку передбачає потепління, навіть якщо ми зменшимо (або усунемо) викиди парникових газів.

Якщо прогнози кліматичних моделей звіту П'ятого звіту ІРСС є вірними, то кожен рік, коли зростає CO₂, означає збільшення середнього рівня температури в майбутньому, який неможливо легко знизити або змінити без видалення великої кількості CO₂ з атмосфери [4].

Великою проблемою при прогнозуванні довгострокових змін клімату в майбутньому є невизначеність щодо майбутніх викидів парникових газів. Невизначеність охоплює суттєві невідомі щодо зростання населення та економічного зростання, технологічного розвитку та транспорту, а також політичних та соціальних змін [70]. ІРСС вирішує цю проблему шляхом запуску моделей у широкому діапазоні майбутніх сценаріїв викидів, які називаються репрезентативними шляхами концентрації (RCP), як показано на рисунку 2.10 нижче.

RCP8.5 —це прогноз, в випадку, коли CO₂ продовжує швидко зростати, до 2100 року досягнувши 940 ppm.

RCP6.0 —це прогноз, який передбачає нижчі викиди, досягнуті застосуванням деяких стратегій та технологій пом'якшення наслідків. Концентрація CO₂ зростає менш швидко (ніж в RCP8.5), але до 2100 року все ще досягає 660 ppm.

У RCP4.5 концентрація CO₂ трохи перевищує концентрацію RCP6.0 до середини століття, але пік викидів спостерігається раніше (близько 2040 року), а концентрація CO₂ досягає 540 ppm до 2100 року [5].

RCP2.6 —найамбітніший сценарій пом'якшення наслідків, пік якого досяг піку на початку століття (близько 2020 року), а потім швидко зменшується. Такий сценарій вимагав би ранньої участі всіх країн, включаючи країни, що розвиваються, а також застосування технологій для активного видалення вуглекислого газу з

атмосфери. Концентрація CO₂ досягає 440 ppm до 2040 року, а потім повільно знижується до 420 ppm до 2100 року.

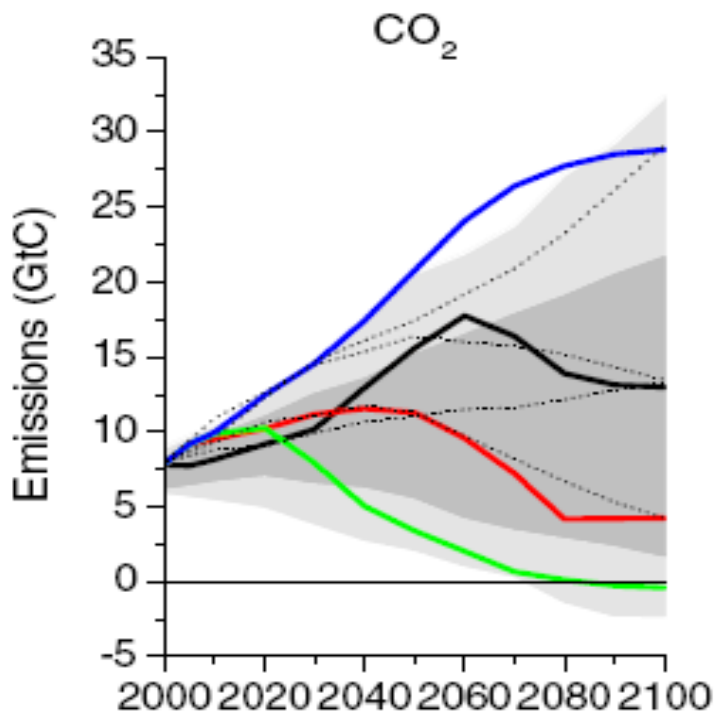


Рисунок 2.10 – Прогнозовані викиди CO₂ на основі чотирьох різних сценаріїв викидів, перевірених IPCC до 2100 року

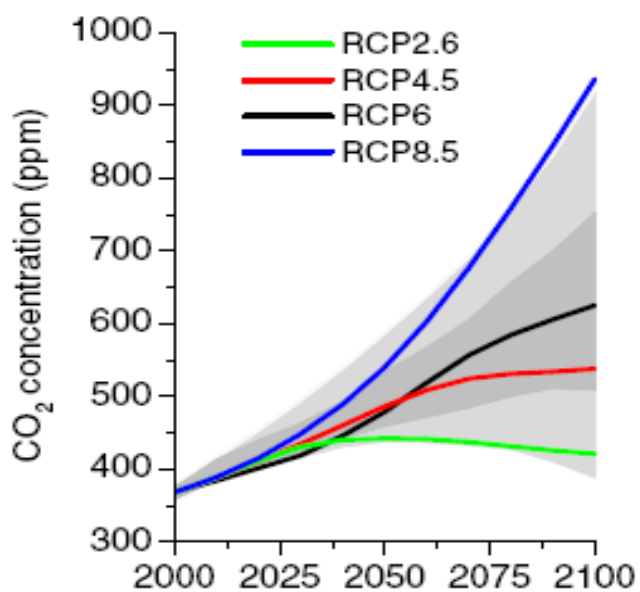


Рисунок 2.11 – Середній графік показує очікувану атмосферну

концентрацію CO₂ для чотирьох RCP

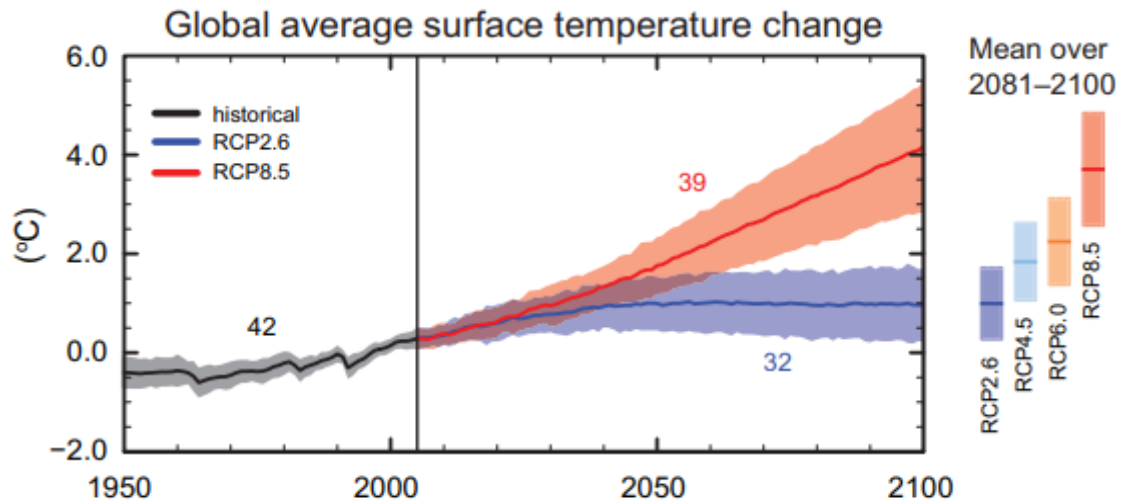


Рисунок 2.12 – Середня температура поверхні Землі спрогнозована моделями СМІР5 для кожного з RCP

Виходячи з наведених вище рисунків, ІРСС прогнозує потепління на 0,3 —4,8 °С (0,5 —8,6 °F) середньої глобальної температури за останні два десятиліття цього століття (2081 —2100 роки) відносно середньої температури за 1985 —2005 роки. Ця оцінка базується на останніх дослідженнях, які вважаються найкращими глобальними кліматичними моделями, та широкому діапазоні оцінок майбутніх викидів парникових газів. Найбільшою причиною великого діапазону передбачуваних змін температури є велика невизначеність у майбутніх викидах.

Нижче наведено рисунок 2.13, взятий із звіту ІРСС - Підсумковий звіт про зміну клімату з 2019 року [69]. Горизонтальна вісь —це сукупні викиди CO₂ з 1870 року в одиницях гігатонн (мільярди тонн). Вертикальна вісь —це змодельована зміна температури щодо середньої температури за 1861 – 1880 роки [35]. Рожево-затінена область показує майже лінійну залежність між величиною потепління, передбаченою моделями СМІР5, та загальними викидами CO₂. Чорний овал вказує на сукупні викиди до 2005 року (близько 1800 гігатонн) і відповідне спостережуване підвищення температури приблизно на 0,8 °С вище середнього

показника з 1861 по 1880 рік. Цей овал добре вписується в рожевий діапазон прогнозів моделей. Решта овалів демонструють найбільш вірогідні відповідні діапазони загальних майбутніх викидів CO₂ та температурних змін на основі моделей СМІР5. Цей малюнок показує, що прогнози кліматичної моделі щодо майбутніх змін температури чутливі до загальної суми загальних викидів парникових газів і температура буде продовжувати зростати майже лінійно із накопиченими викидами.

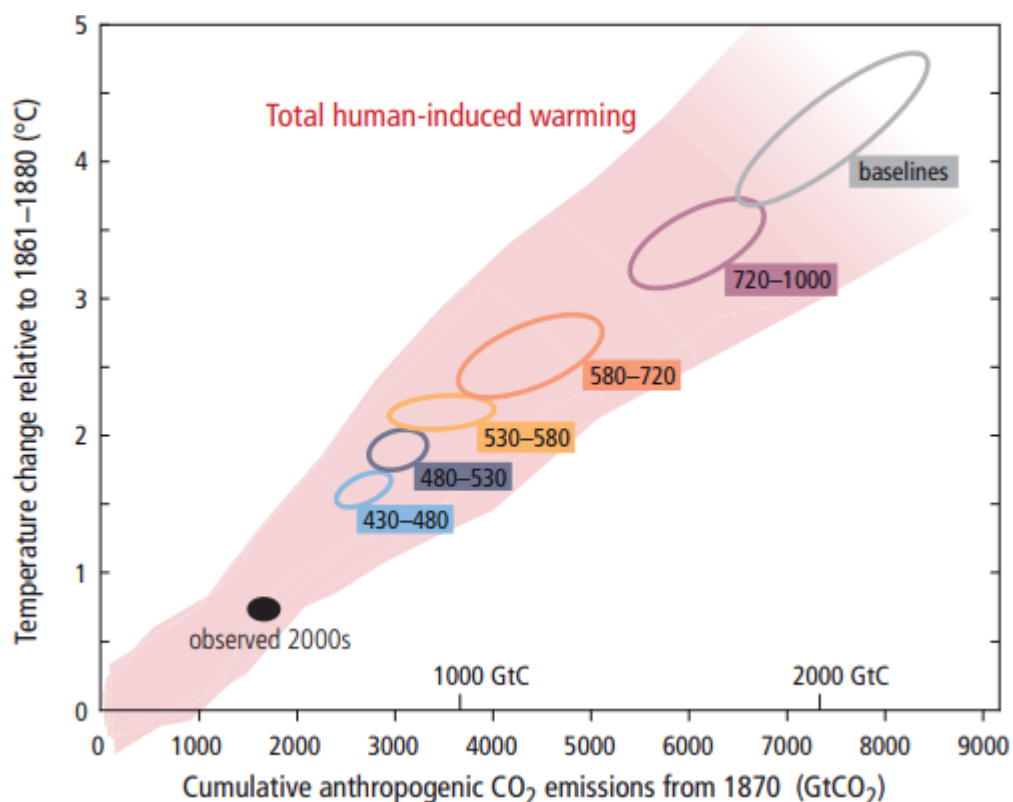


Рисунок 2.13 – Концентрація CO₂ в атмосфері з 1870 року

Щодо рівня моря, то за прогнозами RCP2.6 в 2081-2100 роках він підніметься до 26 – 55 см. А за прогнозами RCP8.5 в 2100 очікуваний рівень зросте ще до 52 – 98 см (див. рис. 2.14).

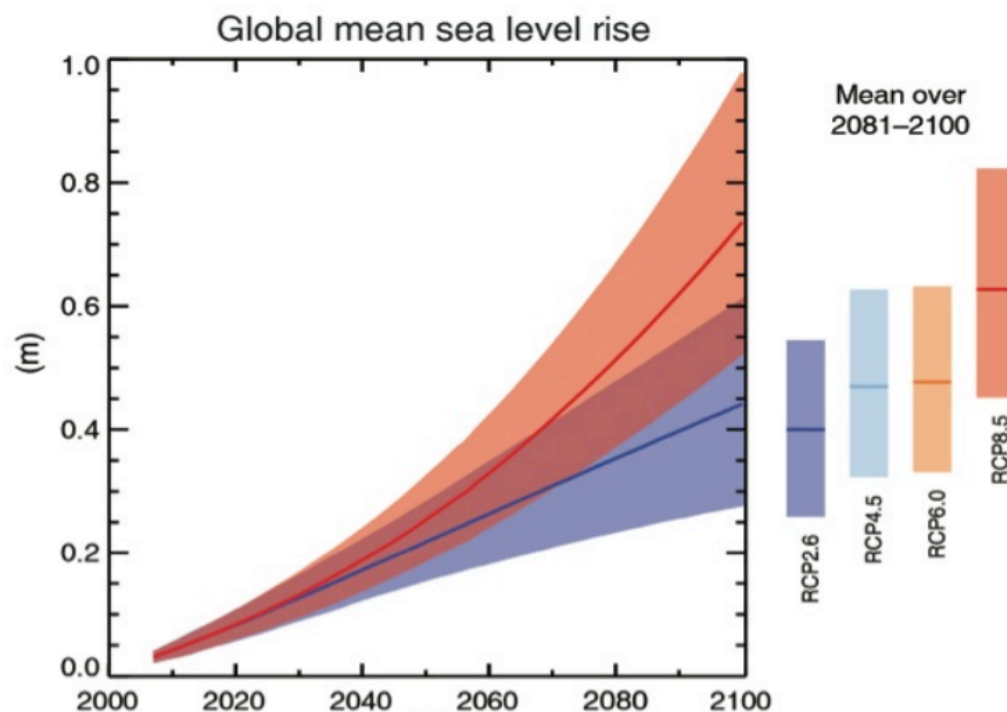


Рисунок 2.14 – Прогнозоване підвищення рівня моря

Висновки до другого розділу. Виконане дослідження показало що, на транспортний сектор припадає значна частка викидів парникових газів, а саме 16%, та з них 70% на автомобільний транспорт. За період 2002 – 2019 роки у транспортному секторі світу відбулося значне збільшення викидів CO₂. Викиди CO₂ зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році, що говорить про те, що викиди в автомобільному секторі пострібно зростають. Що стосується як абсолютної кількості, так і відносної частки, автомобільні перевезення є найбільш швидкозростаючими джерелами викидів CO₂. Причиною цього є нарощування пасажирокілометрів та вантажних тонн-кілометрів. За досліджуваний період пасажиро-людино-кілометри та вантажні тонни-кілометри у секторі автомобільного транспорту зросли відповідно у 5,43 та 16,01 разів.

Дослідження існуючих моделей показало, що в них є багато недоліків, а саме - проблеми зі збором коректних даних, точність фізики моделі, точність прогнозованих змін, не завжди вірна оцінка чутливості клімату до зовнішніх

впливів. Очікувати від моделей клімату точного проектування майбутніх викидів та пов'язаних із ними змін, які залежать від поведінки людей, технологічних змін, економічного зростання та зростання населення також не варто.

Проте моделі сходяться в тому, що всі вони прогнозують глобальне потепління, але в різній мірі. В загальному можна зараз говорити, що порівнюючи 2019 рік з 1970 роком передбачив підвищення середньої глобальної температури на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ і зникнення близько 50% багаторічних льодів в Арктиці. Спостереження підтвердили ці тенденції, продемонструвавши, що середня глобальна температура за цей період збільшилася на $0,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ і що площа багаторічних арктичних морських льодів в вересні 2019 року було приблизно на 46% менше, ніж в 1970 році.

Моделі зазвичай пропонують кілька сценаріїв: позитивний (при малих викидах), при великих викидах та при середніх. За третім із сценаріїв очікується підвищення середньої глобальної температури від $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятиліття (в середньому на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятиліття). Сценарій 1 передбачає зрушення в бік більш широкого використання природного газу, значне підвищення енергоефективності, строгий контроль над монооксидом вуглецю, зворотні тенденції в сфері збезлісення і викидів вуглекислого газу. В результаті сценарій 1 передбачає більш вільш низьке підвищення середньої глобальної температури поверхні - на $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятиліття.

Тому в перспективі найближчих двох-трьох десятиліть навіть в найбільш позитивному сценарії найбільш вірогідним здається збереження існуючих тенденцій зростання атмосферної концентрації вуглекислого газу і температури.

РОЗДІЛ 3

ЕФЕКТИВНІСТЬ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

3.1 Модель аналізу кліматичних даних для прогнозування глобального потепління в розрізі викидів автомобільного транспорту

IPCC зробило обґрунтовані прогнози щодо антропогенного глобального потепління та закликала укласти ефективні договори про зменшення викидів парникових газів (особливо, CO₂), одночасно покращуючи ефективність використання енергії [3].

Однак моделі IPCC не спрогнозували правильно паузу глобального потепління, яка відбулася з приблизно 2000 по 2014 роки.

З допомогою рівняння, яке буде описано нижче в цій частині роботи буде спрогнозовані зміни глобальної температури, які спричинені викидами CO₂ в атмосферу.

Аналіз довгострокових даних про викиди CO₂ з 1750 року показує, що CO₂ в атмосфері експоненціально збільшився до потенційно небезпечного рівня в основному через спалювання викопних копалин, палива (зокрема вугілля), що супроводжується масовою вирубкою лісів.

Викиди CO₂ зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році [14].

Щорічна ефективність видалення антропогенних викидів CO₂ в атмосферу може бути виражена як

$$100 * \left(1 - \frac{\Delta[CO_2]_{obs}}{\Delta[CO_2]_{emns}} \right), \quad (3.1)$$

де $\Delta[CO_2]_{obs}$ - це зріст CO₂, який спостерігається в даному році,

$\Delta[CO_2]_{emms}$ - це теоретичний зріст CO_2 , який внаслідок антропогенних викидів (em) може спостерігатися в майбутньому.

Для періодів 1935 - 1949 років, 1950 - 1969 років, 1970 - 1999 років та 2000 - 2019 років значення зріст CO_2 становив 81,5, 42,4, 43,8 та 47,8% відповідно.

Щорічна ефективність видалення антропогенних викидів CO_2 сильно корелює із епізодами Ель-Ніньйо (див. рис. 3.1).

Ель-Ніньйо - це протилежні екстремальні значення атмосферного тиску й температури води в екваторіальній зоні Тихого океану [13].

Коли Ель-Ніньйо знаходиться на своєму піку, щорічна ефективність видалення антропогенних викидів CO_2 стає дуже маленькою і, наприклад в 1998 році склала 5.7%, а в 2015 - 23.3% відповідно. Коли Ель-Ніньйо слабкий щорічна ефективність видалення антропогенних викидів CO_2 може перевищувати 60%.

Останній зафіксований пік Ель-Ніньйо спостерігався в 2016 році. Після 2016 року щорічна ефективність видалення антропогенних викидів CO_2 знову збільшується, оскільки поверхня океану охолоджується, таким чином збільшуючи розміщення маси CO_2 , оскільки константа закону Генрі [17], що говорить, CO_2 зростає із зменшенням температури поверхні океану.

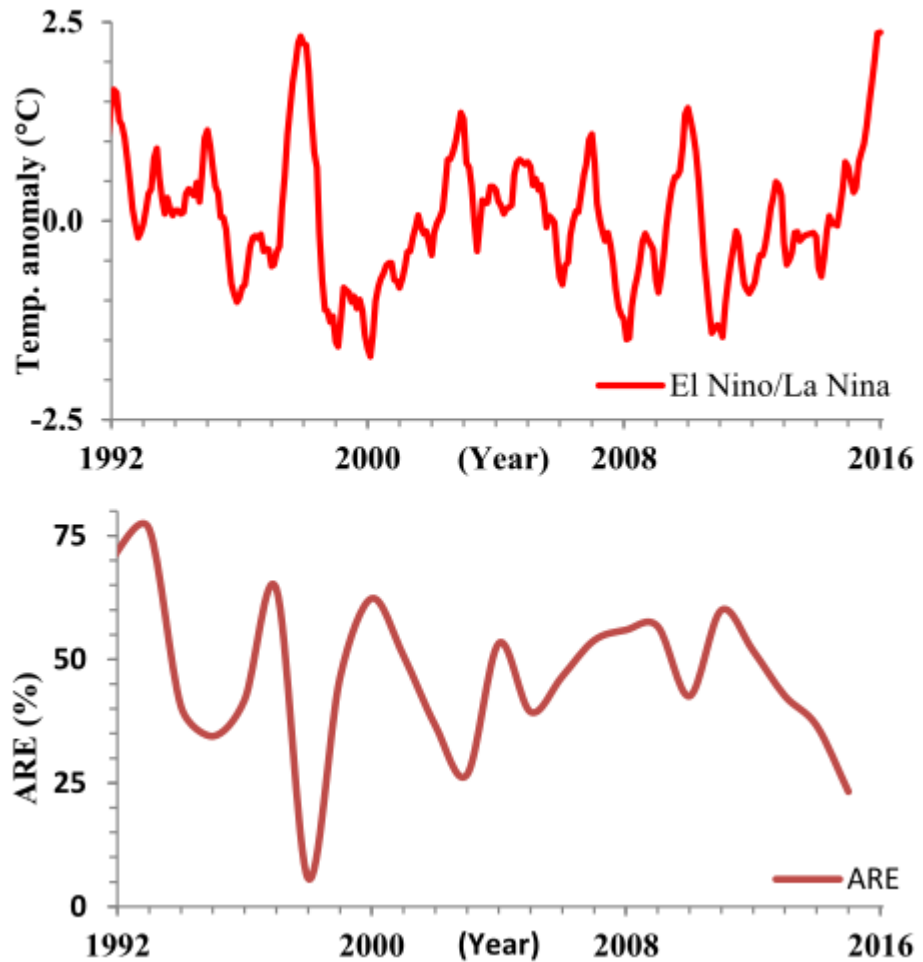


Рисунок 3.1 – Порівняння місячних аномальних значень Ель-Ніньйо до ефективності видалення антропогенних викидів CO₂ з атмосфери за період 1992 - 2016 років

Чому вміст CO₂ в атмосфері є настільки важливим фактором, що впливає на глобальне потепління? Причина в тому, що CO₂ впливає на збільшення атмосферної водяної пари, яка потім може посилити ефект парникових газів CO₂ або атмосферного глобального потепління.

На даний момент, вклад парів H₂O та CO₂ у потепління парникових газів, за оцінками експертів, становить 68% та 12%, відповідно.

Приблизний приріст аномальної глобальної температури за рахунок CO_2 (з парами H_2O) визначається як

$$\Delta GTA_{CO_2} = c * \ln\left(\frac{[CO_2]_f}{[CO_2]_i}\right), \quad (3.2)$$

де c - коефіцієнт кліматичної чутливості,

$[CO_2]_f$ - кінцева концентрація CO_2 ,

$[CO_2]_i$ - початкова концентрації CO_2 .

Внутрішні коефіцієнти чутливості до клімату для парів H_2O (при $10\text{ }^\circ\text{C}$ та тиску 1000 Па) та CO_2 ($\sim 40\text{ Па}$) становлять близько $10\text{ }^\circ\text{C}$ та $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно.

Однак невизначеність щодо загальної чутливості до CO_2 , включаючи H_2O , дуже тривожна; діапазон, який найчастіше наводять для рівноважної середньої глобальної реакції температури поверхні на подвоєння концентрації CO_2 в атмосфері, становить $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ - $4,5\text{ }^\circ\text{C}$. Цей діапазон є основою IPCC 2015 року.

На відміну від потужності водяної пари та постійно зростаючого CO_2 , вплив озону та інших парникових газів (наприклад, метану та закису азоту) є досить обмеженим через їх низькі концентрації ($<1\text{ ppm}$).

Збільшення глобального потепління може призвести до більш небезпечних і непередбачуваних наслідків для глобального клімату, якщо середня температура поверхні Землі перевищить понад $15\text{ }^\circ\text{C}$. В останні роки, глобальне потепління призводить до все більшої кількості руйнівних погодних явищ у всьому світі (наприклад, посухи, повені та циклонічні бурі) з незвично довшим літом / коротшою зимою. Цікаво, що зростаюча модель глобального потепління, як здається, зупинилася на період 2000–2019 роки, Незважаючи на збільшення антропогенних викидів CO_2 протягом цього періоду.

Глобальне потепління для періоду 1880 - 2019 можна змоделювати наступним чином:

$$GTA = a * \cos(\omega * (y - 1880) + \phi) + c * \ln\left(\frac{[CO_2]_y}{[CO_2]_{1958}}\right) + d * (Y - 1958) + e, \quad (3.3)$$

де $[CO_2]_{1958}$ - це концентрація CO_2 (ppm) в даному базовому році,
 $[CO_2]_y$ - це концентрація CO_2 (ppm) в році y .

Дані для рівняння 3.1 задані наступним чином:

Таблиця 3.1 – Параметри, що використовувалися для формули 3.3

Параметр	Одиниці	Включаючи CSF	Не включаючи CSF	IPCC
c	°C	2.52	0.00	4.33
a	°C	0.15	0.19	0
ω	$rad.y^{-1}$	$2\frac{\pi}{58}$	$2\frac{\pi}{61}$	0
ϕ	rad	-0.05	-0.35	0
d	°C y^{-1}	0.0013	0.006	0
e	°C	-0.02	-0.38	-0.15
y	рік	рік	рік	рік

Рисунок 3.3 зображає можливі сценарії після 2019 року, в них приріст CO_2 варіюється від -0.5, 0.0 і до 0.5% кожного року.

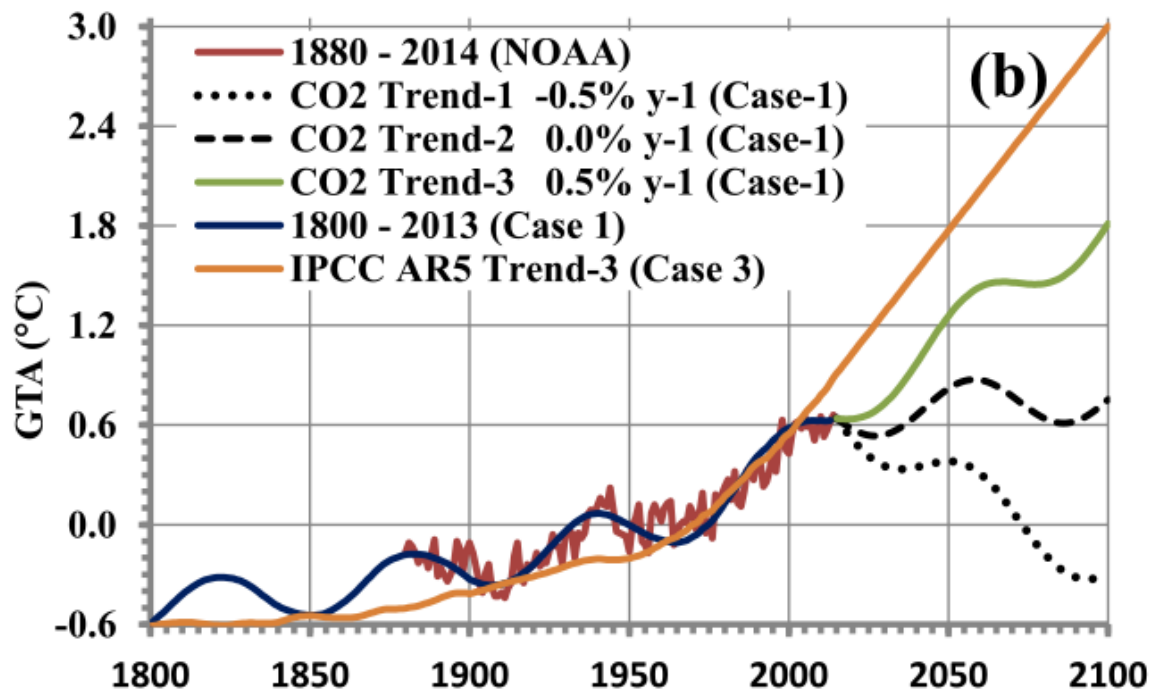


Рисунок 3.3 – Змодельована середня глобальна температура з 1800 по 2100 роки

В період з 1958 року і до 2019 року підвищення вмісту CO_2 в атмосфері складало $2330 - 9861 \text{ Mt C y}^{-1}$, а глобальної температури $0.12 - 0.62 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для 3 сценарію приріст CO_2 складатиме 0.5% , для 1- -0.5% і для 2 - 0% .

Сценарії 1 та 2 є неправдоподібними і можливими тільки в випадку, коли буде вестися дуже серйозний контроль викидів CO_2 . Перший сценарій зменшить рівень CO_2 в атмосфері майже до доіндустріального до 2100 року, та зменшить глобальну температуру на $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для реалізації цього моделювання застосовуватимемо мову для статистичної обробки даних – R. R - мова, розроблена спеціально для статистичного аналізу та реконфігурації даних. Усі бібліотеки R зосереджені на одному - зробити аналіз даних простішим, доступнішим та детальнішим. Будь-який новий статистичний метод спочатку додається через R-бібліотеки. Це робить R ідеальним вибором для аналізу та проектування даних. R надає розробникам достатньо інструментів для

навчання та оцінки алгоритму та прогнозування майбутніх подій. Таким чином, R робить машинне навчання набагато легшим та доступнішим. Список R-пакетів для машинного навчання дійсно великий. Пакети машинного навчання R включають MICE (для піклування про відсутні значення), gpart & PARTY (для створення розділів даних), CARET (для класифікації та навчання регресії), randomFOREST (для створення дерев рішень) та багато іншого. R має безліч інструментів, які можуть допомогти у візуалізації, аналізі та поданні даних. Пакети R ggplot2 та ggedit для стали стандартними пакетами для побудови графіків. Хоча пакет ggplot2 орієнтований на візуалізацію даних, ggedit допомагає користувачам подолати розрив між створенням сюжету та дотриманням усіх цих досадних естетичних сюжетів.

З допомогою R було спроектовано наведену вище модель, програмний код якої додано в додатках (додаток А).

3.2 Аналіз стратегічних планів ЄС зі скорочення антропогенних викидів в атмосферу

Європейський союз вже почав модернізацію і перетворення, необхідні для кліматично нейтральної економіки. Європейська комісія активізує ці зусилля, та має плани по досягненню першої в світі кліматично нейтральної економіки ключового регіону до 2050 року. [22]

Зміна клімату - серйозна проблема для європейців. Згідно всеєвропейському опитуванню, результати якого були опубліковані в вересні 2017 року 9 з 10 громадян (92%) вважають зміну клімату серйозною проблемою.

У листопаді 2018 року Європейська комісія представила довгострокову стратегічну концепцію зниження викидів парникових газів, показавши, яким чином Європа може прокласти шлях до кліматичної нейтральності - до економіки з нульовими викидами парникових газів.

У стратегії розглядаються способи досягнення цього шляхом вивчення всіх ключових секторів економіки, включаючи енергетику, транспорт, промисловість і

сільське господарство. Було вивчено цілий ряд варіантів, перш ніж зробити висновок про те, що перехід до нульових викидів парникових газів до 2050 року можливий на основі існуючих (в деяких випадках - перспективних) технологічних рішень, підтримки громадян і координації дій в таких ключових сферах, як промислова політика, фінанси і наукові дослідження, в умовах забезпечення соціальної справедливості такого переходу.

Концепція Європейської комісії охоплює сім основних стратегічних складових:

1. максимізувати переваги енергоефективності, в тому числі безвідходних будівель;
2. максимізувати розгортання відновлюваних джерел енергії та використання електрики для повної декарбонізації енергозабезпечення Європи;
3. прагнути до чистих, безпечних і об'єднаних в мережу засобів пересування;
4. використовувати конкурентоспроможну європейську економіку і економіку замкнутого циклу як основний засіб зниження викидів парникових газів;
5. розробити адекватну інфраструктуру інтелектуальної мережі та комунікації;
6. користуватися всіма перевагами біоекономіки і створити необхідні поглиначі вуглецю;
7. усунути залишилися викиди CO_2 за допомогою виловлювання та зберігання вуглецю.

Робота над цими складовими, починаючи з впровадження концепції клімату і енергетики 2030 року дозволить ЄС просунути до процвітаючої кліматично нейтральної економіки.[23]

Стратегічна концепція Комісії є відповіддю на заклик Паризької угоди до

зусиль щодо обмеження глобального потепління в порівнянні з доіндустріальним рівнем до 1,5 °C. Крім того, вона повністю узгоджена з Цілями ООН у сфері сталого розвитку.

ЄС є глобальним лідером в переході на економіку, що більш ефективно використовує вуглець. Громадяни і компанії по всій Європі вже успішно знизили викиди парникових газів на 22%, при цьому валовий внутрішній продукт (ВВП) збільшився на 58% в період з 1990 по 2017 роки.

Європейський союз продемонстрував, що викиди можна відокремити від економічного зростання і що протидія зміні клімату йде рука об руку з розвитком нових галузей, створенням нових робочих місць та впровадженням технічних інновацій.

Зараз ЄС впевнено прямує плану по досягненню цілей на 2022 року стосовно клімату та енергетики і завершив створення нормативно-правової бази для досягнення цілей на 2030 року подальшого скорочення викидів і переходу на екологічно чисту енергію.

Такі дії дозволять ЄС виконати свої зобов'язання по Паризькій угоді, пов'язані зі зменшенням викидів принаймні на 40% до 2030 року в порівнянні з 1990 роком. Дійсно, нові цілі на 2030 рік пов'язані з енергоефективністю та відновлювальними джерелами енергії, повинні забезпечити ЄС скорочення викидів приблизно на 45%, якщо вони будуть реалізовані в повній мірі. Однак потрібно зробити більше. Стратегічна концепція Комісії окреслює, яким чином можна реалізувати перехід до кліматично нейтральної економіки до 2050 року.

Плани ЄС засновані на виконанні таких цілей:

1. досягнення скорочення викидів парникових газів на 80-100% в порівнянні з 1990 роком, остання цифра відповідає кліматично нейтральній економіці до 2050 року;
2. ґрунтуватися на політиках, які не викликатимуть жалю в майбутньому, наприклад не тільки активно прагнути до енергоефективності та

використовувати поновлювані джерела енергії, а й варіювати інтенсивність поширення електрифікації, водню і синтетичного палива, а також підвищувати ефективність споживання енергії кінцевими користувачами і роль безвідходної економіки;

3. показати, що процвітаюча економіка ЄС сумісна з амбітними цілями щодо клімату навіть в умовах існуючих технологій.

Ці шляхи не є прогнозами майбутнього, але показують виправданість амбіцій ЄС щодо клімату [24].

Ці цілі націлені на зниження викидів парникових газів більш ніж на 80% до 2050 року в порівнянні з 1990 роком [68]. Мета полягає в тому, щоб краще зрозуміти, які доступні варіанти скорочення викидів і як вони перетворюють різні сектори нашої економіки.

Також ці цілі об'єднують економічно ефективні можливості скорочення викидів парникових газів з першими п'ятьма шляхами, що дозволить досягти скорочення викидів парникових газів на 90%.

Ці цілі оцінюють можливості досягнення нульового викиду парникових газів, тобто кліматичної нейтральності, до 2050 року, при цьому також розглядаючи роль негативних викидів парникових газів в досягненні нульових викидів до 2050 року.

Вони просуває без вуглецеві енергоносії і спирається на технології утилізації CO_2 , а саме біоенергетику в поєднанні з видалення CO_2 з атмосфери, для врівноваження викидів.

Та зосереджені на наслідки безвідходної економіки в світі, де вибір споживачів створює все меншу вуглецеву навантаження. Він більшою мірою побудовано на більш активному використанні землі для поглинання вуглецю і необхідності менше покладатися на технології утилізації CO_2 для врівноваження залишилися викидів.

Досягнення кліматичної нейтральності буде засновано на поєднанні рушійних сил по розгортанню всіх варіантів для реалізації цієї амбітної мети.

Довгострокова концепція Європейської комісії передбачає запрошення європейських інститутів, національних парламентів, бізнес-сектора, неурядових організацій, міст, громад та громадян, особливо молоді, брати участь у всеєвропейських дебатах про майбутнє Європи і про те, як гарантувати збереження за ЄС лідерства в глобальних зусиллях по боротьбі зі зміною клімату.

Ці всеєвропейські дебати покликані допомогти ЄС на початок 2022 року прийняти амбітну довгострокову стратегію щодо скорочення викидів парникових газів і направити її на Конференцію сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКООНІК), як передбачено Паризькою угодою.

Шлях до економіки з нульовими викидами парникових газів може спиратися на спільну роботу над сімома стратегічними складовими:

1. енергоефективність;
2. розгортання відновлюваних джерел енергії;
3. чисті, безпечні засоби пересування;
4. конкурентоспроможна промисловість і економіка замкнутого циклу;
5. інфраструктура та взаємозв'язки;
6. біоекономіка та природні поглиначі вуглецю;
7. затримка викидів з допомогою систем відловлювання та зберігання вуглецю.

Підвищення енергоефективності може допомогти ЄС скоротити споживання енергії вдвічі в порівнянні з 2005 роком, тому воно буде грати головну роль в досягненні нульових викидів парникових газів до 2050 року.

Вже досягнуто значних успіхів: пік основного енергоспоживання ЄС припав на 2006 рік, а недавно ЄС прийняв нову обов'язкову для виконання мету з енергоефективності - 32,5% до 2030 року. Такі політичні заходи, як еко-дизайн та маркування енергоспоживання, вже допомогли поставити жорсткі стандарти, які стали ключовою рушійною силою інновацій в ЄС і вплинули на енергоефективність за межами ЄС. Електроніка та обладнання імпортується або експортується, тому

високі європейські стандарти також сприяють тому, що іноземні виробники підвищують свою ефективність. Для досягнення довгострокових цілей будуть важливі і інші країни, що розвиваються технології, в тому числі цифровизація і побутова автоматизація [38].

У той час як вирішальну роль в декарбонізації промислових процесів буде грати енергоефективність, значне скорочення загального енергоспоживання буде обумовлено використанням енергії в будівлях. Житлові будинки та виробничі приміщення в даний час споживають 40% енергії в Європі, при цьому 75% цих будівель були побудовані до появи стандартів енергоефективності. Велика частина житлового фонду, який буде використовуватися до 2050 р, вже побудована і зажадає модернізації. Необхідні додаткові зусилля включають перехід на екологічні поновлювані джерела енергії для обігріву, ефективні продукти та обладнання, наприклад теплові насоси, інтелектуальні системи управління будівлями і обладнанням, а також більш ефективні ізоляційні матеріали [26].

Модернізація європейських будівель потребують фінансових інструментів для подолання існуючих недоліків ринку, а також робочої сили з необхідними навичками для забезпечення доступності житла, нешкідливого для клімату. Таким чином, для модернізації вже забудованої середовища і загального фонду будівель необхідний комплексний підхід, що пов'язує відповідні політики, а також залучення споживачів [25].

Перехід на екологічно чисту енергію повинен привести до появи системи, в якій велика частина первинних енергоресурсів Європи є поновлювані джерела енергії. Таким чином буде підвищена надійність подачі енергії, будуть створені робочі місця на місцевому рівні і будуть скорочені викиди в атмосферу. ЄС вже прийняв на себе зобов'язання досягти нової мети щодо відновлюваних джерел енергії - 32% до 2030 року (див. рис. 3.4).

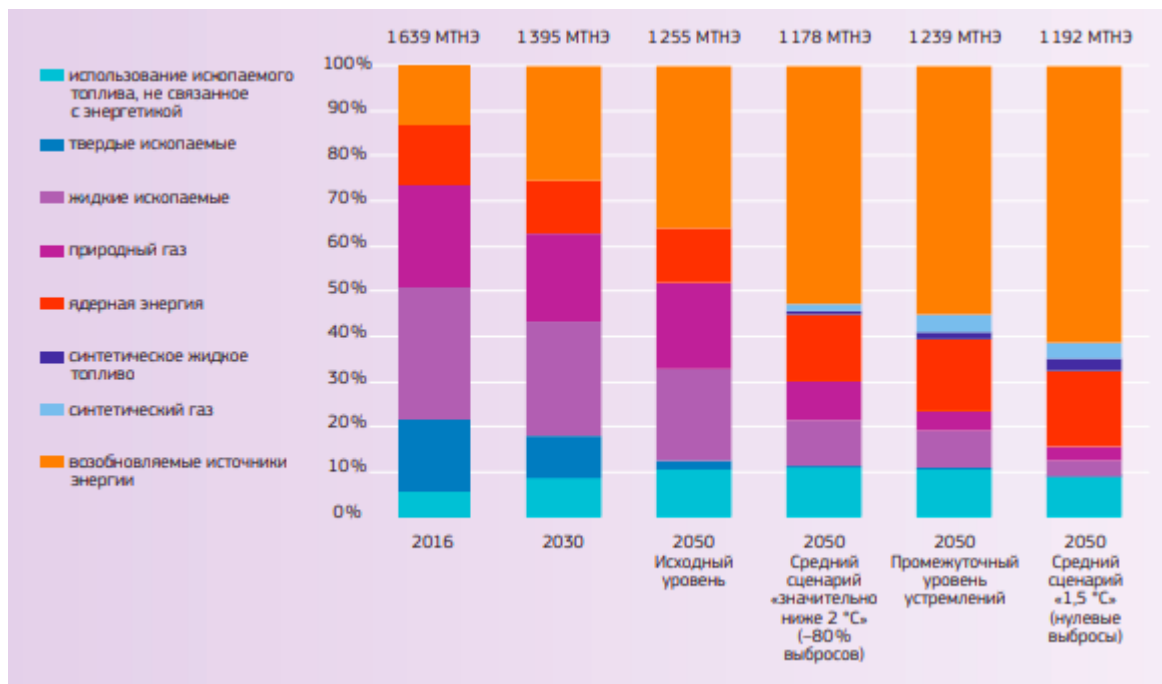


Рисунок 3.4 – Загальне споживання енергії на материковій частині [61]

В даний час Європа залежить від імпорту енергії приблизно на 55%. За прогнозами, цей показник впаде до 20% до 2050 р завдяки переходу на кліматично нейтральну економіку. Витрати на імпорт викопного палива скоротяться в порівнянні з поточними 266 млрд євро, що в свою чергу покращить торгове і геополітичне становище ЄС. У деяких випадках витрати на імпорт можуть скоротитися на 70% і привести до економії 2-3 трлн євро в період з 2031 по 2050 рр. Великомасштабне розгортання відновлюваних джерел енергії сприятиме децентралізації та збільшення вироблення енергії. До 2050 р більш 80% електрики буде вироблятися поновлюваними джерелами енергії, що забезпечить половину споживання кінцевої енергії ЄС. Щоб задовольнити цей зростаючий попит і досягти нульових викидів парникових газів, вироблення енергії збільшиться до 2,5 разів у порівнянні з поточним рівнем. Це перетворення відкриває величезні перспективи компаніям-постачальникам екологічно чистої енергії.

В даний час в ЄС базується 6 з 25 найбільших підприємств, які спеціалізуються на поновлюваних джерелах енергії і на яких зайнято близько 1,5

млн осіб, що працюють в цьому секторі. Це говорить про перспективу величезних потенційних економічних переваг подальшої електрифікації, заснованої на зростаючому поширенні поновлюваних джерел енергії. [67] Завдяки цьому важливу роль у виробленні енергії гратимуть споживачі і місцеві спільноти.

Розгортання поновлюваних джерел енергії також допоможе іншим секторам (теплоенергетика, транспорт і промисловість) в декарбонізації за рахунок використання електрики або синтетичного палива (водню і перетворення енергії). Перехід до децентралізованої системи електропостачання вимагає високотехнологічної гнучкої системи, яка побудована на залученні споживачів, взаємозв'язку, великомасштабних запасів енергії, регулювання попиту і управлінні за допомогою цифрових технологій. Однак перехід не буде проходити без вирішення важких завдань, таких як необхідність в стабільних і надійних засобах захисту від зростаючих ризиків порушення інформаційної безпеки.

З огляду на те, що на частку транспорту припадає чверть викидів парникових газів в ЄС, всі види транспорту повинні брати участь в зменшенні викидів від транспортної системи і сприяти досягненню таких добродійних наслідків, як чисте повітря, зменшення шуму і безаварійний рух.

Засоби пересування з низьким або нульовим викидом і ефективними альтернативними двигунами і коробками передач є відправною точкою - автомобільна промисловість уже вкладає значні інвестиції в такі технології, як електромобілі.

Поряд з існуючими технологіями електрифікація є не єдиним рішенням для всіх видів транспорту. Наприклад, акумуляторні батареї в даний час мають низьку енергоємність, і їх навантаження робить їх непридатними для авіації або судноплавства далекого прямування. Точно так же технології на основі водню можуть стати для великовантажних автомобілів і автобусів альтернативою безуглеродистих джерел енергії. Залізничний транспорт, як і раніше є найефективнішим способом перевезення вантажів на середні відстані і тому

повинен стати більш конкурентоспроможними.

В авіації можна було б перейти на біологічні види палива і кліматично нейтральне екологічне паливо, а в судноплавстві і великовантажних автомобілях можна також застосовувати водень і біогаз за умови, що вони будуть без вуглецю протягом усього виробничого циклу.

Щоб зробити засоби пересування більш екологічно чистими, також потрібна ефективна організація транспортної системи, заснована на цифрових технологіях, обміні даними і сумісних стандартах. Це дозволить забезпечити інтелектуальне управління дорожнім рухом та автоматизовану мобільність всіх видів транспорту, зниження заторів на дорогах і підвищення рівнів наповнюваності салонів. Необхідно також поліпшити місцеву інфраструктуру і територіальне планування.

Інтелектуальні міста і міські території стануть центрами інновації засобів пересування.

В даний час 75% населення ЄС живе в міських зонах, для яких характерне переміщення на короткі відстані і в яких люди часто стикаються з проблемою якості повітря [45].

Ключові елементи формування майбутньої мобільності міського населення:

1. містобудівне планування;
2. безпечні доріжки для велосипедистів і пішоходів;
3. екологічно чистий громадський транспорт;
4. надання транспортних послуг, наприклад служб прокату автомобілів або велосипедів.

Щоб досягти успіху в здійсненні такого переходу, людям і організаціям необхідно час для адаптації. Наприклад, більш легкий доступ до цифрових технологій і відеоконференцій може знизити потребу в службові відрядження на великі відстані. Якщо пасажирів і транспортні компанії будуть краще поінформовані про варіанти використання транспорту, то, швидше за все, вони будуть приймати більш раціональні рішення. Інтерналізація зовнішніх витрат на

транспорт є необхідною умовою для вибору ефективних рішень, пов'язаних з технологіями і видами транспорту.

Інфраструктура також є суттєвою частиною переходу, наприклад, через реалізацію трансєвропейської транспортної мережі (TEN-T) до 2030 року. Інвестиції повинні вкладатися в види транспорту, які найменше забруднюють атмосферу, в просування проектів взаємодії між видами транспорту, цифрові та електричні мережі, а також включати такі високотехнологічні проекти, як Європейська система управління залізничним сполученням (ERTM). Завдяки цьому високошвидкісні залізничні сполучення стануть реальною альтернативою перельотів всередині ЄС [26].

Збереження конкурентоспроможної європейської економіки, яка є в даний час найефективнішою в світі, нерозривно пов'язане з ефективним використанням ресурсів і розвитком економіки замкнутого циклу.

Поряд з країнами, що розвиваються методами переробки відходів виробництво багатьох промислових товарів, таких як сталь, скло і пластмаса, стане більш ефективним з точки зору споживання ресурсів і менш інтенсивним за обсягом викидів в атмосферу, оскільки в подальшому потреби в енергії скоротяться. Це підвищить конкурентоспроможність економіки і надасть сприятливі можливості для бізнесу і створення робочих місць. Нові матеріали і технології використання існуючих матеріалів будуть також відігравати важливу роль. При цьому можливо як відкриття заново традиційних областей застосування, таких як використання дерев'яних конструкцій в будівництві, так і створення нових з'єднань, які можуть замінити енергоємні матеріали.

Регенерація сировини і вторинна переробка матимуть особливо важливе значення для галузей і технологічних виробництв, де можуть з'явитися нові залежності, наприклад залежність від таких матеріалів, як кобальт, рідкоземельні метали або графіт, виробництво яких сконцентровано в невеликій кількості країн за межами Європи. Посилена торгова політика ЄС також дуже важлива для гарантії

стабільної і надійної поставки цих матеріалів [25].

Що стосується позбавлення промисловості від викидів парникових газів, то найчастіше це означає серйозну модернізацію існуючих систем або повну їх заміну. Такі капіталовкладення дозволять підвищити конкурентоспроможність промисловості ЄС і зміцнити її присутність в загальносвітовій економіці, оскільки вона стане менше залежати від вуглеців.

Комп'ютеризація та автоматизація є ефективними короткостроковими способами підвищення конкурентоспроможності, в той час як електрифікації в поєднанні з більш широким застосуванням водню, біомаси та поновлюваного синтетичного газу може знизити пов'язані з енергоспоживанням викиди при виробництві промислових товарів.

Деякі промислові викиди буде важко виключити, однак їх можна скоротити, наприклад двоокис вуглецю (CO_2), який можна виловлювати, зберігати і використовувати. Поновлюваний водень і екологічно безпечна біомаса можуть замінити викопне паливо, яке використовується у вигляді сировини для деяких промислових процесів, таких як виробництво сталі.

Протягом наступних 10-15 років технології, які вже відомі в таких ключових секторах промисловості, як виробництво сталі, цементу і хімікатів, повинні продемонструвати, що вони можуть працювати на належному рівні. Науково-дослідні роботи теж дозволять знизити витрати на передові технології, а також дозволять новим продуктам, таким як вуглецеве волокно або більш міцні будівельні розчини, замінити сучасну промислову продукцію.

Крім того, попит на продукцію буде залежати від вибору споживачів, який визначається триваючими перетвореннями, такими як комп'ютеризація або підвищений попит на екологічно чисті товари і послуги. Інформація про вуглець і вплив товарів і послуг на навколишнє середовище повинна бути більш доступною, щоб споживачі могли приймати поінформовані рішення.

Якщо ми прагнемо до досягнення економіки з нульовим викидом парникових

газів, нам необхідна високотехнологічна адекватна інфраструктура, яка гарантує взаємопов'язаність і секторальну інтеграцію в усій Європі. Розширене міждержавне і регіональне співробітництво дозволить нам скористатися перевагами модернізованої і перетвореної європейської економіки.

Необхідно зосередитися на реалізації проекту транс'європейських транспортних і енергетичних мереж. Щоб підтримати розвиток більш сучасної системи і забезпечити комп'ютеризацію та подальшу інтеграцію відповідних секторів, включаючи високотехнологічні електричні та інформаційно-технологічні мережі, а також водневі трубопроводи, де це необхідно, потрібна відповідна інфраструктура.

Перетворення транспортного сектора Європи потребують прискореного розвитку інфраструктури і більш широкій взаємодії між транспортними та енергетичними системами, такими як автоматичні пункти підзарядки і заправні станції, що створюють сприятливі умови для надання міжнародних послуг. Переоснащення існуючої інфраструктури може забезпечити безперервну експлуатацію, в той час як заміщення старої інфраструктури може відповідати цілям декарбонізації [41].

За оцінкою ООН, до 2050 року населення земної кулі збільшиться на 30% в порівнянні з сьогоdnішнім станом і складе близько 9,8 млрд осіб. Беручи до уваги вплив кліматичних змін на екосистеми і глобальне землекористування, сільськогосподарський та лісогосподарський сектори економіки ЄС повинні забезпечити стабільне виробництво продуктів харчування, кормів і текстильних товарів. У той же час вони будуть грати важливу роль в збереженні біологічного різноманіття та переході до економіки з нульовим викидом парникових газів.

Біомаса може замінити углеродоемкі матеріали, а також безпосередньо віддавати тепло. Біомасу можна перетворити в біопаливо і біогаз, які можна передавати через газопровідну мережу, в якості заміників природного газу. Якщо біомаса буде використовуватися для генерації енергії, то для припинення

шкідливих викидів в атмосферу можна використовувати технологію уловлювання та зберігання викидів вуглецю [40].

Економіці з нульовими викидами парникових газів буде потрібно більше біомаси. Підвищений виробництво біомаси має ґрунтуватися на поєднанні екологічно безпечних джерел, щоб гарантувати недопущення занепаду в галузях ЄС щодо відновлення лісів та інших природних ресурсів [42].

Розвиток виробництва сільськогосподарської продукції в ЄС призвело до скорочення викиду CO_2 , проте повністю виключити такі гази, як закис азоту і метан, в даний час не вдається. Проте викиди можна скоротити за допомогою ефективних і екологічно безпечних технологій виробництва. Це підвищить продуктивність, знизить необхідність в споживанні сировини і позбавить від інших проблем, пов'язаних з екологією, таких як забруднення, заболочування і надмірний вміст біогенних речовин у водоймах.

Приклади:

1. комп'ютеризована обробка землі та використання цифрових технологій для оптимізації застосування добрив і засобів захисту рослин;
2. широке використання органічних добрив в анаеробних ферментерах не тільки знижує викиди CO_2 , але також сприяє виробництву біогазу;
3. удосконалення сільськогосподарських підприємств за рахунок технологій агролісомеліорації, які ефективно використовують поживні ресурси для посилення вуглецю в ґрунті, біологічного різноманіття та життєстійкості сільського господарства в зв'язку зі змінами клімату;
4. адаптація певних видів сільськогосподарської діяльності на органічних ґрунтах;
5. очищення заболочених земель і торф'яних боліт, які є джерелами ґрунтових викидів вуглецю.

Перехід на більш замкнуту біоекономіку також відкриє нові можливості розвитку бізнесу для сільськогосподарських і лісівничих підприємств.

Новий попит на біомасу може сприяти диверсифікації сільського господарства. Більш того, лісонасадження та відновлення загиблих лісових угідь і подібних екосистем має важливе значення для подальшого збільшення поглинання CO_2 нашими природними поглиначами, позбавлення від шкідливих викидів і отримання вигоди від біологічного різноманіття, ґрунтових і водних ресурсів.

Перехід на основі застосування біомас обмежений через обмежену кількість землі. В цілому ЄС слід проявляти обережність у питанні про те, як краще використовувати мізерні земельні угіддя і інші природні ресурси, щоб забезпечити використання біомаси найбільш ефективним і надійним способом.

Технологія уловлювання та зберігання вуглецю спочатку розглядалася як основний варіант декарбонізації при виробництві електроенергії. В даний час необхідних потенційних можливостей для зниження викидів в промислових секторах стало менше через падіння вартості відновлюваних джерел енергії, а також низькою соціальною прийнятністю уловлювання та зберігання вуглецю.

Проте технологія як і раніше необхідна в якості можливого способу виробництва водню, як механізм для виключення певних важких для скорочення викидів в промисловості і, в поєднанні з екологічно безпечною біомасою, для створення технологій видалення CO_2 .

Щоб забезпечити успішне розгортання технології уловлювання та зберігання вуглецю, потрібні додаткові зусилля в наукових дослідженнях, інноваціях і демонстрації. Технологія вимагає нової інфраструктури, а для досягнення свого потенціалу - скоординованих дій, що дозволяють закріпити будівництво демонстраційних зразків і комерційних підприємств всередині ЄС, а також розгорнути громадське обговорення проблем в деяких державах-членах [56].

Ці сім стратегічних структурних елементів гарантують, що ЄС може працювати, успішно втілюючи задуми в реальність. Однак для цього слід докласти зусиль в політичній сфері.

Система вимагає наступних перетворень:

1. стимулювання науково-дослідницьких розробок та інновацій;
2. збільшення приватних інвестицій;
3. подача правильних сигналів ринкам;
4. забезпечення згуртованості суспільства, щоб ніхто не залишився в стороні.

Зміна клімату представляє глобальну загрозу, і Європа не може боротися з ним в поодиночку. Тому співпраця з країнами-партнерами буде необхідним. Однак ЄС має також непохитну зацікавленість працювати над досягненням економіки з нульовими викидами парникових газів до 2050 року і спонукати інші країни послідувати такий приклад.

Це являє колосальну можливість направити зусилля з подолання проблем 21 століття стратегічним чином.

Європейська комісія запросила до всеєвропейських поінформованих дебатів, які покликані допомогти ЄС на початок 2022 року прийняти амбітну довгострокову стратегію [60].

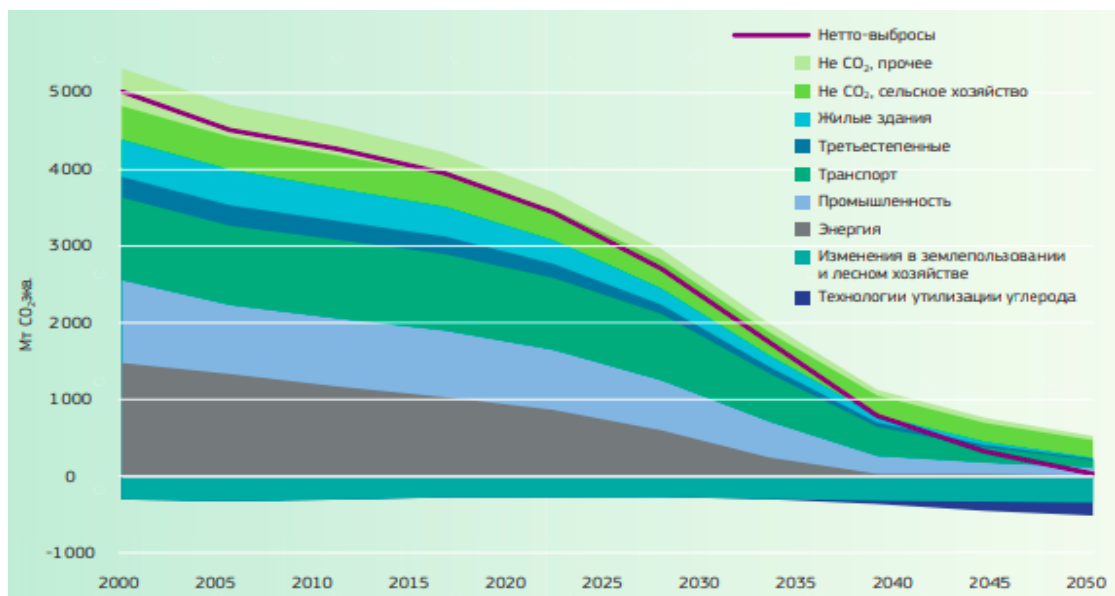


Рисунок 3.5 – Траєкторія зміни рівня викидів парникових газів в сценарії 1,5 ° C [61]

3.3 Порівняльний аналіз моделей прогнозування глобального потепління

Для порівняння було розглянуто такі моделі:

1. моделі мереж руху - мікросимуляція;
2. моделі поведінки;
3. агентне моделювання;
4. моделювання динаміки системи;
5. техно-економічні моделі.

Ця класифікація моделей була використана для надання широкої перспективи способів моделювання транспортної системи. Моделі були класифіковані через різні методи, що використовуються в рамках підходу, або через просторовий та часовий контекст моделі. Представлений спектр географічних та часових масштабів, від місцевого до глобального та найближчого майбутнього до горизонту прогнозування 2100 року. Моделі можуть мати різні основоположні епістемології, проте всі вони мають здатність представляти елементи системи. Вони також можуть розглянути політичні питання, зокрема питання масштабу викидів від транспорту, незважаючи на різні перспективи та географічний обсяг. Різні засоби моделювання, які вони містять, можуть бути використані різними способами та різними практиками для вивчення ряду проблем, пов'язаних з транспортом. Тому цікаво розглянути відносні переваги та недоліки різних типів моделей та необхідність різних підходів у моделюванні транспортного сектору [29].

Моделі, включені до систематичного огляду в таблиці 3.2, представляють спектр підходів до моделювання, що охоплюють просторові та часові шкали. Приклади пакетів були обрані, оскільки вони є репрезентативними для методів, що використовуються при моделюванні транспортної системи та продемонструвати різні підходи до кількісної оцінки викидів від автомобільного транспорту. Підходи до мережевої трафіку, поведінкового та агентного моделювання були згруповані, оскільки вони представляють мікромасштабні підходи, що стосуються дезагрегації та фіксації рухів, вибору та поведінки людей чи транспортних засобів.

Таблиця 3.2 – Огляд підходів до моделювання викидів від автомобільного транспорту

Підхід до моделювання	Захоплені елементи транспортної системи	Основні концепції	Розрахунок викидів
Моделі мереж руху - мікросимуляція	Фіксують рух транспортних засобів у межах визначеної мережі руху	Побудовані на принципах дотримання правил руху автомобіля та зміни смуги руху, які визначають взаємодію транспортних засобів, підтримуючи розриви між транспортними засобами за допомогою алгоритмів мінімального прийняття розривів.	Кількісна оцінка рівня транспортного попиту, що може призвести до розрахунку викидів CO_2
Поведінкові моделі	Висвітлюють детальну інформацію про вибір подорожей під час прийняття рішень	Моделі досліджують діяльність, якв вимагає мобільності для розуміння рівнів транспорту та створення чіткішої картини щодо прийняття рішень. Подорож сприймається як результат діяльності та поведінки.	У поєднанні з моделлю викидів може дати унікальне уявлення про поведінку під час подорожей та викиди автомобільного транспорту.

Продовження таблиці 3.2

Підхід до моделювання	Захоплені елементи транспортної системи	Основні концепції	Розрахунок викидів
Агентне моделювання	Фіксують динаміку поведінки в транспортній системі, як і для поведінкових моделей вище, фіксує більше деталей, ніж просто здійснені поїздки, але розуміє поведінку та мотивацію	Моделюють поведінку через ряд різнорідних агентів	Підмодуль «Навколишнє середовище» обчислює викиди транспорту
Динамічне моделювання	Можуть фіксувати взаємодії в складних системах, таких як транспорт	Динамічні моделі системи побудовані на взаємозв'язку запасів і потоків	Три окремі рівняння обчислюють викиди від автомобільного транспорту, перше обчислює викиди від конкретних автомобілів з використанням швидкості, друге - загальний CO_2 для приватних автомобілів з використанням відстані та кількості поїздок і яке обчислює викиди CO_2 від громадського транспорту

Закінчення таблиці 3.2

Підхід до моделювання	Захоплені елементи транспортної системи	Основні концепції	Розрахунок викидів
Техноекономічні моделі	<p>Фіксують широкомасштабну динаміку транспортної системи через соціально-економічні зміни, які відбуваються, використовуючи підхід моделювання зверху-вниз,</p> <p>широкомасштабну динаміку транспортної системи через соціально-економічні зміни, що відбуваються, використовуючи підхід моделювання зверху-вниз в складних системах, таких як транспорт</p>	<p>Спираються на соціально-економічні характеристики та зміни прогнозу для оцінки попиту на транспорт та технологічні прогнози, використовуються для розробки коефіцієнтів викидів, які дозволяють прогнозувати викиди через соціально-економічні зміни, що відбуваються</p>	<p>Викиди CO_2 від оцінюються на основі споживання енергії, розрахованого на основі пройденого кілометражу транспортним засобом, яке встановлюється з використанням соціально-економічних показників, та ефективності транспортного засобу</p>

Моделі мереж трафіку охоплюють цілий ряд масштабів, від макро до мікро. Мікросимуляція є ключовою підмножиною цих моделей. Транспортний попит формується в рамках мікросимуляційного моделювання наступним чином. Матриця відправлення – призначення (O – D) використовується з моделями для представлення окремих поїздок всередині мережі та в частині призначення трафіку чотириступеневої моделі. Мережа, яка лежить в основі моделей трафіку, будується з реальних мереж трафіку з використанням низки «вузлів», «посилань» та «зон» [44]. Вузли представляють перехрестя та перехрестя, тоді як посилення - це дороги, що з'єднують вузли. Зони - це області, між якими (або в межах яких) здійснюються поїздки і з яких будується матриця O – D. Наприклад, поїздка відбуватиметься від місця початку (O) - зони x, до пункту призначення (D) - зони y. Детальнішу інформацію про поведінкові правила, що регулюють мікросимуляцію трафіку, можна знайти в детальних посібниках для моделей. Розрахунок витрати палива відбувається за наступною формулою:

$$f = c_0 + c_1 * a * v, \quad (3.4)$$

де f - коефіцієнт витрати палива,

v - швидкість руху автомобіля,

a - прискорення транспортного засобу,

c_0 і c_1 - це константи.

Розуміючи рівні попиту на мобільність у системі дорожнього руху та відповідно до досліджуваного сценарію, можна встановити рівень викидів та проаналізувати вплив змін. В цілому мікросимуляція забезпечує ряд корисних методів для моделювання викидів від автомобільного транспорту, оскільки дозволяє аналізувати невеликі зміни в мережі з точки зору їх впливу на транспорт та наслідків викидів.

Однією з цілей поведінкових досліджень транспорту є розуміння того, як

мандрівники використовують транспортну інфраструктуру для кращого прогнозування потреб та посилення процесу прийняття рішень, забезпечуючи таким чином більш цілісне уявлення про діяльність. Моделі поведінки значною мірою спираються на дисципліни соціальної психології та поведінкової економіки, щоб знайти основні принципи [48]. Крім потреби подорожі від місця відправлення до пункту призначення, можуть бути розглянуті також розуміння поведінки подорожей, включаючи такі фактори, як мотивація для подорожей, планування та будь-яких обмежень на подорожі.

Моделі, засновані на діяльності, зосереджуються на основних мотиваціях прийняття рішень про подорожі, дозволяючи чіткіше зрозуміти схеми подорожей та кількісно визначити вимоги до системи мобільності. Кількісно визначивши обсяг подорожей всередині мережі за допомогою підходу, заснованого на діяльності, можна застосовувати коефіцієнти викидів для оцінки викидів CO_2 від автомобільного транспорту.

Моделі, засновані на агентах, використовувались у підходах, заснованих на діяльності, але є також елементи принципів моделювання на основі агентів, що включені в деякі моделі мікросимуляції. Агентне моделювання характеризує ряд агентів у практичному просторі, модельованому світі, в якому агенти взаємодіють, щоб зрозуміти поведінкову динаміку. Агенти мають поведінку та взаємодіють з іншими агентами та їх оточенням, що може змінити їх поведінку, і це дає уявлення про динаміку системи, що моделюється [33]. Ці підходи були використані в соціальних та біологічних науках для розуміння поведінки, і є приклади їх використання в транспорті.

Є також приклади включення принципів моделювання на основі агентів до моделей мікросимуляції руху. PARAMICS - це модель мережі руху, яка характеризує діяльність пішоходів та взаємодію пішохідного руху, тим самим включаючи підхід до моделювання на основі агента. Крім того, якісні методи та підходи до віртуальної реальності, окреслені, є областями, які можуть потенційно

підвищити ступінь активності в рамках моделювання мережі трафіку.

Перевага використання моделювання на основі агентів для дослідження систем, таких як ті, що знаходяться в транспортному секторі, полягає в тому, що можна моделювати ряд «різномірних агентів».

MATSIM фіксує динаміку транспортної системи за допомогою поведінково-підхідного підходу, що характеризує це через агентів у транспортній мережі.

Сама програма MATSIM не розраховує викиди автомобільного транспорту, проте є можливість проведення дослідження, що поєднане з MATSIM, для оцінки викидів, що створюються модельованою поведінкою в поїздках. MOBILE6.2 використовує показники економії палива для розрахунку викидів CO_2 , але вони не змінюються для швидкості та типу двигуна, як і розрахунки для інших забруднюючих речовин в MOBILE6.2; однак у моделі враховано широкий діапазон типів транспортних засобів, і додано розрахунок CO_2 . Модель також дозволила вивчити, наскільки інформація впливає на готовність розглянути альтернативи [30]. Вимоги до даних цього підходу полягають у параметрах для характеристики агентів. Модель видає інформацію про частку ринку електромобілів протягом періоду сценарію. Хоча цей підхід до моделювання не дає прямих розрахунків викидів від автомобільного транспорту, він дає корисну інформацію про суміш палива. Це корисно для розуміння майбутніх викидів від автомобільного транспорту та того, наскільки цілі щодо зменшення викидів можуть бути досягнуті шляхом поглинання транспортних засобів, що працюють на альтернативному паливі.

Динамічна модель фіксує те, як система змінюється в часі, і цей тип підходу застосовується в ряді дисциплін у фізичних та соціальних науках. Системні динамічні моделі базуються на діаграмах причинно-наслідкового циклу, що моделюють та аналізують взаємозв'язки та математичне моделювання запасів та потоків. Вони включають як якісні, так і кількісні методи та аналіз, роблячи їх дуже універсальними інструментами.

Діаграми причинно-наслідкового циклу - це основний прийом, що використовується в рамках моделювання динаміки системи для дослідження якісних взаємозв'язків між різними аспектами системи. Вони працюють шляхом ідентифікації сутностей, які є аспектами системи, які можуть впливати на інші аспекти та можуть бути порушені іншими, і вони повинні представляти невизначену величину. У динаміці системи також є екзогенні фактори, які є заздалегідь визначеними константами, що взаємодіють з ідентифікованими сутностями. Потім ці сутності з'єднуються спрямованими причинно-наслідковими зв'язками, які утворюють цикли, що підсилюють або балансують, представляючи позитивні або негативні зворотні зв'язки в системі.

Динаміка системи застосовується у транспорті, оскільки зворотний зв'язок та зв'язки, які ці моделі здатні захопити, корисні для виявлення взаємодій у транспортній системі. Автомобільні викиди у моделі керуються соціально-економічними факторами, і розраховуються з допомогою транспортного підмодуля для розрахунку споживання палива, який використовується для розрахунку викидів під час використання. Вбудовані викиди у виробництві палива та виробництві транспортних засобів також враховуються при підрахунку загальних викидів від діяльності в моделі [49].

Розрахунок викидів CO_2 у MARS проводиться за допомогою рівняння:

$$CO_2 e_{ij}^{PC}(t) = a_2 * (V_{ij}^{PC}(t))^2 + a_1 * V_{ij}^{PC}(t) + a_0, \quad (3.5)$$

де $CO_2 e_{ij}^{PC}(t)$ - це питомі викиди вуглекислого газу автомобіля для поїздки від i до j у році t ,

$V_{ij}^{PC}(t)$ - середня швидкість поїздки на автомобілі від i до j у році t залежно від застосованого векторного інструменту політики MARS,

a_n - параметр.

Це демонструє, як виходи з моделі поїздки в MARS використовуються для

розрахунку викидів CO_2 шляхом застосування коефіцієнта викидів на основі середньої швидкості до вироблених км транспортних засобів. Коефіцієнти викидів беруться з проекту MEET. Потім вони агрегуються за допомогою MARS-моделі для отримання загальних викидів, що утворюються певними видами транспорту в системі, що моделюється.

MARS та ASTRA обрані як приклади системного динамічного моделювання транспорту, оскільки вони показують, як методи можна застосовувати відповідно до міського та регіонального масштабів. Ці підходи до моделювання є високоефективними для фіксації складної динаміки в більшому географічному та часовому масштабі, ніж поведінкові моделі, які включають різні фактори в розрахунку викидів CO_2 від автомобільного транспорту. З вибору цих двох моделей як прикладів системно-динамічних підходів видно, що вони є універсальними інструментами.

Наприклад, розрахунки, проведені в ASTRA, враховують викиди вгору за течією, що входять у виробництво транспортних засобів та палива, де модель MARS цього не робить. Це призведе до різниці у результатах викидів від автомобільного транспорту; в деяких випадках включення викидів вище за течією може розглядатися як більш точне при обліку загальних викидів від транспорту.

Вибір найбільш підходящого інструменту повинен розглядатися з урахуванням конкретної політики чи дослідницьких питань.

Техніко-економічні моделі включають цілий ряд інструментів, які розглядають взаємозв'язок між технологіями, економікою та загальними наслідками цього, а також можуть поєднуватися з соціально-економічними даними.

ЕЗ моделі є підмножиною цієї категорії та охоплюють взаємодію між енергією, економікою та навколишнім середовищем. Ці моделі, як правило, є макромасштабними моделями, іноді розглядаючи транспорт лише як підгалузь широкої економічної діяльності. Вони мають здатність давати уявлення про викиди на рівні сектору та, як правило, забезпечують сукупні результати. Як і у випадку з

багатьма макромасштабними моделями, деталі, зафіксовані в моделях дорожнього руху чи поведінкових підходах, часто залишаються поза увагою, але є приклади спроб інтегрувати деякі з цих деталей у ці підходи.

Ці моделі використовують соціально-економічні показники в поєднанні з прогнозами транспортних засобів та паливних технологій для оцінки викидів від автомобільного транспорту в майбутньому.

Модель є широкомасштабною, яка забезпечує сукупні прогнози викидів за секторами. Ці результати базуються на соціально-економічній діяльності, ВВП та чисельності населення в макроекономічній моделі та цінах на паливо з моделей НПЗ / електроенергії. Виходи з моделі включають попит на послуги в пасажирських милях за підрежимом, паливом та регіоном та інтенсивність обслуговування в пасажирських милях на Vtu за підрежимом, паливом та регіоном.

Ці моделі забезпечують сумарні прогнози викидів для транспортної системи, які мають великий просторовий масштаб. На відміну від підходів до мікромасштабних ситуацій, динаміка окремих людей чи транспортних засобів не є очевидною, однак аналітичні дані можуть бути корисними для прийняття національної та міжнародної політики та прийняття рішень. Зокрема, демонстрація величини та географічного розподілу викидів може пропорціонувати відповідальність за ці викиди та необхідність проведення заходів щодо зменшення викидів.

Приклади комбінування моделей для створення нових підходів до розуміння транспортної системи, які поєднують методи, засновані на агентах, та системну динаміку для вивчення переходів до стійкої мобільності. Поєднання цих двох підходів дозволило дослідити поведінкові взаємодії між гетерогенними агентами в компонентах досліджень моделювання на основі агентів. Потім компоненти моделювання, засновані на агентах, взаємодіють із інструментом системної динаміки, щоб дослідити, як ця поведінка відтворюється у взаємодіях та відносинах у майбутньому переході до стійкої мобільності.

Ці комбінації безлічі інструментів дозволяють дослідити викиди від нових транспортних схем, що в інших випадках було складним завданням в рамках єдиного підходу до моделювання.

Це поєднання різноманітних підходів, включаючи моделювання динаміки системи, може дати уявлення про складні взаємозв'язки міжнародного транспортного сектору в цьому масштабі та відповісти на виклики довгострокового прогнозування скорочень викидів.

Використання інтегрованих моделей в рамках одного дослідження дозволяє подолати деякі недоліки окремих методів моделювання [55]. Наприклад, поєднання цілеспрямованих досліджень поведінки з більш широкими моделями, такими як моделі мереж руху або інструменти системної динаміки, дозволяє розуміння поведінки людей щодо мобільності бути розміщеним у ширшому контексті. Це підтримує надання результатів, які потім можуть бути використані особами, що приймають рішення, при розробці політики, хоча інтеграція різноманітних підходів до моделювання може призвести до моделей, які є більш складними та можуть бути складними для непрофесійних користувачів.

Отже, вище було представлено ряд підходів до моделювання транспортної системи, зокрема викидів CO_2 . Мікросимуляція, поведінкове моделювання та моделі, засновані на агентах, представляють транспортні мережі в мікромасштабі, характеризуючи взаємодію на рівні мережі та рішення, що породжують моделі мобільності. Вони переважно є цінними для прийняття рішень на місцевому рівні, оскільки вони можуть дати уявлення про географічний та часовий масштаби, необхідні для цих рішень [28]. Ці моделі різняться за рівнем деталізації, зафіксованого про людину, наприклад, мікросимуляційні моделі фіксують викиди від окремих транспортних засобів, але динаміка поведінки та мотивація діяльності не фіксуються, тоді як моделі, що базуються на агентах та поведінці, охоплюють більше деталей про ці фактори. Розрахунок викидів CO_2 у цих моделях варіюється, від застосування коефіцієнта викидів до суми попиту на поїздки до більш детальних

розрахунків, проведених у VISSIM, з доповненням EnViVer Pro, яке враховує різні профілі швидкості та часу та інші фактори що може вплинути на викиди. Застосовуваність індивідуального підходу залежить від питання, яке задається, при більшій дезагрегації генерується більше даних, і, можливо, найпростіший підхід до питань необхідний, і часто політичні питання вимагають лише оцінок сукупних викидів на високому рівні, щоб зрозуміти наслідки змін.

Однак технологічно-економічні моделі дозволяють отримати уявлення про масштаби регіональної чи глобальної економіки, що може забезпечити корисне прийняття рішень на національному та міжнародному рівнях прийняття політики. Кількісна оцінка викидів CO_2 від автомобільного транспорту необхідна як на місцевому, так і на глобальному рівнях, а також у географічному та часовому масштабах для того, щоб можна було ефективно приймати рішення щодо пом'якшення викидів CO_2 та уникнення небезпечних кліматичних змін. Бувають випадки, коли моделі виймаються зі звичних масштабів. Наприклад, модель TransTools використовує принципи моделювання мережі трафіку для представлення поїздок по Європі, забезпечуючи великий обсяг деталей у широкій просторовій зоні [54]. Однак загальна тенденція в транспортному моделюванні полягає у високому рівні дезагрегації при дослідженні менших просторових масштабів із збільшенням обчислювальних потреб, наприклад, в інструментах мікросимуляції або дослідженнях поведінкового типу.

Моделювання системної динаміки на транспорті розміщується між дрібномасштабними дослідженнями мікросимуляції та масштабними техніко-економічними моделями. Наприклад, MARS вивчає динаміку транспортної системи та масштаби столиці, тоді як ASTRA охоплює європейську транспортну мережу. Як пропонується, це забезпечує набір інструментів, які можуть проектувати майбутні транспортні системи в масштабі, який відповідає між підходами мікромасштаби та великими технологічними економічними моделями. Додатковими перевагами використання підходу системної динаміки є захоплення циклів зворотного зв'язку

через діаграми причинно-наслідкового циклу, які можуть фіксувати динаміку багатьох зацікавлених сторін та результати політики в складній системі. Особливі сили в моделюванні системної динаміки транспорту полягають у використанні інструментів для фіксації взаємодії між землекористуванням та транспортом, наприклад, MARS, та моделі ринків альтернативних транспортних засобів. Що стосується викидів, це може дати уявлення про обсяг викидів від аналізованої транспортної системи, а моделювання майбутніх ринків транспортних засобів дає уявлення про потенціал зменшення викидів CO_2 з автопарку через поглинання альтернативних транспортних засобів [53].

Зрозуміло, що незалежно від масштабу системи, який вимагає дослідження, доступні інструменти моделювання, які можуть дати уявлення про транспортні проблеми та наслідки потенційних політик та рішень. Крім того, поєднання декількох методів моделювання може забезпечити додаткові інноваційні підходи до моделювання транспорту.

Заключне питання дослідження стосувалося роздумів про переваги та недоліки різних підходів. З резюме, наданого для кожного типу моделі, ясно, що кожна має переваги при використанні в контексті (географічний, рівень агрегування тощо), для якого вона була розроблена, і виникають недоліки, коли їх використання виходить за рамки вихідного контексту [50]. Практика взаємодії або інтеграції моделей виникла, принаймні частково, з необхідності заповнити деякі прогалини у можливостях моделювання, які все ще очевидні при оцінці викидів у певних географічних чи часових масштабах.

Очевидно, що наявність різних інструментів моделювання робить вибір правильного інструменту для конкретного аналізу важливим. Загалом, різні точки зору та парадигми моделювання створюють багату і різноманітну серію інструментів та методів, які можуть охопити транспортну систему та наслідки викидів. Вони утворюють дуже цінний ресурс у галузі, де технологія, економіка, поведінка та інші фактори є ключовими для розуміння динаміки та наслідків

викидів із сектору. Крім того, поєднання різних підходів до моделювання може дати подальші уявлення та розуміння викидів від транспорту, оскільки часто єдиний підхід не може повністю охопити динаміку такої складної системи.

Висновки до третього розділу.

Відповідно до вище змодельованої моделі можна зробити наступні висновки. Викиди CO_2 зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році. Для періодів 1935 - 1949 років, 1950 - 1969 років, 1970 - 1999 років та 2000 - 2019 років значення зріст CO_2 становив 81,5, 42,4, 43,8 та 47,8% відповідно. Також модель пропонує три можливих сценарії глобального потепління. Сценарії один та два є неправдоподібними і можливими тільки в випадку, коли буде впроваджений дуже серйозний контроль викидів CO_2 . Перший сценарій зменшить рівень CO_2 в атмосфері майже до доіндустріального до 2100 року, та зменшить глобальну температуру на 0.3 °C. Для третього сценарію приріст CO_2 складатиме 0.5%, для першого - -0.5% і для другого - 0% (тобто відповідатиме теперішнім).

Дослідження показало, що Європейський союз вже почав модернізацію і перетворення, необхідні для кліматично нейтральної економіки. Європейська комісія активізує ці зусилля, та має плани по досягненню першої в світі кліматично нейтральної економіки ключового регіону до 2050 року. У листопаді 2018 року Європейська комісія представила довгострокову стратегічну концепцію зниження викидів парникових газів, показавши, яким чином Європа може прокласти шлях до кліматичної нейтральності - до економіки з нульовими викидами парникових газів. У стратегії розглядаються способи досягнення цього шляхом вивчення всіх ключових секторів економіки, включаючи енергетику, транспорт, промисловість і сільське господарство. Було вивчено цілий ряд варіантів, перш ніж зробити висновок про те, що перехід до нульових викидів парникових газів до 2050 року можливий на основі існуючих (в деяких випадках - перспективних) технологічних рішень, підтримки громадян і координації дій в таких ключових сферах, як

промислова політика, фінанси і наукові дослідження, в умовах забезпечення соціальної справедливості такого переходу.

Порівняння транспортних моделей показало, що моделі можуть мати різні основоположні епістемології, проте всі вони мають здатність представляти елементи системи. Вони також можуть допомогти в питаннях масштабу викидів від транспорту, незважаючи на різні перспективи та географічний обсяг. Різні засоби моделювання, які вони містять, можуть бути використані різними способами та різними практиками для вивчення ряду проблем, пов'язаних з транспортом.

Для порівняння було розглянуто такі моделі:

1. моделі мереж руху - мікросимуляція;
2. моделі поведінки;
3. агентне моделювання;
4. моделювання динаміки системи;
5. техно-економічні моделі.

ВИСНОВКИ

Зміна клімату на даний момент є чи не найбільшим екологічним викликом у світі. Зараз очевидно, що викиди парникових газів, що пов'язані із індустріалізацією та економічним зростанням спричиняють глобальне потепління. 2019 рік був офіційно визнаним другим найтеплішим роком в історії людства, а останнє десятиліття вважається найтеплішим з усіх коли-небудь зафіксованих. Рівні вуглекислого газу (CO_2) та інших парникових газів в атмосфері зросли до нових рекордів у 2019 році. А глобальне потепління, спричинене антропогенними викидами, викликає кліматичні зміни, які представляють серйозну загрозу для життя на землі у вигляді повеней та інших екстремальних погодних умов, уже сьогодні кожен відчув наслідки глобального потепління. Глобальне потепління за сучасним сценарієм є загрозою для виживання людства.

Реагування на кліматичні зміни сьогодні охоплює такі речі, як зменшення викидів та стабілізація рівня парникових газів в атмосфері, пристосування до фактичного та очікуваного клімату та вивчення клімату. Вивчення клімату допомагає передбачити як сильно підніметься рівень моря через тепліші температури моря, як підніметься температура повітря. Ми також можемо побачити, які регіони, найімовірніше, постраждають від екстремальних погодних умов, або яким видам дикої природи загрожує зміна клімату.

У ході дослідження теоретичних засад аналізу кліматичних змін, було встановлено, що процес аналізу повинен притримуватися чітко встановлених правил та складатися з таких етапів:

1. визначення цілі аналізу;
2. вибір або розробка даних, що чітко підходять під ціль аналізу;
3. застосування відповідних інструментів аналізу;
4. критична інтерпретація результатів аналізу.

Додатково було встановлено, що одним із найбільш вживаних засобів дослідження є композитний аналіз, який дозволяє проводити кліматичні дослідження шляхом використання середніх показників для подій.

Проведений аналіз розвитку засобів моделювання та дослідження кліматичних змін за останні 60 років показав що моделі розвивалися достатньо стрімко і в наступному порядку:

1. нульова та одновимірна моделі енергетичного балансу;
2. одновимірна то двовимірна радіаційно-конвективні моделі;
3. двовимірна статистично-динамічна модель;
4. модель загальної циркуляції;
5. модель системи Земля проміжної складності.

Серед сучасних підходів до прогнозування виділяють такі найбільш поширені методи як лінійна регресія, ротаційне оцінювання, гаусівський процес.

Неповнота даних – це одна із найбільших проблем в моделюванні клімату. Оскільки, прогалини в базовій статистиці є достатньо вагомими. Наявність серйозних невизначеностей, пов'язаних з неповнотою спостережень, розуміння фізичних процесів і численних зворотних зв'язків в кліматичній системі, надійністю кліматичних моделей, складністю виявлення малого антропогенного сигналу на тлі природної кліматичної мінливості, не дозволяє зробити однозначних висновків про внесок антропогенних викидів парникових газів в спостережуване потепління.

Виконане дослідження показало що, на транспортний сектор припадає значна частка викидів парникових газів, а саме 16%, та з них 70% на автомобільний транспорт. За період 2002–2019 роки у транспортному секторі світу відбулося значне збільшення викидів CO₂. Викиди CO₂ зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році, що говорить про те, що викиди в автомобільному секторі пострібно зростають. Що стосується як абсолютної кількості, так і відносної частки, автомобільні перевезення є найбільш швидкозростаючими джерелами викидів CO₂. Причиною цього є нарощування пасажирокілометрів та вантажних

тонн-кілометрів. За досліджуваний період пасажиро-людино-кілометри та вантажні тонни-кілометри у секторі автомобільного транспорту зросли відповідно у 5,43 та 16,01 разів.

Дослідження існуючих моделей показало, що в них є багато недоліків, а саме - проблеми зі збором коректних даних, точність фізики моделі, точність прогнозованих змін, не завжди вірна оцінка чутливості клімату до зовнішніх впливів. Очікувати від моделей клімату точного проектування майбутніх викидів та пов'язаних із ними змін, які залежать від поведінки людей, технологічних змін, економічного зростання та зростання населення також не варто.

Проте моделі сходяться в тому, що всі вони прогнозують глобальне потепління, але в різній мірі. В загальному можна зараз говорити, що порівнюючи 2019 рік з 1970 роком передбачив підвищення середньої глобальної температури на 1°C і зникнення близько 50% багаторічних льодів в Арктиці. Спостереження підтвердили ці тенденції, продемонструвавши, що середня глобальна температура за цей період збільшилася на $0,98^{\circ}\text{C}$ і що площа багаторічних арктичних морських льодів в вересні 2019 року було приблизно на 46% менше, ніж в 1970 році.

Моделі зазвичай пропонують кілька сценаріїв: позитивний (при малих викидах), при великих викидах та при середніх. За третім із сценаріїв очікується підвищення середньої глобальної температури від $0,2^{\circ}\text{C}$ до $0,5^{\circ}\text{C}$ за десятиліття (в середньому на $0,3^{\circ}\text{C}$ за десятиліття). Сценарій 1 передбачає зрушення в бік більш широкого використання природного газу, значне підвищення енергоефективності, строгий контроль над монооксидом вуглецю, зворотні тенденції в сфері збезлісення і викидів вуглекислого газу. В результаті сценарій 1 передбачає більш вільш низьке підвищення середньої глобальної температури поверхні - на $0,2^{\circ}\text{C}$ за десятиліття.

Тому в перспективі найближчих двох-трьох десятиліть навіть в найбільш позитивному сценарії найбільш вірогідним здається збереження існуючих тенденцій зростання атмосферної концентрації вуглекислого газу і температури.

Відповідно до власно спроектованої моделі можна зробити наступні висновки. Викиди CO_2 зросли зі 123,14 млн. тонн (Мт) в 2002 році до 660,76 Мт в 2019 році. Для періодів 1935 - 1949 років, 1950 - 1969 років, 1970 - 1999 років та 2000 - 2019 років значення зріст CO_2 становив 81,5, 42,4, 43,8 та 47,8% відповідно. Також модель пропонує три можливих сценарії глобального потепління. Сценарії один та два є неправдоподібними і можливими тільки в випадку, коли буде впроваджений дуже серйозний контроль викидів CO_2 . Перший сценарій зменшить рівень CO_2 в атмосфері майже до доіндустріального до 2100 року, та зменшить глобальну температуру на 0.3 °C. Для третього сценарію приріст CO_2 складатиме 0.5%, для першого - -0.5% і для другого - 0% (тобто відповідатиме теперішнім).

Якщо порівнювати результати існуючих моделей та тієї, що була спроектована, то результати дещо відрізняються. Спроектована модель є більш оптимістичною і в найбільш імовірному варіанті передбачає приріс глобальної середньої температури на повітря на 0.5% (2 °C) до 2100 року, в той час, коли існуючі моделі прогнозують збільшення температури в середньому на 0,3 °C за десятиліття (різниця від спроектованої моделі складатиме близько 0,4 °C).

Дослідження показало, що Європейський союз вже почав модернізацію і перетворення, необхідні для кліматично нейтральної економіки. Європейська комісія активізує ці зусилля, та має плани по досягненню першої в світі кліматично нейтральної економіки ключового регіону до 2050 року. У листопаді 2018 року Європейська комісія представила довгострокову стратегічну концепцію зниження викидів парникових газів, показавши, яким чином Європа може прокласти шлях до кліматичної нейтральності - до економіки з нульовими викидами парникових газів. У стратегії розглядаються способи досягнення цього шляхом вивчення всіх ключових секторів економіки, включаючи енергетику, транспорт, промисловість і сільське господарство. Було вивчено цілий ряд варіантів, перш ніж зробити висновок про те, що перехід до нульових викидів парникових газів до 2050 року можливий на основі існуючих (в деяких випадках - перспективних) технологічних

рішень, підтримки громадян і координації дій в таких ключових сферах, як промислова політика, фінанси і наукові дослідження, в умовах забезпечення соціальної справедливості такого переходу.

Порівняння транспортних моделей показало, що моделі можуть мати різні основоположні епістемології, проте всі вони мають здатність представляти елементи системи. Вони також можуть допомогти в питаннях масштабу викидів від транспорту, незважаючи на різні перспективи та географічний обсяг. Різні засоби моделювання, які вони містять, можуть бути використані різними способами та різними практиками для вивчення ряду проблем, пов'язаних з транспортом.

Для порівняння було розглянуто такі моделі:

1. моделі мереж руху - мікросимуляція;
2. моделі поведінки;
3. агентне моделювання;
4. моделювання динаміки системи;
5. техно-економічні моделі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ypersele J. Climate Change Projections for 2050/2100 and their Potential Impacts in the Middle East / Jean-Pascal Ypersele., 2015. - с. 10 – 11.
2. Bernstein L. Climate Change 2007 Synthesis Report / L. Bernstein, P. Bosch, O. Canziani., 2007. – с. 44 – 52.
3. Rajendra K., Myles A., Barros V. / Climate Change 2014 Synthesis Report, 2014. – с. 82.
4. Green K., Armstrong J. / Forecasting global climate change, 2014. - с. 9 – 16.
5. Li W., Li H., Zhang H., Sun S. / The Analysis of CO2 Emissions and Reduction Potential in China's Transport Sector, 2016. – с. 2 – 10.
6. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.
7. The device that reverses CO2 emissions [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bbc.com/future/article/20210310-the-trillion-dollar-plan-to-capture-co2>.
8. Carbon emissions are falling sharply due to coronavirus. But not for long [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/coronavirus-causing-carbon-emissions-to-fall-but-not-for-long>.
9. Yoroa K., Daramolab M. / CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect, 2020. – с. 3 – 28.
10. Дата сет [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.che-project.eu/data-portal>.
11. Scholes C. / Challenges for CO2 capture by membranes, 2020. – с. 357 – 377.
12. Ghasem N. / CO2 removal from natural gas, 2020, - с. 503-522.

13. Longaray S., Bernard / Encapsulated liquid sorbents for CO₂ capture, 2020. – с. 125-150.
14. Glossop M. / A SIMPLE METHOD FOR THE ESTIMATION OF CARBON DIOXIDE CONCENTRATION IN THE PRESENCE OF NITROUS OXIDE. – с. 17 – 18.
15. Kalnbalkite A., Zihare M., Blumberga D. / Methodology for estimation of carbon dioxide storage in bioproducts, 2017. – с. 533 – 538.
16. How to Estimate Carbon Dioxide Emissions [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://static1.squarespace.com/static/5c7463aaa9ab95163e8c3c2e/t/5cc2cde7b208fcd5cc2b1c95/1556270569576/Chapter5_English_Blue_Carbon_LR_190306.pdf
17. Lee B., Lee J., Yun Y., Hwang B., Lim C., Park Y. / Methodology to Calculate the CO₂ Emission Reduction at the Coal-Fired Power Plant: CO₂ Capture and Utilization Applying Technology of Mineral Carbonation. – с. 2 – 10.
18. Russell S. / A RECOMMENDED METHODOLOGY FOR ESTIMATING AND REPORTING THE POTENTIAL GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM FOSSIL FUEL RESERVES. – с. 2-5.
19. Guidelines for Measuring and Managing CO₂ Emission from Freight Transport Operations [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://www.ecta.com/resources/Documents/Best%20Practices%20Guidelines/guideline_for_measuring_and_managing_co2.pdf.
20. Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
https://www.eib.org/attachments/strategies/eib_project_carbon_footprint_methodologies_en.pdf.

21. Grever U., Bockel L., Galford G., Gurwick N., Nash J., Wollenberg E. / A methodology for greenhouse gas emission and carbon sequestration assessments in agriculture. – с. 10.
22. EU climate action and the European Green Deal [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en.
23. E.U. Agrees to Slash Carbon Emissions by 2030 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nytimes.com/2020/12/11/world/europe/eu-climate-emissions.html>.
24. Climate Action Plan 2050 – Germany's long-term low greenhouse gas emission development strategy [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bmu.de/en/topics/climate-energy/climate/national-climate-policy/greenhouse-gas-neutral-germany-2050/>.
25. Global climate change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://climate.nasa.gov/>.
26. Shahzad U. / Global Warming: Causes, Effects and Solutions, 2015. – с. 2 – 8.
27. El-Sharkawy M. / Global warming, 2014. – с. 162.
28. Matawal D. / Climate Change and Global Warming: Signs, Impact and Solutions, 2013. - с. 63 – 64.
29. Aizebeokhai A. / Global warming and climate change: Realities, uncertainties and measures, 2010. – с. 869.
30. Mukhopadhyay B. / Global Warming – A Threat to the Planet, 2014. – с. 31.
31. Greenhouse gas emissions [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/>.
32. Global warming awareness posters [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://digitalmofo.com/36-global-warmingawareness-posters-pics/>.
33. Climate change and food safety [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://epianalysis.wordpress.com/2011/12/01/climateandfood/>.
34. Riedy C. / Climate Change, 2016. – с. 7 -8.

35. Khawas V. / Global warming and climate change: Implications for human security in India, 2007. – с. 97.
36. Andersona T., Hawkins E., Jonescd P. / CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models, 2016. – с. 178 – 187.
37. Berger J. Contagious: Why Things Catch On / Jonah Berger. – New York: Simon & Schuster, 2016. – 256 с.
38. Abeydeera H., Mesthrige J., Samarasinghalage T. / Global Research on Carbon Emissions: A Scientometric Review, 2019. – с. 3 – 5.
39. Exxon's Plan for Surging Carbon Emissions Revealed in Leaked Documents: веб-сайт [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-10-05/exxon-carbon-emissions-and-climate-leaked-plans-reveal-rising-co2-output>.
40. CO₂ emissions from new passenger cars in the EU, by country [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.acea.be/statistics/article/new-car-co2-emissions>.
41. Carbon footprint [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_footprint.
42. Abdallah L. / Reducing Carbon Dioxide Emissions from Electricity Sector Using Smart Electric Grid Applications, 2012. – с. 2 – 7.
43. After 2020 decline, EIA expects energy-related CO₂ emissions to increase in 2021 and 2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46537>.
44. The 5 Countries That Produce the Most Carbon Dioxide (CO₂) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.investopedia.com/articles/investing/092915/5-countries-produce-most-carbon-dioxide-co2.asp>.

45. Climate change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change.
46. Greenhouse gas emission statistics - carbon footprints [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_carbon_footprints.
47. Andrew R. / Global CO2 emissions from cement production, 2017. – с. 197 – 202.
48. Road transport and air emissions [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ons.gov.uk/economy/environmentalaccounts/articles/roadtransportandairmissions/2019-09-16>.
49. Kang J., Yang Y. / Energy carbon emission structure and reduction potential focused on the supply-side and demand-side, 2020. – с. 1 – 12.
50. Noë J., Billen G., Garnier J. / Carbon Dioxide Emission and Soil Sequestration for the French Agro-Food System: Present and Prospective Scenarios, 2019. – с. 5.
51. Abdullah L., Pauzi H. / Methods in forecasting carbon dioxide emissions: A decade review, 2015. – с. 68, 70.
52. Liu H., Li J., Sun Y., Wang Y., Zhao H. Estimation Method of Carbon Emissions in the Embodied Phase of Low Carbon Building, 2020. – с. 3.
53. Osman S., Doran J., Rooney D. / Strategies for mitigation of climate change: a review, 2020. – с. 3 – 5.
54. Quantifying national responsibility for climate breakdown: an equality-based attribution approach for carbon dioxide emissions in excess of the planetary boundary [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(20\)30196-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(20)30196-0/fulltext).

55. Azarkamand S., Wooldridge C., Darbra R. / Review of Initiatives and Methodologies to Reduce CO2 Emissions and Climate Change Effects in Ports, 2020. – с. 5.
56. 2020 Government greenhouse gas conversion factors for company reporting [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/901692/conversion-factors-2020-methodology.pdf.
57. Nogia P., Sidhu G., Mehrotra R., Mehrotra S. / Capturing atmospheric carbon: biological and nonbiological methods, 2016. – с. 269.
58. CO2 EMISSIONS FROM STATIONARY COMBUSTION OF FOSSIL FUELS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_1_CO2_Stationary_Combustion.pdf.
59. Reducing Carbon Dioxide Emissions in Transport Infrastructure Projects [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1077781/FULLTEXT01.pdf>.
60. Климатическая нейтральность [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://publications.europa.eu/resource/cellar/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1.0005.03/DOC_1.
61. Thumfart A. / Kapitalismus – Klimawandel–Nachhaltigkeit, 2018. – с. 12.
62. Energy balanced models [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://slideplayer.com/slide/5188388/>.
63. Introduction to General Circulation Models [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/524>.
64. Transport emissions [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: 65. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en.
65. Limitations of Climate Models as Predictors of Climate Change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ncpathinktank.org/pub/ba396>.

66. Paris Agreement [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Paris_Agreement.
67. What is Climate Change? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://climate.nasa.gov/>.
68. Rich J. / Transport Models - From Theory to Practise, 2015. – с. 210.
69. Ortúzar J., Willumsen L. / Modelling Transport, 2011. – с. 607.
70. Annual total CO₂ emissions, by world region [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co-emissions-by-region>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмний код моделі прогнозування кліматичних змін

```
1 > library(readr)
2 > climate_change <- read_csv("~/downloads/climate_change.csv")
3 > library(dplyr)
4 > library(ggplot2)
5 > library(plotly)
6 > library("RColorBrewer")
7 > new_climate_change <- na.omit(climate_change)
8 > climate_change_chart <- ggplot(climate_change, aes(x = Year, y = Temp, fill = CO2)) + xlab("Year") + ylab("Temp") + theme_minimal(base_size = 14)
9 > barplot <- climate_change_chart + geom_bar(position = "dodge", stat = "identity", color = "white")
10 > ggplotly(barplot)
11 > library(lubridate)
12 > climate_change_ymd <- climate_change %>% mutate(year_month = ymd(paste(climate_change$Year, climate_change$Month, truncated = 1)))
13 > L1 <- ggplot(climate_change_ymd, aes(year_month, Temp)) + geom_line() + geom_smooth(se=FALSE, linetype = "dotted") + labs(title = "Temperature (1983-2018)", x = "Year", y = "Temperature") + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))
14 > ggplotly(L1)
15 > Tg <- ggplot(climate_change, aes(as.factor(Month), Temp)) + geom_point(aes(color = as.factor(Year))) + geom_line(aes(group = as.factor(Year), color = as.factor(Year)), alpha = 0.7) + labs(title = "Temperature by month") + xlab("Months") + ylab("Temperature") + theme(axis.text.x = element_text(size = 6, angle = 90, hjust = 0.5, vjust = 0.5))
16 > library(ggpubr)
17 > scat_plot1 <- ggplot(climate_change_ymd, aes(year_month, CO2)) + geom_line(colour = "blueviolet") + geom_smooth(method = "lm") + ggtitle("Carbon Dioxide")
18 > scat_plot1
19 > fit_lm(Temp~CO2, data=climate_change)
20 Call:
21 lm(formula = Temp ~ CO2, data = climate_change)
22 ##
23 ## Residuals:
24 ##      Min       1Q   Median       3Q      Max
25 ## -6.6951 -3.7630  0.3356  4.3390  6.1293
26 ##
27 ## Coefficients:
28 ##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
29 ## (Intercept)  6.050224  2.215030  2.731  0.00657 **
30 ## CO2          0.008605  0.005683  1.514  0.13071
31 ## ---
32 ## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
33 ##
34 ## Residual standard error: 4.133 on 426 degrees of freedom
35 ## Multiple R-squared:  0.005354, Adjusted R-squared:  0.003019
36 ## F-statistic: 2.293 on 1 and 426 DF, p-value: 0.1307
37 > library(ggiraph)
38 > library(ggiraphExtra)
39 > ggPredict(fit, se=TRUE, interactive=TRUE)
40 > library(gganimate)
41 > library(gifski)
42 > gif <- ggplot(climate_change, aes(Year, Temp, size = CO2, colour = Month)) + geom_point(alpha = 0.2, show.legend = FALSE) + facet_wrap(~Month) + labs(title = "Year: {frame_time}", x = "Year", y = "Temperature") + transition_time(Year) + ease_aes("linear")
43 > animate(gif, renderer = gifski_renderer())
44 > gif <- ggplot(climate_change, aes(x = Year, y = Temp, color = Month, group = Month)) + geom_path() + geom_point() + facet_wrap(~Month) + theme(legend.position = "none") + labs(title = "Temperature variation, Year: {frame_along}") + transition_reveal(along = Year) + ease_aes("linear")
45 > animate(gif, renderer = gifski_renderer())
46 > climate_multreg <- filter(climate_change, Month == "1" | Month == "2")
47 > fit1 = lm(Temp~Year+Month, data=climate_multreg)
48 > summary(fit1)
49 ##
50 ## Call:
51 ## lm(formula = Temp ~ Year + Month, data = climate_multreg)
52 ##
53 ## Residuals:
54 ##      Min       1Q   Median       3Q      Max
55 ## -0.99529 -0.24678 -0.02058  0.27043  1.11616
56 ##
57 ## Coefficients:
58 ##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
59 ## (Intercept) -45.568969  11.499143  -3.963  0.000182 ***
60 ## Year         0.024275  0.005746  4.225  7.39e-05 ***
61 ## Month        0.483143  0.116063  4.163  9.17e-05 ***
62 ## ---
63 ## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
64 ##
65 ## Residual standard error: 0.4855 on 67 degrees of freedom
66 ## Multiple R-squared:  0.3443, Adjusted R-squared:  0.3247
67 ## F-statistic: 17.59 on 2 and 67 DF, p-value: 7.249e-07
68 > predict3d::ggPredict(fit1, se=TRUE)
69
```